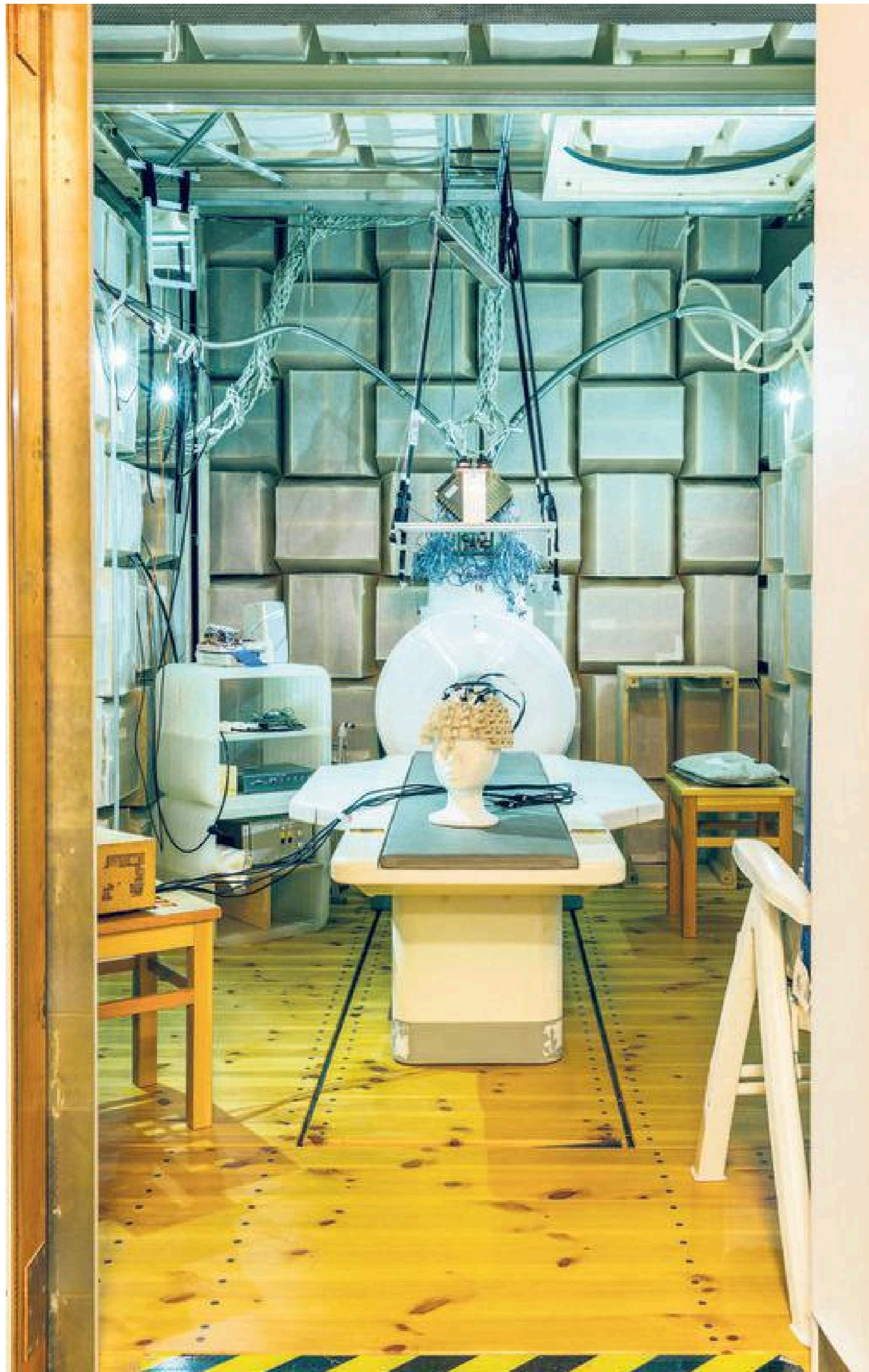


Mensch MASCHINE

Dieser Raum an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Berlin ist aufwendig vor magnetischen Feldern abgeschirmt. Nur so können die hochsensiblen Sensoren der Haube (vorne) die feinen Magnetfelder des Gehirns messen



Können wir irgendwann Gedanken lesen? Und uns per Hirnschnittstelle mit anderen Menschen verbinden? Visionäre wie der Tesla-Gründer Elon Musk träumen davon. Aber noch ist offen, ob es ein Traum oder Albtraum ist. Ein Ausflug in die Weiten der Forschung und Räume ohne Magnetfelder von Jens Lubadeh

Ist es wirklich so einfach? Die Flasche steht auf dem Tisch, ein paar Zentimeter nur vor ihm, eine Handbewegung entfernt. Sven Gräbe kann sie erreichen, aber nicht greifen. Er ist querschnittsgelähmt, kann die Arme bewegen, die Finger nicht mehr. So war das jedenfalls die letzten Jahre. Jetzt sitzt Gräbe in einem Labor in Berlin, auf dem Kopf eine Haube mit Sensoren, die seine Hirnströme messen. Gräbe soll sich vorstellen, dass sich seine schlaffen Finger krümmen, die jetzt in einem Exoskelett stecken, einer Art motorisierter Rüstung. Mit ihrer Hilfe soll er die Flasche vor sich greifen können. Plötzlich beginnen die Motoren des Exoskeletts zu surren. Seine gelähmten Finger krümmen sich. Gräbe grinst.

Einfach war natürlich nichts auf dem Weg bis hierhin. Weder für ihn – noch für die Wissenschaft. Wie nah ist sie wirklich daran, dank ausgefeilter Technologie Gedanken in Bewegungen umzusetzen? Wie nahe sind sich Mensch und Maschine bereits gekommen? Welche Rolle spielt künstliche Intelligenz dabei? Und welche Rolle könnte die Verbindung von Gehirn und Computer bei der Heilung von Krankheiten spielen?

Es war im Sommer dieses Jahres, als der Tesla-Gründer Elon Musk bei einem wohlinszenierten Auftritt suggerierte: Vieles funktioniert längst. Der Milliardär ist bekannt für seine großen Träume: Elektrische Autos mit Reichweiten wie Benziner. Hochgeschwindigkeitszüge, die mit 1000 Stundenkilometern unterirdisch Städte verbinden. Kolonien auf dem Mars. Nun hatte er sich die Optimierung von Gehirnen vorgenommen, mittels eines Hirnimplantats, das er natürlich schon parat hat: das Neuralink. Dabei geht es ein bisschen auch um Kranke.

Aber Elon Musk hat auch einen Albtraum: Irgendwann könnte eine künstliche Intelligenz (KI) „erwachen“ und die Weltherrschaft übernehmen. Das, so befürchtet der Milliardär, könnte schlimm ausgehen. Ein Diktator würde immerhin irgendwann sterben. Eine künstliche Intelligenz aber könnte ewig leben, so formulierte er es vor zwei Jahren einmal.

Musk ist nicht der Einzige, der solche Befürchtungen hat. Der 2018 verstorbene Star-Physiker Stephen Hawking sorgte sich ebenfalls um den Fortbestand der Menschheit, sollte es schlecht laufen mit den KIs. Ex-Microsoft-Chef Bill Gates sieht Gefahren der KI vor allem in der Kriegsführung, wie er unter anderem 2019 in einem Stanford-Vortrag sagte. Und Amazon-Chef Jeff Bezos glaubt zwar nicht, dass eine KI einmal die Menschheit versklaven könnte. Aber auch er warnte bereits vor autonomen Waffensystemen, die er für „sehr unheimlich“ hält.

Ob künstliche Intelligenz zu einer Bedrohung für die Menschheit erwachsen könnte, darüber diskutieren Experten schon seit Jahren und sind sich darin uneins. Manche warnen vor ihren Gefahren, andere sind der Meinung, dass die Technik noch längst nicht so weit sei, dass man sich Sorgen machen müsse. Wie so oft stieg Elon Musk mit einem sehr konkreten Vorschlag in die Debatte ein: Er will die Technik mit noch mehr Technik bekämpfen und dafür Menschen einen Chip ins Hirn einsetzen. Mit dem Hirnimplantat, so seine Hoffnung, solle der Feind quasi umarmt werden, indem sich Menschen direkt mit einer KI vernetzen. Und nicht nur das – auch untereinander sollen Hirne miteinander verschaltet werden, um so einen „kollektiven Willen“ gegen eine KI zu bilden.

Wie ernst Musk es ist und wie weit er diese Idee schon vorangetrieben hat, machte er bei seinem Auftritt Ende August deutlich. Per Livestream stellte er die neueste Entwicklung seiner Firma Neuralink vor. Die Show begann wie eine der vielen Produktpräsentationen, die der Milliardär schon für seine Firmen Tesla oder SpaceX gehalten hat. Aber diesmal ging es eben nicht um Autos oder Raketen, sondern um ein Implantat, das sich Menschen in ihren Schädel einsetzen lassen sollen. Das Neuralink ist eine Schnittstelle zwischen dem menschlichen Gehirn und einem Rechner, ein sogenanntes Brain-Computer-Interface (BCI). Es besteht aus einem Chip und Elektroden. Über sie misst das münzgroße Gerät die fei-

VERBUNDENE Hirne

Eine der Anwendungen, die Elon Musk mit seinem Neuralink-Implantat herbeisehnt, ist die direkte Hirn-zu-Hirn-Kommunikation. Dass das auch ohne riskante Schädeloperation geht, haben Wissenschaftler um Linxing Jiang Rajesh Rao von der University of Washington in Seattle bereits 2019 demonstriert. Sie vernetzten drei Hirne direkt miteinander. Die drei Probanden trugen EEG-Hauben, zwei von ihnen sendeten Signale, einer empfing sie über eine Magnetspule am Hinterkopf, welche die Signale der Sender direkt an seine visuelle Großhirnrinde schickte. Sie erschienen dem Empfänger als zwei unterschiedliche blitzartige Erscheinungen.

Die Wissenschaftler demonstrierten die Technik am Computerspiel Tetris. Der Empfänger saß vor dem Spielbildschirm, konnte – anders als die beiden Sender – den Bildschirm aber nicht sehen. Er wusste also nicht, ob die herabfallende Figur gedreht werden musste oder nicht, damit sie eine Zeile vervollständigte. Die Anweisung „rotieren“ oder „nicht rotieren“ sandten die Empfänger nur über ihre Gedanken. Die EEG-Haube maß die Hirnströme und sandte den Befehl drahtlos über das Internet an den Kopf des Empfängers. Dort wurde die Magnetspule aktiviert, die ihm den entsprechenden Befehl direkt ins Hirn funkte und als Blitz von ihm vor seinem geistigen Auge gesehen wurde. Der Empfänger entschied, ob er „rotieren“ oder „nicht rotieren“ wollte, und sandte diese Anweisung wiederum per EEG-Haube an den Computer auf dem das Spiel lief. Die Übertragung der Signale gelang im Schnitt mit einer Genauigkeit von 81,25 Prozent.

elektrischen Ströme, mit denen die Nervenzellen untereinander kommunizieren. Die gemessenen Hirnsignale sendet das Neuralink an ein Smartphone oder einen Rechner. Musk präsentierte das Neuralink an einem Schwein – der Chip in seinem Hirn funkte in Echtzeit Signale der Nervenzellen an einen Rechner. Was er nicht zeigte, aber prinzipiell ebenfalls möglich ist, ist die andere Richtung: Über das Neuralink kann man die Nervenzellen von außen elektrisch stimulieren.

Die komplizierte OP, auch das hat Musk schon geplant, soll ein Roboter übernehmen. Ist das „Link“ eingesetzt und sind die Elektroden einige Zentimeter tief in das Hirngewebe eingewebt, klebt der Roboter das Loch im Schädel wieder zu, und man könne noch am gleichen Tag nach Hause gehen. Alles ganz einfach, so klang es zumindest bei Musk. Er präsentierte das Neuralink wie ganz gewöhnliche Unterhaltungselektronik und unterschlug dabei, wie schwerwiegend solch ein Eingriff tatsächlich ist. Allein bei der Operation können Blutgefäße verletzt werden und Hirnblutungen entstehen. Das Implantat kann verrutschen, Entzündungen verursachen. Außerdem kann das Gehirn auf Gewebeschäden mit einer Art Wucherung von Gliazellen reagieren.

Wann und warum sollten Menschen so etwas mit sich machen lassen? Weil sie krank sind, das machte Musk bei seiner Präsentation durchaus klar: Gelähmte, Schlaganfall-Patienten, Blinde, Taube, Parkinson- und Alzheimer-Patienten sollten von dem Hirnimplantat profitieren. Es hörte sich etwas nach einem Pflichtbekenntnis an. Schnell kam Musk in seiner Präsentation jedenfalls bei einem anderen Thema an: Sein Neuralink könnte auch Gesunden angeblich übermenschliche Fähigkeiten verleihen. Gedanken lesen, sie an andere Hirne schicken, Erinnerungen auslagern. Und eben der KI trotzen. Ist das wirklich realistisch?

Einer, der das einschätzen kann, ist John-Dylan Haynes, Professor am Bernstein Center for Computational Neuroscience der Charité Berlin. Seit vielen Jahren schon tut er nämlich genau das, was der kalifornische Milliardär vorhat: Gedanken lesen.

Wenn Haynes so vor einem steht, in Jeans und Hemd, mit seiner eher nüchternen trockenem Art mit einem Zug britischen Humors, dann kann man kaum glauben, dass dieser Mann etwas kann, das an Magie grenzt. Um den Menschen in den Kopf zu schauen, schiebt Haynes sie in den Magnetresonanztomografen. Das MRT, auch einfach Hirnscanner genannt, ist Haynes' wichtigstes Werkzeug. Die zugrundeliegende Physik ist kompliziert – Haynes kann damit sehen, welche Hirnregionen gerade stärker durchblutet werden als andere, also aktiv sind. Und das macht er sich als Hirnschnittstelle zunutze.

Aber das Gedankenlesen ist mühsam. Haynes muss erst einmal das individuelle Gedankenschema eines Menschen lesen lernen – oder besser gesagt, seine KI muss es lernen. „Für jedes Gehirn muss die KI neu angelernt werden“, sagt Haynes. Jeder Kopf tickt anders, „schon allein, weil die Gehirne anatomisch verschieden sind, selbst die von einiigen Zwillingen“. Eine unheimliche Dimension hat künstliche Intelligenz für ihn nicht: „Wir sollten endlich einmal damit aufhören, KIs als übermächtige Superrechner zu betrachten. Seit vielen Jahren schon setzen wir KI-Algorithmen ein.“

Während der Proband im Scanner liegt, zeigt Haynes ihm verschiedene Bilder – eine Katze, einen Baum, einen Fußball – und misst gleichzeitig die gesamte Hirnaktivität. Die KI erkennt in dem Datenwust das spezifische Muster für diesen einen Gedanken. So entsteht eine Art Wörterbuch, das Bilder in Hirnaktivitätsmuster übersetzt. Und umgekehrt: Schiebt Haynes den Probanden wieder in den Scanner und bittet ihn, sich irgendein Bild nur vorzustellen, dann kann er nur anhand des Hirnaktivitätsmusters sagen, was derjenige gedacht hat, mit Trefferquoten von bis zu 100 Prozent.

Die Methode hat jedoch Grenzen: Magnetresonanztomografen sind klobige, mehrere Millionen Euro teure Geräte, in denen Probanden bewegungslos lange liegen müssen. Die Prozedur ist unangenehm. Und das MRT

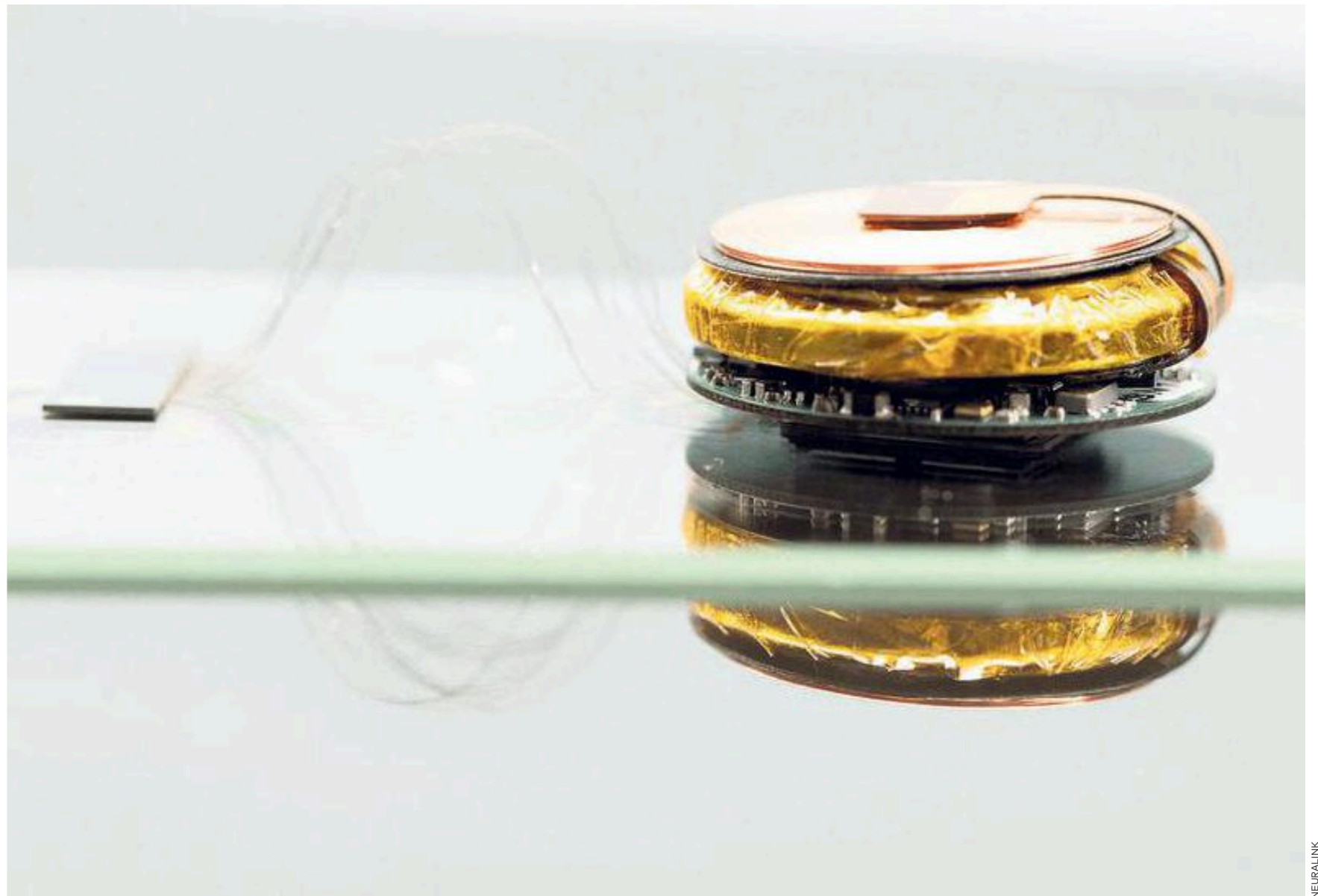


Elon Musk präsentiert das Neuralink-Implantat. Neben ihm steht der Roboter, der es vollautomatisiert in das Gehirn einsetzen soll. Musk will mit dem Implantat Menschen gegen die Bedrohung einer künstlichen Intelligenz aufrüsten

misst auch nicht die Hirnströme direkt, sondern die Durchblutungsänderungen in den feinen Blutgefäßen. „Da gibt es eine Verzögerung von einigen Sekunden“, sagt Haynes. Der Wissenschaftler sieht die Gedanken also erst Momente später. Einen ganzen Denkstrom in Echtzeit zu verfolgen und zu entschlüsseln ist daher nicht möglich, gibt Haynes zu. Dennoch: Um allein so weit zu kommen, hat Haynes 15 Jahre lang geforscht.

Kein Wunder, dass er eher genervt reagiert, wenn man ihn fragt, ob das Neuralink-Implantat nicht auch Gedanken lesen kann, so wie Elon Musk es anpreist. Schließlich funkte es bei der Präsentation doch so eindrucksvoll aus dem Kopf des Schweins in Echtzeit Hirnsignale. Haynes winkt ab. „Nein, das wird nicht funktionieren. Dafür muss man sich die Aktivität des gesamten Gehirns angucken. Ein kleines, lokal platziertes Hirnimplantat kann das niemals leisten.“

Das Gehirn besteht aus 86 Milliarden Nervenzellen. Jede von ihnen kann bis zu 200.000 Verbindungen mit anderen Zellen knüpfen. So entsteht ein hochkomplexes Netzwerk von schätzungsweise rund 100 Billionen solcher Synapsen. Gedanken und Erinnerungen entstehen, wenn viele unterschiedliche Bereiche des Gehirns über diese Verbindungen hinweg gleichzeitig aktiv sind. „Das Neuralink deckt zu wenig Gehirn ab“, sagt Haynes. „Man kommt damit auch nicht in die Tiefe des Gewebes. Man müsste jemandem viele Hirnchips



Das Neuralink-Implantat ist etwa so groß wie eine Münze. Um es einzusetzen, muss ein Loch in den Schädel gebohrt werden. Anschließend werden die etwa 100 hochfeinen Drähte mehrere Zentimeter tief ins Gehirn eingewoben. An ihnen sitzen Elektroden, die die Hirnströme der umgebenden Nervenzellen ableiten und an einen Rechner senden

TELEPATHIE ÜBERS NETZ

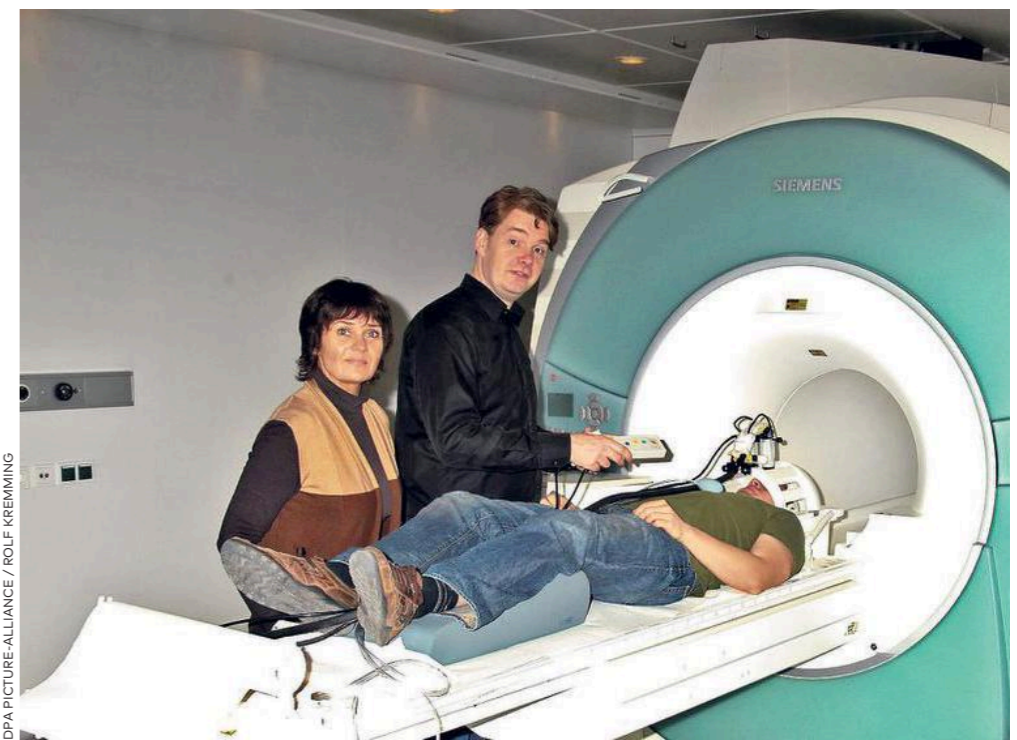
Der britische Kybernetiker und ehemalige Vize-Präsident der Coventry University, Kevin Warwick, bezeichnet sich als den ersten Cyborg (also eine Mischung aus Mensch und Maschine) der Geschichte. Auch er ist überzeugt, dass Menschen sich aufrüsten müssen, um den immer besser werdenden künstlichen Intelligenzen die Stirn zu bieten. Dafür bot sich Warwick selbst früh als Versuchskaninchen an: Im Projekt „Cyborg 1.0“ ließ er sich 1998 einen RFID-Chip in den Unterarm implantieren, über den er drahtlos Lichtschalter und Türen steuerte. 2002 folgte Projekt „Cyborg 2.0“: Warwick bekam ein sogenanntes Utah-Array in sein linkes Handgelenk implantiert – ein Chip mit 100 Elektroden, über die die elektrischen Impulse seines Handnervs direkt gemessen und an einen Rechner übertragen werden können und umgekehrt elektrische Impulse an den Nerv gesendet werden können. Damit war Warwick der erste Mensch, der sein Nervensystem mit einem Rechner verband. Er steuerte so über das Netz einen Roboterarm. Doch das reichte „Captain Cyborg“ noch nicht. Um mit seiner Frau einen „telepathischen“ und „empathischen“ Kontakt herzustellen, ließ sie sich ebenfalls ein Arm-Implantat setzen. Damit konnte sie die Bewegungsimpulse ihres Mannes spüren und dieser ihre.



Sven Gräbe ist durch einen Unfall querschnittsgelähmt und kann seine Hände nicht mehr bewegen. Eine EEG-Haube auf seinem Kopf misst seine Hirnströme, während er sich vorstellt, seine Hand zu schließen. Diese Signale sendet die Haube an einen Rechner, der dann die Motoren in dem Exoskelett an seiner gelähmten Hand aktiviert. Damit soll Gräbe nur per Gedankenkraft wieder Objekte greifen können



Surjo Soekadar von der Charité hat die Hirnschnittstelle für Sven Gräbe entwickelt. Um Gelähmten noch mehr Bewegungsfreiheit zu ermöglichen, arbeitet Soekadar bereits an noch besseren Geräten, die er in den hoch abgeschirmten Räumen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt testet



Der Neurowissenschaftler John-Dylan Haynes kann Gedanken lesen. Dazu schiebt er Menschen in ein MRT und misst ihre Hirnaktivität. Anhand des speziellen Aktivitätsmusters weiß er, was derjenige im Scanner gedacht hat

GEDANKENKRAFT FÜR DROHNEN

Biohacker haben Hirn-Maschine-Schnittstellen längst als interessante Spielweise entdeckt. Als eine der preisgünstigeren Technologien bieten sich EEG-Hauben an, die mit Elektroden am Schädel die feinen Hirnströme messen und die man nach einem Training beeinflussen kann, um damit Maschinen zu steuern. Diverse Headsets für wenige Hundert Euro sind bereits auf dem Markt. Für medizinische Anwendungen sind diese kommerziellen EEG-Headsets nicht leistungsstark genug. Aber um Drohnen zu steuern, reichen sie aus, wie der Hacker Jon Gear eindrucksvoll demonstrierte. Er begann zunächst mit dem NeuroSky-Headset der Firma Mindwave, das nur eine einzige Elektrode nutzt. Damit konnte er die Drohne per Gedankenkraft abheben und sich um ihre eigene Achse drehen lassen. Für komplexere Steuerungen brauchte er aber mehr Elektroden, bei 16 Elektroden konnte er die Drohne schließlich in alle Richtungen steuern.

lang französischen Wissenschaftlern um Alim Louis Benabid von der Universität Grenoble 2019, einem querschnittsgelähmten Patienten ein sogenanntes ECoG ins Gehirn zu implantieren – und ihn damit wieder gehen zu lassen. Dieses Brain-Computer-Interface war eine Mischung aus EEG und invasivem Implantat. Zwar wird der Schädelknochen des Patienten aufgebohrt, doch der Chip wird nur auf die Hirnhaut aufgelegt, die Elektroden ragen nicht wie beim Neuralink ins empfindliche Hirngewebe hinein. Sie messen die Hirnströme an der Oberfläche und funken sie an einen externen Empfänger. Zwei Jahre lang musste der Gelähmte trainieren, schließlich gelang es ihm, eingeschnallt in ein Exoskelett, alle vier Gliedmaßen wieder zu bewegen.

Der Arzt Surjo Soekadar will das Gleiche erreichen, nur auf schonendere Art. Der Leiter der Arbeitsgruppe Klinische Neurotechnologie an der Charité in Berlin bezweifelt genau wie John-Dylan Haynes, dass gesunde Menschen sich jemals ein Implantat ins Gehirn einsetzen lassen werden. „Das ist ein gewichtiger und riskanter Eingriff. Ich wüsste nicht, welche Anwendungen das Neuralink bieten könnte, dass ein Gesunder einen solchen Schritt gehen würde.“

Der jugendlich wirkende Psychiater und Arzt mit indonesisch-tschechischen Wurzeln entwickelt an der Charité ein Brain-Computer-Interface, das EEG nutzt – die Technik, die schon Niels Birbaumer als Schnittstelle für seine gelähmten Patienten verwendete. „Birbaumers Experimente waren seinerzeit eine Sensation und haben mich motiviert, den klinischen Nutzen von Hirn-Computer-Schnittstellen weiter zu untersuchen“, sagt Soekadar.

Heute entwickeln weltweit Tausende Wissenschaftler an Universitäten, Instituten und in Firmen-Forschungsabteilungen Hirnschnittstellen. Bei dem Thema führend in der Forschung sind die USA, Deutschland, Japan und mittlerweile auch China. Zentren der deutschen Forschung an Brain-Computer-Interfaces sind Tübingen, Freiburg und Berlin. In Berlin befindet sich mit NeuroCure der einzige mit Bundesmitteln finanzierte Exzellenzcluster in diesem Bereich. Auch die Privatwirtschaft hat das Thema für sich entdeckt. Neben Elon Musks Firma Neuralink entwickelt Facebook seit dem Jahr 2017 ein Brain-Computer-Interface, mit dem der Nutzer per Gedankenkraft 100 Wörter pro Minute schreiben können soll. 2019 kaufte Mark Zuckerbergs Konzern zudem das Start-up CTRL-Labs und integrierte es in seine Entwicklungsfirma Reality Labs. Und auch das Militär sieht große Potenziale in der Technik: Die amerikanische Forschungsabteilung des Verteidigungsministeriums DARPA hat seit Jahren ein umfangreiches Forschungsprogramm zu Brain-Computer-Interfaces laufen. Es will Soldaten mit Hirnschnittstellen ausstatten und sie damit Cyberwaffen und Drohnen steuern lassen.

Für Menschen, die mit Einschränkungen leben müssen, sind diese Entwicklungen wichtig. Tatsächlich ge-

in unterschiedliche Hirnregionen implantieren. Aber wer würde sich das schon freiwillig antun?“

Auch den Traum vom Erinnerungsauslesen und -speichern hält Haynes für reines Wunschdenken: „Man weiß noch überhaupt nicht, wie das Gehirn Erinnerungen speichert. Vermutlich tut es das in den Mustern der Nervenzellverknüpfungen. Wollte man also Erinnerungen auslesen, müsste man diese Muster anatomisch nachbilden.“

Es ist ganz offensichtlich nicht das erste Mal, dass der Forscher auf solche Träume angesprochen wird. Er sagt das auch ganz explizit. „Seit Jahren nervt mich dieses Overselling amerikanischer Tech-Unternehmen“, sagt Haynes. „Die kommen neu rein in ein Feld, kennen die Grenzen nicht, behaupten aber Großes – ohne die Erwartungen jemals wirklich erfüllt zu haben.“ Der Wissenschaftler räumt allerdings auch ein, dass das Neuralink-Implantat immerhin technisch hochmodern ist. Das Rad neu

erfunden hat Musk mit dem Neuralink jedoch nicht.

Tatsächlich sind insbesondere in den USA in den letzten Jahren eine Menge Neurotech-Start-ups entstanden, die Brain-Computer-Interfaces, also Schnittstellen zwischen dem menschlichen Gehirn und Rechnern, entwickeln oder entwickeln wollen. Das 2016 gegründete Neuralink ist nur eines von vielen, neben Firmen mit wohlklingenden Namen wie Kernel, Dreem, Halo, Neurable, Cognixion oder NextMind, die invasive oder nicht-invasive Hirnschnittstellen entwickeln. Manche legen ihren Fokus auf medizinische Anwendungen, beispielsweise um chronischen Schmerz zu bekämpfen. Viele versprechen aber auch Selbstoptimierung des Gedächtnisses, der Konzentration, des Schlafs. Mit zweifelhaftem Erfolg. Auch eine rege Hackerszene ist entstanden, die kommerziell erhältliche Elektroenzephalografie (EEG)-Hauben

dazu nutzt, um sich kognitiv zu pushen oder um Roboter und Drohnen zu steuern (siehe Kasten).

Für medizinische Anwendungen sind Hirnschnittstellen vielversprechend. Es gibt sie tatsächlich auch bereits seit Jahrzehnten. Mit dem Cochlea-Implantat werden Gehörlosen seit den 1960er-Jahren Elektroden in die Hörschnecke implantiert. Blinden kann mit einem Netzhaut-Chip seit rund zwanzig Jahren wieder zu rudimentärem Sehen verholfen werden. So richtig Fahrt nahm die Forschung und Entwicklung von Hirnschnittstellen dann in den 90er-Jahren auf.

Die einfachste Art der Hirnschnittstellen sind Elektrodendrähte, die mit einem Schrittmacher in der oberen Brust verkabelt sind. Die Elektroden werden tief im Gehirn implantiert und dann gezielt aktiviert. Die elektrischen Impulse verändern die Regelkreise im Gehirn und verbessern die Bewegungsfähigkeit. Wie die tiefe Hirnstimulation genau

wirkt, ist bislang aber noch ungeklärt. „Die Hirnschrittmacher, die wir heute in der klinischen Praxis einsetzen, haben bereits mehr als 100.000 Patienten mit Parkinson geholfen und ihre Lebensqualität deutlich verbessert“, sagt Alireza Gharabaghi, Ärztliche Direktorin des Instituts für Neuromodulation und Neurotechnologie, Universitätsklinikum Tübingen. Auch Depressions- oder Epilepsie-Patienten verschaffen sie Linderung.

Hirnschnittstellen müssen allerdings nicht zwingend direkt ins Gehirn implantiert werden. Eine schonendere Methode ist es, die Hirnströme außen am Schädel zu messen. Diese Technik des Elektroenzephalogramms, kurz EEG, wurde bereits 1920 entwickelt.

Einer der Vorreiter und Antreiber der EEG-Hirnschnittstellen in jüngerer Zeit war der Tübinger Neurowissenschaftler Niels Birbaumer. 1999 zeigte er eindrucksvoll, wie vollständig gelähmte Locked-in-Patienten

ung aus Hartplastik mit beweglichen Gliedern, die von Elektromotoren bewegt werden.

Gräbe hat bereits einen Trainingsdurchlauf gemacht, in dem er sich nur vorstellen sollte, seine rechte Hand zu krümmen. Während er das tat, hat Marius Nann über die Elektroden die Hirnströme Gräbes über dem motorischen Cortex gemessen. „Jedes Gehirn funkelt auf einer anderen Frequenz“, sagt Nann. Aber hat seine Software einmal die richtige für das Signal „Hand schließen“ identifiziert, lässt sich das nutzen, um das Exoskelett zu steuern. „Die elektrische Hirnaktivität ist die gleiche, wenn man die Hand wirklich schließt oder sich nur vorstellt, die Hand zu schließen“, sagt Surjo Soekadar.

Nun soll Sven Gräbe die Probe aufs Exempel machen: Vor ihm auf dem Tisch steht eine volle Plastikflasche. Neben der EEG-Haube hat Gräbe auch noch Elektroden neben seinen Augen kleben. Mit einer schnellen Augenbewegung nach links schaltet er die Exoskelett-Hand an. Dann fixiert er seine rechte Hand. Einen Moment später beginnen die Elektromotoren des Exoskeletts zu sirren. Sie krümmen die gelähmten Finger von Sven Gräbe um die Trinkflasche. Gräbe macht eine erneute schnelle Augenbewegung nach links: Das Exoskelett ist nun fest um die Flasche arretiert wie eine Greifzange. Gräbe hebt seinen nicht gelähmten Arm an und damit die Flasche in dem Exoskelett. Sie fällt nicht herunter. Marius Nann und Surjo Soekadar nicken anerkennend.

Und es ist tatsächlich einfach zu lernen. In einem Selbstversuch gelang es dem Autor dieses Textes nach nur 15 Minuten Training ebenfalls zuverlässig das Hand-Exoskelett zu steuern und die Flasche zu heben – ohne jegliche Muskelkraft.

„Unser Ziel ist es, dass Gelähmte damit künftig bequem und zuverlässig alle möglichen Prothesen steuern können“, sagt Soekadar. Um die Technik noch zu verfeinern, sucht der Arzt jederzeit Freiwillige – „am besten Schlaganfallpatienten, die zwar ihren Arm, aber ihre Finger nicht mehr bewegen können“. Doch obwohl Soekadar nicht-invasive BCIs bevorzugt, sieht er auch die Notwendigkeit, weiterhin implantierbare Geräte wie das Neuralink zu verwenden: „Wir brauchen invasive Technologien, damit wir wissen, nach welchen Signalmustern wir in EEG suchen müssen.“

Von Elon Musks Science-Fiction-Träumen hält er jedoch wenig: „Ich wüsste nicht, welche Anwendungen ein Implantat für einen Gesunden wirklich leisten könnte. Gedanken lesen wird man damit nicht können. Im Internet surfen auch nicht, dafür bräuchte man mindestens noch ein Implantat im sensorischen Cortex, das elektrisch stimuliert. Auch Texte kann man jetzt schon schreiben.“ Und Prothesen steuern? „Das kann man machen. Aber Sie sehen

ja selbst, dafür sind Implantate nicht notwendig.“

Doch Soekadar ist mit der Technologie noch längst nicht zufrieden. „Das EEG ist ungenau, wir wissen nicht, wo die Hirnströme genau entstehen. Zum Beispiel, um Bewegungen einzelner Finger auszulesen.“ Und die Software liegt auch nicht immer richtig: Brain-Computer-Interfaces auf EEG-Basis haben Fehlerraten von rund 20 bis 30 Prozent. Mit Training kann man manches ausgleichen, aber nicht alles. Deswegen arbeitet Surjo Soekadar bereits an der nächsten Generation der BCIs: und zwar auf Basis von Quantensensoren. Er wird dabei vom Europäischen Forschungsrat und der Einstein Stiftung Berlin unterstützt. Genau wie EEG-Elektroden werden die neuartigen Sensoren auf der Schädeloberfläche angebracht und messen kleinste Magnetfelder im Gehirn. In Echtzeit und – das ist ihr großer Vorteil – auch räumlich hoch aufgelöst. „Diese Technologie wird im Bereich der BCI-

FERNGESTEUERTE RATTEN



Könnte ein Mensch mit einem Hirn-Implantat im Kopf ferngesteuert werden – wenn es gehackt wird? Ein Experiment chinesischer Wissenschaftler der Zhejiang University aus dem Jahr 2018 legt das nahe. Sie pflanzten Ratten Elektroden ins Gehirn ein und trainierten die Tiere dann darauf, die elektrischen Reize als Steuerungssignale zu verstehen. Anschließend zogen sich die Wissenschaftler EEG-Hauben über ihre Köpfe und übertrugen ihre Steuerungssignale an die Gehirne der Ratten. So gelang es ihnen, die Tiere durch ein Labyrinth fernzusteuern. Allerdings waren die Ratten trotz des Hirnimplantats nicht völlig willenlose Marionetten. Im Fachmagazin „Scientific Reports“ schreiben die Wissenschaftler: „Anders als Roboter haben die Cyborg-Ratten einen Willen und flexible motorische Fähigkeiten. Das bedeutet, dass sie auch willentlich gesteuerte unerwartete Bewegungen während der Steuerungsperiode vollführen.“

Anwendungen das EEG und das MRT ablösen“, sagt Soekadar.

Mit ihnen kann man ganz genau sagen, welche Nervenzellen wo wann aktiv sind. Diese brandneue, erst 2018 von englischen Physikern für den neurowissenschaftlichen Einsatz vorgestellte Technologie wird in Deutschland schon erprobt, in einem altherwürdigen Gebäude in Berlin-Charlottenburg, wo sich eine der beiden Zweigstellen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) be-

findet. Tief in einer großen Halle, in der im 19. Jahrhundert Arbeitssicherheitstechnik erprobt wurde, steht heute der „weltbeste begehbarer magnetisch abgeschirmter Raum“, wie Tilmann Sander-Thömmes, der an der PTB Biosignale und ihre Verarbeitung erforscht und mit Soekadar zusammenarbeitet, stolz erzählt. Der Raum ist würfelförmig, nur etwa drei mal drei Meter groß, ganz in Weiß gehalten und hinter sieben Lagen speziellen Mu-Metalls verborgen. Wenn man ihn durch die vier Metallschiebetüren betritt, kommt man sich vor wie in

einem James-Bond-Film. In ihn kann kein Magnetfeld eindringen, nicht das der Erde und auch nicht das der in 200 Metern Luftlinie vorbeifahrenden U-Bahn. Der Aufwand ist notwendig: „Die Quantensensoren sind extrem empfindlich“, sagt Soekadar, „jedes noch so kleine Magnetfeld würde die Messung verfälschen“.

Der Arzt steht in dem Raum und blickt sich um. Es ist nicht schwer, seine Gedanken zu lesen, auch ohne Hirnschnittstelle. Im Geiste hat Soekadar Sven Gräbe vor sich, der hier im

März 2021 eine Haube mit empfindlichen Quantensensoren tragen und darüber ein Exoskelett steuern wird. Er wird dann mit Gedankenkraft nicht nur die ganze Hand, sondern jeden einzelnen Finger steuern können. Allerdings wird das Exoskelett mechanische Züge verwenden und keine Elektromotoren, denn die erzeugen auch Magnetfelder.

Es ist nicht unwahrscheinlich, dass man mit Quantensensoren einmal Gedanken und Erinnerungen auslesen und vielleicht sogar übertragen kann.

„Irgendwann könnte es heißen: ‚Ach, das sind Implantatlose‘“

Darf man in Hirne eingreifen, nur weil man es kann? Was bedeutet das – und wer wird irgendwann darüber entscheiden? Ein Gespräch über die ethische Dimension von Hirnoptimierungen

WELT AM SONNTAG: Der Einsatz von Hirnimplantaten wirft viele ethische Fragen auf. Was sind die drängendsten?

THOMAS METZINGER: Zum Beispiel die nach der Verantwortung. Wenn ein Gelähmter mit einem Hirnimplantat einen Roboterarm steuert, also mit Unterstützung einer künstlichen Intelligenz (KI), die seine Hirndaten ausliest und in Steuerbefehle übersetzt – wer ist dann verantwortlich, wenn ein Unfall passiert? Der Gelähmte? Die KI? Die Software-Firma? Ist es möglich, dass ein Hirnimplantat sogar die Impulskontrolle verändert? Und kann sich ein Täter dann entsprechend auf mildernde Umstände berufen? Diese Fragen müssen Juristen lösen. Eine weitere Frage ist natürlich die nach der Verteilungsgerechtigkeit. Ein Hirnimplantat wird sehr teuer sein – welche Patienten bekommen es? Welche Krankenkasse wird es bezahlen?

Wie steht es mit Datenschutz? Müssten wir uns nun auch noch um unsere Hirndaten sorgen?

Allerdings. Da ergeben sich ganz neue Gefahren. Man wird anhand Ihrer Hirndaten einen neurodynamischen Fingerabdruck von Ihnen erstellen können, mit dem Sie nicht nur identifizierbar sind, sondern anhand dessen man auch auf Ihre charakterlichen und persönlichen Eigenschaften schließen kann. Es ist heute schon möglich, nur mit gefilmten Bewegungen eines Menschen einen sogenannten kinematischen Fingerabdruck zu gewinnen. Aus der Art, wie Sie gehen, tanzen, spielen kann man sehen, wer Sie sind. Eine KI kann Sie dann zweifelsfrei identifizieren, und sie ist darin sogar so gut, dass sie auch erkennt, wenn Sie versuchen, sie durch falsche Bewegungen zu täuschen.

Der Tesla-Gründer Elon Musk träumt auch jenseits medizinischer Anwendungen davon, dass Menschen sich per Hirn-Schnittstelle mit einer KI verbinden. Ist das visionär – oder gefährlich?

Natürlich wäre es faszinierend, eine KI mit dem Gehirn zu koppeln und sie einmal das komplexe Aktivitätsmuster des Geistes analysieren zu lassen. Vielleicht findet sie ja die wirklich interessanten Muster, die wir Wissenschaftler bislang übersehen haben. Es wäre aber eben auch möglich, dass eine KI dabei lernt, unser Gehirn zu kontrollieren, dass sie also nicht nur liest, sondern auch schreibt. Auch das muss nicht zwingend negativ sein. Die KI könnte lernen, wie das Gehirn stimulieren muss, um ein gutes Feedback vom Menschen zu bekommen.

Das klingt aber auch gruselig.

Es ist natürlich denkbar, dass die KI meine Autonomie verringert, indem sie mir schöne Gefühle und Bewusstseinszustände zeigt, von denen ich abhängig werde – mir zum Beispiel drogenähnliche Zustände oder Dauer-Organismen beschert. Sie könnte meine Autonomie aber auch steigern, beispielsweise, indem sie Impulse „zähmt“, die meine Selbstbestimmung ja auch verringern. Wenn mir die KI

dabei helfen könnte, nicht jeder Versuchung gleich nachzugeben, die Tafel Schokolade, das Glas Wein, die Zigarette, auf die ich gerade so Lust habe, liegen zu lassen, dann würde sie dazu beitragen, dass ich selbstbestimmter handle. Auch hier stellt sich aber eine ethische Frage: Sehen wir als Gesellschaft einen Wert darin, die Autonomie des Individuums immer weiter zu erhöhen? Falls ja, dann sollten wir überlegen, wie wir diese Technologie dafür verwenden wollen.

Menschen könnten sich mit einem Hirnimplantat auch untereinander direkt vom Hirn zu Hirn verbinden. Würde das nicht eher die Autonomie des Einzelnen schmälern?

Ich glaube, wir sind schon deutlich mehr verbunden, als uns bewusst ist. In Zeiten von Corona und Social Distancing hat man das gespürt. Vor allem in der Stadt ist man ständig an andere Menschen gekoppelt – der Obdachlose, dessen Leid wir fühlen, oder die Jugendlichen, bei denen wir abwägen, ob sie aggressiv sind oder nicht. Ein Hirnlink zu anderen Menschen würde unsere Autonomie meiner Meinung nach

ence-Fiction) vielleicht einmal einen kollektiven Willen geben. Ich selbst möchte allerdings nicht wissen, wie der aussähe – sozusagen eine Symphonie aus Gier, Hass und Verblendung. Und das heißt noch nicht, dass daraus auch ein gemeinsamer politischer Wille folgt. Woran wir bei der rollenden Klimakrise oder dem Welthunger scheitern, ist der Mangel an Mitgefühl – mit den Bewohnern der Länder, die vor allem darunter leiden. Wir sind da kognitiv eingeschränkt, oberhalb einer Gruppengröße von etwa 160 sind wir nicht mehr zu Mitgefühl fähig. Wir können uns auch nur schwer das Leiden von Menschen vorstellen, die noch gar nicht geboren sind und die darunter leiden werden, was wir heute zerstören. Ich habe meine Zweifel, ob das Zusammenschalten unserer beschränkten geistigen Architekturen zu einer Steigerung des Mitgefühls führen wird. Zudem: Eine Hirnlinkung würde die Schleusen dafür öffnen, wie viel Leid es da draußen wirklich gibt, was normalerweise nicht mehr durch unsere Verdrängungsfilter dringt. Ich bin nicht sicher, ob wir diese Informationen überhaupt verdauen könnten.

denn?“ und seine Gedanken würden per Hirnlink an alle zugleich übermittelt. Wenn wir im wirklichen Leben schon nicht wahrhaftig sein wollen, wieso sollte man das technologisch erzwingen?

Es könnte zu einer gedanklichen Massenschlägerei kommen?

(lacht) Ja, genau. Es könnte sogar zu echten Schmerzen führen. Stellen Sie sich vor: 358 Menschen, mit denen Sie verdrahtet sind, imaginieren alle gleichzeitig: „Jens Lubbadeh hat Schmerzen“. Dann könnte es passieren, dass Sie wirklich Schmerzen bekommen.

Das würde Cybermobbing auf eine neue Stufe heben.

Allerdings. Der öffentliche Avatar als Voodoo-Puppe.

Ein Hirnimplantat, so die Hoffnung, könnte unsere geistigen Fähigkeiten verbessern. Könnte es auch unsere moralischen Fähigkeiten steigern? Uns also zu besseren Menschen machen?

Ja, prinzipiell durchaus. Zum Beispiel, wenn es uns gelänge, mit einem Hirnimplantat Bereiche des Gehirns so zu stimulieren, dass wir weniger gierig und destruktiv und stattdessen empathischer und sozialer würden. „Moral Enhancement“ nennt man das. Auch hier stellt sich wieder eine ethische Frage: Wenn wir als Gesellschaft die Ansicht vertreten, moralische Verhalten und Empathie als entscheidende Werte steigern zu wollen, und das durch ein Hirnimplantat oder Ähnliches möglich wäre, sind wir dann auch verpflichtet, diese Möglichkeit in Betracht zu ziehen – selbst wenn das erst einmal mit einem unguuten Gefühl verbunden ist?

Wäre es dann ethisch gerechtfertigt, jemandem ein Implantat zu setzen, um ihn moralisch zu verbessern – auch gegen seinen Willen?

Es setzt voraus, dass man erkennen kann, was das Gute ist. Ich glaube, das können wir nicht. Es stellt sich auch die heikle Frage nach dem Verhältnis von Staat und Bürger: Hat der Staat die Verpflichtung, die Mündigkeit seiner Bürger zu erhöhen? Meine geistige Autonomie ist mein Privatbereich. In einer freien Gesellschaft hat der Staat nicht meine geistige Autonomie zu erhöhen. Aber wenn ich es selbst will – sollte der Staat mir dabei helfen?

Könnte nicht auch ein gesellschaftlicher Zwang zum Implantat entstehen?

Ja. Irgendwann könnte es heißen: „Ach, das sind Implantatlose. Nicht-Optimierte. Der Neuro-Pöbel, die Ungewaschenen, die ihr Gehirn nicht pflegen.“ Das Implantat würde zum Statussymbol. Oder zum Maß des Zivilisationsgrads. Zum ethischen Statement. So wie ich bei einem Veganer weiß: Der redet nicht nur, der ändert tatsächlich sein Leben. Bei einem Implantatträger würde ich vielleicht denken: Der spinnt. Aber er tut etwas, er meint es ernst. Er verändert aktiv seinen Geist.



Mit Gedankenkraft ein Exoskelett zu steuern ist nicht schwer. Im Selbstversuch gelang das bereits nach nur 15 Minuten Training



Thomas Metzinger

Thomas Metzinger ist Philosoph und Ethiker an der Universität Mainz. Seine Spezialgebiete sind Neurotechnologie, virtuelle Realität und künstliche Intelligenz. In seinem Buch „Der Ego-Tunnel“ erklärt Metzinger, dass unser „Selbst“ gar nicht existiere, sondern das bewusst erlebte Ich lediglich von unserem Gehirn erzeugt werde.

nicht maßgeblich senken. Die Gefahr, die ich aber sehe, ist: Bei einem direkten Hirnlink könnten die Schutzmechanismen ausgehebelt werden, die wir im Alltag entwickelt haben, um uns vor unmittelbaren Einflüssen zu schützen. Gedanken eines anderen Menschen, seine Gefühle, sein Leid könnten sozusagen ungefiltert auf uns einprasseln. Wir könnten außerdem Dinge erfahren, die wir nicht wissen wollen, auch über uns selbst. Zum Beispiel, dass wir gar kein Selbst im klassischen Sinn besitzen.

Wenn wir mit dem Implantat Gedanken und Gefühle auf einen anderen Menschen übermitteln könnten – wäre das hilfreich, um komplexe Probleme zu lösen, wie den Klimawandel oder den Welthunger?

Wir sind durch das Internet schon jetzt sehr stark miteinander vernetzt, und es tut uns oft überhaupt nicht gut. Durch eine noch engere Verknüpfung könnte es (das ist übrigens reine Sci-

Ein Anschluss an ein weltweites Hirn-Internet könnte zu einer völligen Überwältigung und zu psychologischer Traumatisierungen führen.

Wenn Politiker sich direkt miteinander verdrahteten, würden Täuschungsmanöver damit nicht wenigstens beendet?

Das ist eine sehr interessante Frage. Vielleicht würde auch die Korruption einfacher. In Primatengesellschaften spielt Täuschung eine wichtige Rolle. Die Neurotechnologie könnte das vielleicht durchbrechen, könnte als Lügendetektor fungieren. Vor Wahlen könnten wir Politiker befragen. Jedes Mal, wenn sie die Unwahrheit sagen, würde eine rote Warnlampe angehen. Es stellt sich immer die prinzipielle Frage: Welche geistigen Fähigkeiten haben wir wirklich, wenn wir solch ein neues Kommunikationsmedium nutzen? Stichwort Impulskontrolle: Angenommen, einer der Politiker denkt über den anderen „Wie blöd ist der