



03.10.2019

Brain-Machine-Interfaces – Gehirn und Maschine verknüpft

++ SPERRFRIST: Freitag, 04.10.2019, 00:30 Uhr MESZ ++

Anlass

Es klingt wie Zukunftsmusik: Roboter und Computer mit Gedanken steuern zu können. Die Vision von Brain-Machine-Interfaces (BMI) ist mittlerweile jedoch nicht mehr nur Stoff für Science-Fiction-Romane. Immer mehr wissenschaftliche Publikationen beschreiben solche Geräte – mit unterschiedlichen Komplexitätsgraden und Einsatzmöglichkeiten.

Erst in dieser Woche stellen französische Wissenschaftler im Fachjournal „The Lancet Neurology“ [30] einen querschnittsgelähmten Patienten vor, der seit zwei Jahren zwei kabellose Geräte zur Aufzeichnung seiner Hirnströme auf seinem Gehirn implantiert hat. Er kann nach viel Training in einem Exoskelett eingeschnallt alle vier Gliedmaßen bewegen – die Arme in jeweils vier Richtungen und die Beine für ein paar wacklige Schritte. Für den Patienten hat das kaum Vorteile, doch für die BMI-Forschung ist das ein Fortschritt **(SPERRFRIST für die obigen Informationen: 04.10.2019, 00:30 Uhr MESZ)**.

Auch außerhalb der Universitätskliniken und der Forschung ist das Thema Brain-Machine-Interfaces en vogue: Der Gründer Elon Musk baut seit drei Jahren mit einem Millionenbudget seine Firma Neuralink auf – aus einem internationalen Team von Neurowissenschaftlern, KI-Experten, Elektroingenieuren und Materialforschern – und will so seinen eigenen Visionen ein Stück näher zu kommen. Er will den Menschen auf eine Stufe mit Künstlicher Intelligenz stellen und das menschliche Gehirn mit Software-Updates verbessern. Experten schätzen den wissenschaftlichen Fortschritt jedoch als nicht sehr groß ein. Auch Mark Zuckerberg will bei Facebook ein implantierbares Gerät entwickeln, mit dem der Mensch seine Mitteilungen fünfmal schneller als geschrieben direkt ins Smartphone hineindenken kann.

Fakt ist: Bislang werden BMI nur vereinzelt und zu Forschungszwecken eingesetzt. Bis sie alltagstauglich sind, wird es noch einige Zeit brauchen. Doch was ist der aktuelle wissenschaftliche Stand? In welchen Feldern wird der Einsatz dieser Geräte derzeit untersucht? Was hat es mit Neuralink auf sich? Und wie weit sind Konkurrenz-Projekte? Dieses Fact Sheet soll Antworten auf diese Fragen geben.



Übersicht

Was sind Brain-Machine-Interfaces?.....	2
Anwendung und Forschungsstand	3
Herausforderungen	5
Neuralink – Visionen mit BMI von Gründer Elon Musk	7
Weitere Forschung zu BMI – Unternehmen, Behörden, Universitäten.....	9
Regulation und Ethik.....	11
Literaturstellen, die zitiert wurden.....	12

Was sind Brain-Machine-Interfaces?

- ▶ **Brain-Machine-Interfaces** (BMI, engl. für Gehirn-Maschine-Schnittstelle), oder auch **Brain-Computer-Interfaces** (BCI), ermöglichen die Kommunikation zwischen dem Gehirn und einer angeschlossenen Apparatur beziehungsweise einem Computer [1].
- ▶ Verbindung wird über das periphere oder das zentrale Nervensystem (Gehirn und Rückenmarksnerven) hergestellt [2].
- ▶ basieren auf der Annahme, dass bereits die reine gedankliche Vorstellung eines intendierten Verhaltens, wie dem Heben eines Arms, Veränderungen in der Hirnaktivität auslöst. BMI messen diese Veränderungen und wandeln sie in Steuersignale um, beispielsweise in digitale Befehle an einen Roboterarm [2].
- ▶ Lernprozess: Gehirn und Computer müssen lernen, miteinander zu arbeiten.
 - Das Computer-Programm muss sich auf die Muster des Gehirns einstellen, um diese für die Steuerung nutzen zu können. Dies geschieht meistens mithilfe von Künstlicher Intelligenz und Machine-Learning-Algorithmen [3]. Es muss lernen, welche Signale von welchen Neuronen für die bestimmte Bewegung wirklich wichtig sind. Durch Fortschritte in der KI-Branche, werden auch die BMI besser.
 - Der Patient muss lernen, seine Hirnaktivität zu kontrollieren und zu fokussieren [3].
 - Beispiel Neurofeedback-Training: Hirnaktivität soll gezielt geistig kontrolliert werden. Patienten müssen sich eine Bewegung vorstellen und darauf konzentrieren. Auf diese Weise erzeugen sie eine höhere Aktivität in den dazugehörigen motorischen Arealen des Gehirns. Gleichzeitig hören die Patienten ihre auf- und absteigende Hirnfrequenz als an- und abschwellenden Ton. Wenn sie ihre Hirnfrequenz in der richtigen Weise steuern, werden sie vom Computer durch positives Feedback belohnt.
- ▶ **Zwei BMI-Typen [2]:**
 - **unidirektionales BMI** – das System besteht aus drei Komponenten: Geräten zur Aufzeichnung neuronaler Signale, Komponenten zur Analyse der Signale und Geräten zur Bereitstellung der Befehle zur Bedienung einer Maschine.
 - **Beispiel für ein unidirektionales BMI:** die Vorstellung die Hand zu bewegen, führt zur Aktivierung der dazugehörigen Region des motorischen Kortex. Ein BMI zeichnet diese Veränderungen in der Hirnaktivität auf, verwandelt die Signale mittels Algorithmen in Computerbefehle und die künstliche Hand bewegt sich.
 - **bidirektionales BMI** – es kommen zwei weitere Komponenten hinzu, die Rückmeldungen der Maschine an das Gehirn senden. Das Feedback wird entweder physiologisch (Stimulation bestimmter Hirnregionen für eine entsprechende Empfindung) oder über eine aktive Rückmeldung an den Patienten gegeben.



- **Beispiel für ein bidirektionales BMI:** die Vorstellung die Hand zu bewegen, führt zur Aktivierung der dazugehörigen Region des motorischen Kortex. Ein BMI zeichnet diese Veränderungen in der Hirnaktivität auf, verwandelt die Signale in Computerbefehle und die künstliche Hand bewegt sich. Der Computer meldet seine Bewegungen in Form von Signalen zurück an das menschliche Gehirn, indem das BMI an einer entsprechenden Stelle des Gehirns durch Stimulation einen Wahrnehmungsreiz erzeugt, beispielsweise ein Gefühl dafür, wie stark sich die Hand geschlossen hat.
- ▶ **Feedback:** Feedback ist notwendig, um mit der Umgebung interagieren zu können [4].
 - angestrebt wird in der Forschung ein BMI, das es dem Patienten ermöglicht, das Ausgangsverhalten der Prothese direkt zu steuern und gleichzeitig relevante sensorische Informationen vom Gerät zu empfangen (bidirektional)
 - Dafür ist eine Wiederherstellung der natürlichen Kontroll-Feedback-Schleife nötig, in der das Nervensystem Informationen über elektrische Signale oder Aktionspotenziale im ganzen Körper zurück ans Gehirn gibt. Diese Signale sind die Grundlage für kontrollierte Muskelkontraktionen und Input/Feedback von Sinnesorganen (z.B. Textur, Temperatur, Position)
 - Noch gibt es nicht viele bidirektionale BMI; unidirektionale sind vorherrschend. Bei diesen bekommen Patienten lediglich Rückmeldungen über ihre eigenen Sinnesorgane und nicht vom BMI selbst. Sie sehen beispielsweise, dass sich die Roboterhand bewegt, aber spüren es nicht.
- ▶ Die Anwendung der BMI ist derzeit noch sehr eingeschränkt. Allgemein haben jedoch alle Entwicklungen das gleiche Ziel: eine robuste, klinisch tragfähige Kommunikation mit dem Nervensystem herzustellen [2].
- ▶ Marktentwicklung:
 - Laut Schätzung wird sich die Entwicklung des Marktes für BMI bis 2020 auf etwa 1,46 bis 1,72 Mrd. Dollar erhöhen, mit einer jährlichen Wachstumsrate von 11,5 Prozent zwischen 2014 und 2020 [6, 7]
 - Das größte Wachstum wird dabei im Bereich der nicht-invasiven BMI durch Entwicklungen in der Gaming Industrie und im Gesundheitssektor prognostiziert [5].
- ▶ **Weitere Recherchequellen:**
- ▶ Wissenschaftliche Publikation zum tieferen Einstieg: [Review – Implantable Neural Probes for Brain-Machine Interfaces](#)
- ▶ Wissenschaftliches Paper zum Prinzip von BMI und State-of-the-Art der Forschung: [A New Frontier: The Convergence of Nanotechnology, Brain Machine Interfaces, and Artificial Intelligence](#)
- ▶ Wissenschaftliches Paper und Neuigkeiten auf dem Forschungsfeld: [Brain-machine-interface – Latest Research and Reviews](#)
- ▶ Erklärendes Video zum Prinzip der BMI: [Arte – Wie funktioniert ein Brain-Computer-Interface?](#)

Anwendung und Forschungsstand [1, 2]

▶ Welche Arten gibt es?

- ▶ **Kriterien:** BMI werden, wie Neuroimaging-Methoden, anhand von drei Kriterien verglichen:
 - **Skalierung:** Wie viele Neurone können gleichzeitig erfasst werden? Je mehr Neuronen erfasst und/oder stimuliert werden, umso genauer kann das BMI arbeiten.
 - **Auflösung:** Wie genau ist das Gerät? Unterscheidung zwischen räumlicher (Wie genau geben die Aufnahmen an, welche Neuronen feuern?) und zeitlicher (Wie genau geben die Aufnahmen an, wann die Neurone aktiv sind?) Auflösung.



- **Invasivität:** basiert die Anwendung auf einer Operation (ins Hirn implantierte Neurone), und wie stark ist der Eingriff, oder ist das BMI nicht-invasiv (Hirnströme von außen messen)?
- ▶ Bisherige BMI konzentrieren sich vor allem auf die Lösung eines der drei Kriterien.
- ▶ **Nicht-invasive BMI:**
 - Nicht-invasive BMI detektieren entweder elektrische Signale oder hämodynamische Aktivität (spiegelt die Durchblutung eines Hirnareals wieder).
 - Arten: funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRI) und functional Near Infrared Spectroscopy (fNIRS) messen die Durchblutung und die Elektroenzephalographie (EEG) elektrische Signale
 - Nicht-invasive BMI messen die Hirnaktivität nicht nur sehr unspezifisch (die Aktivität einzelner Neuronen kann nicht gemessen werden), sondern auch sehr ungenau (die Informationen müssen erst durch die einzelnen Schichten des Gehirns und den Schädel dringen).
- ▶ **Invasive BMI:**
 - Kommunikation zwischen Nervenzellen im Gehirn erfolgt über elektrische und chemische Signale
 - invasive BMI verwenden sie als Informationsquelle
 - Aktivität einzelner Neuronen am besten geeignet, möglichst genaue Informationen zu gewinnen
 - ins Gehirn implantierte Elektroden erfassen beispielsweise extrazelluläre Aktivität der Nervenzellen oder lokale Feldpotenziale
 - dafür müssen die Geräte möglichst nah an die entsprechenden Hirnareale gelangen; momentan nur durch eine invasive Operation möglich
 - Typischerweise werden Ein-Draht-Elektroden und Glas-Mikropipetten-Elektroden in elektrophysiologischen Studien verwendet, die ins Gehirn circa auf die Höhe der sogenannten Pyramidenzellen eingeführt werden
 - Konventionelle neurale Sonden – also die Einheiten, die neuronale Aktivität aufzeichnen – sind dabei beispielsweise die Tetrode, das Utah-Array, die Michigan-Sonde; sie werden ins Gehirn eingeführt
 - Invasiv eingesetzt (Schädel-OP) wird auch die Elektrokortikographie (ECoG)-Sonde, sie wird jedoch auf die harte Hirnhaut aufgelegt, nicht ins Gehirn eingeführt.
 - Neue Entwicklungen zielen darauf, die Invasivität zu verringern – beispielsweise mit feineren Elektroden und kleineren Operationen, langlebigeren Materialien und Sonden, die weitere Signale neben elektrischen detektieren können (beispielsweise optische) – siehe auch Kapitel Herausforderungen und Forschungsprojekte.
- ▶ **Anwendung – Wo werden BMI bisher eingesetzt?**
- ▶ **Neuroprothesen:** Häufigste Anwendung; als Verbindung zwischen motorischen Kortex und Computer.
 - Motorischer Kortex/ Motorkortex – Hirnregion, die willkürliche Bewegungen steuert: ist gut erforscht, sehr übersichtlich und erzeugt Output
 - Prinzip: Motorkortex funktioniert beispielsweise bei Patienten mit Querschnittslähmung oder Schlaganfall meist normal. Multi-Elektrodenanordnung wird in dieses Hirnareal des Patienten implantiert. Bewegungssignale werden abgeleitet, an Computer übermittelt und in Steuersignale umgewandelt
 - Video zum Einsatz von BMI als Neuroprothese (Nature Video) – [Paralysed woman moves robot with her mind](#)
 - Bei der Eröffnungsfeier der Weltmeisterschaft 2014 schaffte ein querschnittsgelähmter Jugendlicher im durch ein BMI gesteuertes Exoskelett den Startschuss (Video: [Walk Again Project reports first clinical results](#)) [8, 9].
 - Review über klinische und neurowissenschaftliche Anwendungen von BMI mit Schwerpunkt auf motorischen BMI: [Brain-Machine Interfaces: Powerful Tools for Clinical Treatment and Neuroscientific Investigations](#)



- Wissenschaftliche Publikation zu Neuroprothesen der Arme: [Advanced upper limb prosthetic devices: implications for upper limb prosthetic rehabilitation](#)
- ▶ **Sensorische BMI: Cochlea- und Retina-Implantat ermöglichen künstliches Sehen oder Hören.**
 - Prinzip: kommunizieren nicht direkt mit Gehirn, sondern dienen als Verbindung zwischen Ohr/Auge und Gehirn. Dabei übernehmen sie die Stimulation der Nerven an den Sinnesorganen.
 - Wissenschaftliche Publikation zur Anwendung als Cochlea-Implantat: [On the Horizon: Cochlear Implant Technology](#)
- ▶ **Tiefe Hirnstimulation:**
 - Prinzip: Elektrodendrähte, die mit einem Schrittmacher in der oberen Brust verkabelt sind, werden in das Gehirn implantiert. Die Elektroden werden dann gezielt aktiviert.
 - Anwendung vor allem bei neurologischen und psychiatrischen Krankheiten: Parkinson, Epilepsie, Zwangsstörungen (Obsessive Compulsive Disease, OCD), Depression
 - Wissenschaftliche Publikationen zum [Einsatz bei Parkinson](#)
 - Wissenschaftliche Publikation zum [Einsatz bei Depressionen](#)

Herausforderungen [1, 2, 3, 10]

- ▶ **Invasivität:** Derzeit ist noch eine Schädelöffnung notwendig. Die Implantation an sich ist nicht schmerzhaft, da das Gehirn keine sensorischen Neurone besitzt. Auch die beschädigten Blutgefäße sind meist so klein, dass der Eingriff keine kognitiven Einschränkungen oder Infarkte verursacht.
- ▶ **Ort der Platzierung des Geräts:** Platzierung der Elektroden und des Empfangsgerät abhängig davon, welche Informationen gemessen werden sollen und können.
- ▶ **Bewegung:** Das Gehirn ist nicht fest verankert im Schädel/statisch. Schon kleinste Verschiebungen der Elektroden durch Bewegung können zu Verletzungen, Entzündungen oder Narbenbildung durch statische Elektroden führen. Diese biologischen Reaktionen führen zu einer schlechteren Signalqualität und sind ein Risiko, das zu einer Entfernung der Elektroden führen kann.
- ▶ **Biokompatibilität:** Elektroden dürfen die Funktion des gesunden Gewebes lediglich minimal stören. Dies gilt nicht nur für ihre physikalischen Eigenschaften – zum Beispiel Materialzusammensetzung und Steifigkeit –, sondern auch für ihre Funktionsweise, beispielsweise können zu hohe Signalstärken unterliegendes Gewebe schädigen.
- ▶ **Lebensdauer der Materialien [11]:** Implantate müssen lange Zeiträume unbeschadet überstehen. Beispielsweise beträgt die gesamte Lebensdauer von Silizium-basierten Elektroden etwa fünf Jahre, doch nicht alle Komponenten können in diesem Zeitraum unbeschadet arbeiten. Das heißt, wenn das Gerät 100 Elektroden besitzt, halten manche davon fünf Jahre. Andere fallen jedoch schon früher aus, wodurch die Qualität der Kommunikation nach und nach abnimmt.
 - Wissenschaftliche Publikation zur langfristigen Verwendung von Elektroenzephalographie (EEG) im häuslichen Umfeld eines Patienten: [Long-term independent BCI use – case report](#)
 - Wissenschaftliche Publikationen zur langfristigen Implantation von Mikroelektroden bei Affen: [Seven years of recording from monkey cortex with a chronically implanted multiple microelectrode](#)
 - [Review zu Faktoren](#), die die Langlebigkeit von BMI beeinflussen
- ▶ **Hohe Auflösung/Selektivität:** Je präziser die Aktivität einer Zelle stimuliert oder erfasst wird, umso präziser kann das BMI arbeiten.
- ▶ **Qualität der Kommunikation:** Auch ist die Qualität der Kommunikation bislang abhängig vom Design des BMI. Beispielsweise haben bisherige Geräte basierend auf EEG-Signalen eine sehr eingeschränkte Qualität,



da sie über die Kopfhaut gemessen werden. Besser sind auf das Hirn aufgelagerte Elektrokortikographie-Geräte (ECoG), das Signal muss nicht durch den Schädel; noch besser sind ins Hirn implantierte Elektroden

- ▶ **Komplexität/Bandbreite:** Das menschliche Gehirn weist eine enorme Komplexität auf. Derzeit können BMI von den insgesamt 80 Milliarden Neuronen im Gehirn, die einen Durchmesser von 100.000 mal größer als der eines Atoms haben, maximal 500 Neurone mit 100 Elektroden gleichzeitig ableiten
 - Bisherige Anwendung beim Menschen: 2012 wurde der Patientin Cathy Hutchinson, die aufgrund eines Schlaganfalls querschnittsgelähmt ist, ein 4x4 Millimeter große Elektrodenanordnung (100 Elektroden) in den motorischen Kortex (Gebiet für Armsteuerung) eingesetzt. Nach intensivem Training konnte sie eine Flasche nehmen und an den Mund führen. In einer aktuellen Studie [30] steuert ein Hoch-Querschnittsgelähmter alle vier Gliedmaßen eines Exoskeletts mit seinen Gedanken mittels eingebrachtem ECoG-Gerät mit 64 Elektroden.
 - **Langsamer Fortschritt:** Die Stevensons Gesetzmäßigkeit beschreibt, wie schnell es möglich sein wird, die Aktivität weiterer Neurone zu erfassen: die Anzahl verdoppelt sich etwa alle sieben Jahre. Demzufolge würde es etwa bis Ende des Jahrhunderts dauern bis wir eine Million Neuronen aufnehmen könnten [12].
- ▶ **Datenfluss/Kommunikation:** Neuronen kommunizieren mittels Ionen, Computer mittels Elektronen – die Übersetzung bremst den Datenfluss.
- ▶ **Organisation des Gehirns:** Es gibt nicht nur Unterschiede zwischen Menschen, sondern auch das Gehirn eines jeden einzelnen entwickelt sich ständig weiter.
- ▶ **Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI):** Um elektrische Hirnströme abzuleiten und Muster in den Signalen festzustellen wird KI eingesetzt. Durch Algorithmen kann ein BMI sich an die individuellen Merkmale des Patienten anpassen. In einer Kalibrierperiode werden Signale erfasst anhand derer sich die Algorithmen auf den Benutzer anpassen [2]. Normalerweise muss sehr häufig neu kalibriert werden, damit die Funktionen präzise ausgeführt werden; in einer neuen Studie [30] musste für sieben Wochen nicht neu kalibriert werden – ein Novum.
- ▶ **Tierversuche:** Versuche an Nagetieren und Affen sind nötig, um BMI zu entwickeln – beispielsweise, um zu erforschen, wie neurale Netzwerke miteinander kommunizieren. Die Ergebnisse sind wegen unterschiedlicher Organisation der Gehirne nicht direkt übertragbar, außerdem gibt es verstärkt ethische Diskussionen über das Tierwohl [13].
- ▶ **Weitere Herausforderungen:**
 - Signalverstärkung: Da die Elektroden die Signale der Neuronen nicht immer optimal erfassen, muss ein BMI in der Lage sein, undeutliche Signale durch Signalverstärkung zu erfassen und wichtige Signale zu filtern, dafür wird künstliche Intelligenz eingesetzt.
 - Datenkompression: Während der Datenaufzeichnung des BMI können je nach Ableitungsmethode große Datenmengen entstehen. Diese erfordern viel Speicherplatz und lange Übertragungszeiten. Dieses Problem könnte durch eine Kompression der Daten gelöst werden.
- ▶ **Weitere Recherchequellen:**
 - Wissenschaftliche Publikation zu Herausforderungen und Lösungen klinischer Anwendungen mit Schwerpunkt auf Zuverlässigkeit der Hardware, Entwicklung von Dekodierungsalgorithmen und Invasivität: [Engineering challenges: Current challenges to the clinical translation of brain machine interface technology](#)
 - Wissenschaftliche Übersichtsarbeit zum Einsatz von Künstlicher Intelligenz in der Nanotechnologie: [Artificial intelligence in nanotechnology](#)



Neuralink – Visionen mit BMI von Gründer Elon Musk

► Das Unternehmen

- Start-up im Bereich der Neurotechnologie, <https://www.neuralink.com/>
- Gründung: Juli 2016, Sitz: San Francisco, Kalifornien, USA
- Leitung: **Elon Musk**; CEO/Gründer, seine Position als CEO unterscheidet Neuralink von seinen anderen Unternehmen und stellt es auf eine Stufe mit SpaceX und Tesla.
- **Team [13]:**
 - Paul Merolla: forscht an gehirnähnlichen Transistorschaltungen, zuvor leitender Chipdesigner bei IBM (SyNAPSE-Programm), Entwicklung eines Chips beim US-Verteidigungsministerium, der einen Teil der Großhirnrinde widerspiegeln soll (True-North Chip)
 - Vanessa Tolosa: forscht an biokompatiblen Materialien, Mikrofabrikationsexpertin
 - Max Hodak: Entwicklung BMI-Technologie, zuvor Duke University, Gründer eines „Robotik-Cloud-Labor für Life Sciences“
 - Dongjin Seo: forscht an „neural dust“ = ultrasound Sensoren zur Aufzeichnung der Gehirnaktivität, zuvor UC Berkeley
 - Tim Hanson: Ingenieur, Kenntnisse über Materialwissenschaften und Mikrofertigungsmethoden
 - Philip Sabes: forscht an der Kontrolle des Gehirns über Bewegungen, ehemals University of California
 - Timothy Gardner: zuvor Boston University, Implantation BMI bei Vögeln, erforscht wie komplexe Lieder aus elementaren neuronalen Einheiten zusammengesetzt werden
- **Neuralink Launch Event** (16.07.2019), Elon Musk stellt seine Visionen mit dem Unternehmen vor: <https://www.youtube.com/watch?v=r-vbh3t7WVI&feature=youtu.be>
- **Preprint-Paper:** einen Tag nach dem Presse-Event veröffentlichte Musk ein **nicht wissenschaftlich begutachtetes Papier (Preprint)** mit Details zum Fortschritt [18].
- **Weitere Recherchequellen:**
 - Twitter Neuralink: <https://twitter.com/neuralink>
 - Twitter Elon Musk: <https://twitter.com/elonmusk>
 - Übersicht seiner Aussagen seit 2017 (Stand März 2018): [Elon Musk Talks On Neuralink: Artificial Intelligence Future of Superhuman Cyborgs?](#)

► Was will Elon Musk erreichen?

- Schnittstelle schaffen, die das menschliche Gehirn mit Künstlicher Intelligenz verbindet. Die Vernetzung soll in Echtzeit geschehen und dabei als Erweiterung des Neokortex fungieren. Beispielsweise anstatt etwas in eine Suchmaschine einzutippen, würde es reichen, an etwas zu denken, um die entsprechenden Infos direkt ins Gehirn gesendet zu bekommen [13].
- Ziel ist es auch, unterschiedliche Erkrankungen des Gehirns und des zentralen Nervensystems durch neurale Implantate zu behandeln, wie zum Beispiel Parkinson [14].
- Laut Musk soll der Mensch so mit den Entwicklungen im Bereich der Künstlichen Intelligenz mithalten. Langfristiges Ziel ist es, die menschliche Intelligenz durch technische Erweiterungen zu optimieren und ein System zur Gedankensteuerung zu entwickeln.



► Das Projekt

- Das Konzept sieht die invasive Implantation eines Chips vor, von dem aus bis zu 96 „Fäden“ in das Gehirn führen. Die Stränge (mit einer Größe von $(23 \times 18.5 \times 2)$ Kubikmillimeter) erfassen mit jeweils 32 Elektroden elektrische Signale.
- Der Chip soll diese einlesen, bereinigen, verstärken und schließlich an eine hinter dem Ohr getragene Steuereinheit weitergeben. Letzteres funktioniert derzeit nur verkabelt über einen USB-C-Port, eine drahtlose Kommunikation soll entwickelt werden. Über einen Empfänger und entsprechende Software können die Signale aus dem Hirn in Steuerkommandos übersetzt werden.
- Eine andere Möglichkeit ist die Entwicklung von „Neural Dust“ (engl. für neuronalen Staub): winzige, 100 Mikrometer Silizium-Sensoren werden in die Hirnrinde „gestreut“ und per Ultraschall überwacht. [13; 15].

► Entwicklung [13, 16]:

- Bisher kaum Aussagen, dass an Tiermodellen getestet wird, dies ist jedoch sehr wahrscheinlich. Gründung eines eigenen Labors mit Erlaubnis, an Labortieren zu testen im April 2017.
- **Kooperation mit University of California:** Im Juni 2017 bestätigt ein Pressesprecher der University of California, dass Neuralink als wissenschaftlicher Sponsor der Universität eintritt.
- **Konditionen der Zusammenarbeit und Fokus der Forschung:** Laut der Vereinbarung zwischen Neuralink und der University of California vom 21.09.2017 zahlt das Unternehmen 796.006 Dollar für die Forschung am UC Davis's National Primate Center, einem von sieben Forschungszentren in den USA, die mit Primaten forschen dürfen.
- **Eine Übersicht über die aktuellen Entwicklungen bietet der folgende Artikel:** [Elon Musk's Neuralink sought to open an animal testing facility in San Francisco](#)
- Laut Elon Musk soll es voraussichtlich bereits 2020 erste Versuche an Menschen geben.

► Warum soll Neuralink besser sein als andere Projekte? Welche Kritik gibt es?

- Konzept: Elon Musk stellte mit seinem Projekt **kein absolut neues Konzept** vor. Die Idee, eine Mensch-Maschine-Schnittstelle zu entwickeln, die Querschnittsgelähmten ermöglicht einen Computercursor oder Roboterarm zu bewegen, ist nicht neu. Auch andere Forschungsgruppen forschen ebenfalls bereits am Einsatz solcher Geräte beim Menschen [17]. Laut Experten sind das Prinzip und **die verwendeten Komponenten nicht neu** und werden schon von anderen Forschungsgruppen weltweit entwickelt und bei Patienten mit Rückenmarksverletzungen eingesetzt.
- Allgemeines Prinzip: Laut Experten kann das Auslösen von ‚Spikes‘ einzelner oder von Gruppen von Neuronen, auch wenn diese von mehreren Tausend Orten kommen, keine Aussagen machen über Gedanken eines Gehirns. Patienten müssen große physische und psychische Anstrengung aufbringen, um ein solches Gerät zu bedienen. Bei einem nicht geringen Anteil der Patienten, bei denen so etwas versucht wurde, funktioniert es überhaupt nicht.
- Stand der Forschung: Laut der Präsentation und dem Preprint-Paper [18] ist das **Gerät von Neuralink dabei auf dem neuesten Stand der Forschung**. Das bestätigen unabhängige Experten in einer SMC-Aussendung (auf Anfrage verfügbar) und sehen kleine technische Neuerungen (siehe unten).
- Elektroden: Musk beschreibt laut den Experten **lediglich eine Reihe technischer Verbesserungen**, welche potenziell die Funktionalität von BMIs verbessern könnten, zum Beispiel: neue, sehr dünne Ableitelektroden, die Möglichkeit von einigen Tausend (statt von einigen Hundert) Elektroden ableiten zu können (was nicht unbedingt besser sein muss) und den OP-Roboter zur Implantation. Wie er sie verbessern möchte, bleibt offen.
- Zeitraum: Nicht nur schein der Zeitraum der geplanten Entwicklung als sehr knapp, sondern **aus wissenschaftlicher Sicht auch unrealistisch**.



- ▶ Lösungsansätze: Es wurden keine Lösungen Herausforderungen für BMI (siehe eigenes Kapitel) vorgestellt.
- ▶ Implantation im Gehirn: Neuralink hat das Ziel, ein Gerät zu entwickeln, das komplett in das Gehirn implantiert wird. Dies ist ein Fortschritt verglichen mit aktuellen Geräten, die durch ihren Aufbau noch zu komplex sind, um im täglichen Leben brauchbar zu sein. Derzeit ist jedoch noch unklar, wie genau Neuralink dieses Ziel umsetzen möchte.
- ▶ Entwicklung eines hoch-effizienten Prozessors: Die Entwicklung eines Computerchips, der Informationen durch das Signal-Rauschen wahrnimmt und in digitale Signale umwandelt, gehört zu den größten Schwierigkeiten der Entwicklung.
- ▶ Langlebigkeit: Da Hirnimplantate langlebige Batterien benötigen, muss das Problem der Energiezufuhr gelöst werden. Neuralink hat dazu bisher noch keine Ergebnisse präsentiert.
- ▶ Elektroden: Dünne flexible Polymerdrähte sollen durch die Schädeldecke in das Gehirn eingeführt werden [18]. Die flexiblen Elektroden ähneln Technologien, die anderswo entwickelt werden. Ob eine Erhöhung der Anzahl von Elektroden die Fähigkeit der Steuerung wesentlich verbessern kann, ist unklar und wird von Forschern im Feld angezweifelt.
- ▶ Maschinelle Implantation: Die Entwicklung eines „Sewing Robots“ (Engl. Für Näh-Roboter), der die feinen Elektrodenfäden selbstständig in das Gehirn einführt und dabei beispielsweise Schäden an Blutgefäßen vermeidet, wird in dem Preprint-Paper vorgestellt, ist aber ebenfalls keine neue Idee. Laut DARPA wurde ein solcher Roboter bereits von ihnen entwickelt, was er kann, ist aber unklar [19].
- ▶ Daten: Bisher hat Neuralink keine Auskunft darüber gegeben, welche Daten gemessen werden sollen beziehungsweise Daten aktueller Arbeiten präsentiert. Möglich ist, dass das Unternehmen Daten, die aus Tierversuchen gesammelt wurden, für eine zukünftige Präsentation zurückhält.
- ▶ **Zusammengefasst: Elon Musk hat die notwendigen zukünftigen Entwicklungen für BMI erkannt, aber selbst noch keine richtig gewinnbringenden Lösungen präsentiert.**
- ▶ Kritik von Experten, die das SMC zur Neuralink angefragt hat, sind auf Anfrage erhältlich.

Weitere Forschung zu BMI – Unternehmen, Behörden, Universitäten

▶ **Verteidigungsministerium der USA – Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) [20]**

- ▶ Das Projekt des Verteidigungsministeriums der USA sieht die Entwicklung verschiedener BMI vor. Der Fokus liegt dabei auf der Wiederherstellung verlorener Fähigkeiten bei Veteranen, wie beispielsweise die Therapie von Posttraumatischen Störungen (PTSD), die Entwicklung von Neuroprothesen [[Revolutionizing Prosthetics](#)] oder die Anwendung bei sensorischen Störungen ([NESD-Program](#)) sowie auch der Verbesserung von Fähigkeiten aktiver Soldaten.
- ▶ Sechs Arbeitsgruppen arbeiten an der Entwicklung hochauflösender, bidirektionaler BMI. Diese tragbaren BMI sollen verschiedene nationale „Sicherheitsvorkehrungen“ ermöglichen, wie zum Beispiel die Steuerung von Cyberabwehrsysteme und unbemannter Luftfahrzeuge oder Multitasking-Funktionen bei komplexen Missionen.
- ▶ Zusammenarbeit mit Battelle Memorial Institute, Carnegie Mellon University, Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Palo Alto Research Center (PARC), Rice University, und Teledyne Scientific.
- ▶ Technik: Um die Invasivität zu minimieren, werden akustische Signale, elektromagnetische Wellen, Nanotechnologie, Infrarotstrahlung und genetische Veränderungen von Neuronen untersucht [21].



fact sheet

- ▶ Das vierjährige **Next-Generation Nonsurgical Neurotechnology (N3) Programm** der DARPA konzentriert sich auf zwei Hauptaspekte: nicht-invasive und „winzige“ invasive neuronale Schnittstellen zu ermöglichen.
- ▶ Eine Beschreibung des Programms und der Arbeitsgruppen ist hier zu finden: [Six Paths to the Nonsurgical Future of Brain-Machine Interfaces](#)

▶ **EU-Projekt – BNCI Horizon 2020 – aktive Implantate**

- ▶ BNCI Horizon 2020 ist ein Projekt finanziert durch die Europäische Kommission mit dem Ziel die Zusammenarbeit und Kommunikation zwischen verschiedenen Interessensgruppen (Forschungsgruppen, Unternehmen, Endnutzern, politischen Entscheidungsträgern und der Öffentlichkeit) im Bereich BMIs zu fördern. EU finanziert verschiedene Projekte im Rahmen des Horizon 2020 Programms [22].
- ▶ Übersicht europäischer Forschungsgruppen: <http://bnci-horizon-2020.eu/community/research-groups>
- ▶ Europäische Projekte - Future and Emerging Technologies-Open (FET-Open) Projekt ByAxon:
 - arbeitet an Implantat, das Signalübertragung im verletzten Rückenmark wiederherstellen soll [23]
 - entwickelt neue Generation von Sensoren und Elektroden für neuronale Schnittstelle [24]
 - Ziel ist es, durch Kombination von Magnetfeldern, die durch die Aktivität der Neuronen erzeugt werden, ein Gerät zu bauen, dass durch funktionelle Elektroden sowohl Informationen ableitet, als auch bestimmte Gehirnbereiche stimulieren kann (bidirektionales BMI).

▶ **Forschung an Universitäten in Deutschland, Österreich und der Schweiz:**

- ▶ **Universität Graz – Graz Brain-Computer Interface:** Entwicklung von EEG-basierten BMI und Beteiligung an verschiedenen EU-Projekten: <http://bci.tugraz.at/>
- ▶ **Universität Lausanne - G-Lab Upcourtine:** Entwicklung von Neuroprothesen, robotischen Schnittstellen und Verfahren zur Neurorehabilitation; Forschung an Primaten und Patienten mit dem Fokus auf neurologischen Erkrankungen, v.a. Querschnittslähmungen: <https://www.epfl.ch/labs/courtine-lab/>
- ▶ **Charité Berlin/ TU Berlin – Berlin Brain-Computer Interface:** arbeiten daran, die Erkennung und Dekodierung von Hirnsignalen anhand von EEG zu verbessern: <http://bbci.de/>
- ▶ **Universität Tübingen – Tübinger Brain-Computer Interface:** Erforschen den klinischen Einsatz der BMI und mögliche Anwendungsgebiete: <https://web.archive.org/web/20131102174612/http://www.mp.uni-tuebingen.de/mp/index.php?id=137>
- ▶ **Universität Freiburg – Brain Machine Interface Initiative:** Entwicklung von biomedizinischer Mikrotechnologie und Erforschung der Dekodierung des Gehirns: <http://www.bmi.uni-freiburg.de/>
- ▶ **Universität Würzburg – DECODER Project – BCI and Detection of Consciousness:** Europäisches Verbundprojekt, das zur Entwicklung von BMI zur Bewusstseinerkennung bei nicht reaktiven Patienten: <http://www.i1.psychologie.uni-wuerzburg.de/int/projekte/decoder/>
- ▶ Weitere internationale Forschungsgruppen: <http://bnci-horizon-2020.eu/community/research-groups>

▶ **Forschung anderer Unternehmen zu BMI**

- ▶ Facebook – Mark Zuckerberg:
 - Ziel: **Ursprüngliche Idee** war die Entwicklung eines **nicht-invasiven Systems** im Bereich der Sprachkommunikation. Mittels Gedanken sollen 100 Wörter in der Minute geschrieben werden [25].
 - Die damalige Leiterin, Regina Dugan, erklärt in einem **Vortrag auf einer Entwicklerkonferenz 2017** das Forschungsprojekt **Keynote at Facebook 2017**:



- Die ersten Pläne veröffentlicht 2017 sahen eine Kombination aus fNIRS (functional near infrared spectroscopy) und Künstlicher Intelligenz vor [26].
- In Zusammenarbeit mit Forschern der University California, San Francisco (UCSF) veröffentlichte Facebook im Juli 2019 ein Update [27].
- In der aktuellen Veröffentlichung wurde ein **invasives Implantat** vorgestellt. Probanden hörten sich Multiple-Choice-Fragen an und sprachen die Antworten laut aus. Eine Elektrodenanordnung registrierte die Aktivität in Teilen des Gehirns, die mit dem Verstehen und Produzieren von Sprache verbunden ist, und suchte nach Mustern, die mit bestimmten Wörtern und Phrasen in Echtzeit übereinstimmten [28].
- Wissenschaftliche Publikation zum Facebook Projekt in Zusammenarbeit mit UCSF: [Real-time decoding of question-and-answer speech dialogue using human cortical activity](#)
- ▶ Kernel – Bryan Johnson: Das Unternehmen möchte sich zunächst [auf medizinische Anwendungen konzentrieren](#), Website: <https://kernel.co/>
- ▶ Open Water – Mary Louise Jepsen: Das Unternehmen möchte BMI anhand von Magnetresonanztomographie (MRT) entwickeln [29].
 - Website: <https://www.openwater.cc/about-us>
 - In einem Ted Talk erklärt Jepsen, welche Pläne sie hat: https://www.youtube.com/watch?v=BP_b4yzxp80
- ▶ Weitere Unternehmen: <https://www.cbinsights.com/research/neurotech-startups-to-watch/>

Regulation und Ethik

▶ Regulation und Vorschriften

- ▶ [Erklärung der FDA](#) zur präklinischen und klinischen Entwicklung innovativer Produkte, wie BMI, die Patienten mit Lähmungen oder Amputation helfen können, Mobilität zu erlangen
- ▶ [Leitlinienentwurf der FDA](#) für klinische Tests und Gestaltung klinischer Studien mit implantierten BMI-Geräten
- ▶ Publikation der Europäischen Union zu ethischen Aspekten von BMI-Implantaten: European Group on Ethics in Science and New Technologies (European Commission) - [Opinion on the ethical aspects of ICT implants in the human body](#)

▶ Ethische Fragen und Meinungen

- ▶ **Deutscher Ethikrat – Vorträge der Jahrestagung 2009: Der steuerbare Mensch? Über Einblicke und Eingriffe in unser Gehirn**
- ▶ **Interview mit der damaligen Vorsitzenden des deutschen Ethikrats Christiane Woopen** (seit 2017 Vorsitzende des Europäischen Ethikrats – European Group on Ethics in Science and Technologies)
- ▶ **Wissenschaftliche Publikationen zum Thema Ethik:**
 - Brain-computer interfaces: military, neurosurgical, and ethical perspective: <https://thejns.org/focus/view/journals/neurosurg-focus/28/5/2010.2.focus1027.xml>
 - Ethics in published brain–computer interface research: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-2552/aa8e05/meta>
 - Ethical aspects of brain computer interfaces: a scoping review: <https://bmcmethics.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12910-017-0220-y>



Literaturstellen, die zitiert wurden

- [1] Choi JR (2018). [Implantable Neural Probes for Brain-Machine Interfaces—Current Developments and Future Prospects](#). *Experimental neurobiology*, 27, 453-471. DOI: 10.5607/en.2018.27.6.453.
- [2] Adewole DO (2016). [The evolution of neuroprosthetic interfaces](#). *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 44, 1-2. DOI: 10.1615/CritRevBiomedEng.2016017198.
- [3] Silva G A (2018). [A New Frontier: The Convergence of Nanotechnology, Brain Machine Interfaces, and Artificial Intelligence](#). *Frontiers in neuroscience*, 12, 843. doi:10.3389/fnins.2018.00843.
- [4] McFarland DJ (2018). [Brain–computer interface use is a skill that user and system acquire together](#). *PLoS Biol* 16. DOI: 10.1371/journal.pbio.2006719.
- [5] Brunner C (2015). [BNCI Horizon 2020: towards a roadmap for the BCI community](#). *BCI Journal*. DOI:10.1080/2326263X.2015.1008956.
- [6] Allied Market Research, [Brain-Computer-Interface Market](#).
- [7] Grand View Research, Industry Analysis – [Brain-Computer-Interfaces Market](#). Report ID: 978-1-68038-459-8.
- [8] Duke University, Duke immersive Virtual Environment – [Walk Again Project](#).
- [9] Siwssnex Brasil – The Walk Again Project: <https://www.swissnexbrazil.org/news/the-walk-again-project-epfl/>
- [10] The Verge (2018): [Why it’s so hard to develop the right material for brain implants](#).
- [11] Harris JP (2013). [Biological, mechanical, and technological considerations affecting the longevity of intracortical electrode recordings](#). *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 41. DOI: 10.1615/CritRevBiomedEng.2014010788.
- [12] Stevenson IH (2011). [How advances in neural recording affect data analysis](#). *Nature neuroscience*, 14, 139.
- [13] Wait But Why: [Neuralink and the Brain’s Magical Future \(2017\)](#).
- [14] Gizmodo: [Elon Musks Neuralink sought to open an animal testing facility in San Fransisco \(2018\)](#).
- [15] Seo D (2013). [Neural dust: An ultrasonic, low power solution for chronic brain-machine interfaces](#). arXiv preprint arXiv:1307.2196.
- [16] [Neuralink - UC Davis Primate Center - Services Agreement \(2017\)](#).
- [17] [BNCI Horizon 2020: Research Groups](#).
- [18] Musk E & Neuralink (2019): [An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels](#). DOI: 10.1101/703801. Preprint-Publikation auf dem Server bioRxiv.
- [19] Twitter: [DARPA Status \(2019\)](#).
- [20] Miranda RA (2015). [DARPA-funded efforts in the development of novel brain–computer interface technologies](#). *Journal of neuroscience methods*, 244, 52-67. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2014.07.019.
- [21] DARPA: [Towards a High-Resolution, Implantable Neural Interface \(2017\)](#).
- [22] [BNCI Horizon 2020: Project \(2015\)](#).
- [23] Horizon 2020 - [EU-funded project works on a prototype of an active implant that will restore the transmission of signals in the injured spinal cord \(2018\)](#).
- [24] ByAxon – Project: <http://www.byaxon-project.eu/?jjj=1569441086198>
- [25] Gizmodo: [Here Are the First Hints of How Facebook Plans to Read Your Thoughts \(2017\)](#).
- [26] The Verge: [Facebook is working on a way to let you type with your brain \(2017\)](#).
- [27] Tech@facebook: [Imagining a new interface: Hands-free communication without saying a word \(2017\)](#).
- [28] Moses DA (2019). [Real-time decoding of question-and-answer speech dialogue using human cortical activity](#). *Nature communications*, 10, 3096. DOI: rg/10.1038/s41467-019-10994.
- [29] Medium: [For a Brain-Computer Interface that Actually Works, Are Holograms Our Only Hope? \(2017\)](#).
- [30] Benabid AL et al. (2019): [An exoskeleton controlled by an epidural wireless brain–machine interface in a tetraplegic patient: a proof-of-concept demonstration](#). *The Lancet Neurology*. DOI: 10.1016/S1474-4422(19)30321-7.



Autorin

Laura Knops

Freie Mitarbeiterin für Medizin und Lebenswissenschaften

Ansprechpartnerin in der Redaktion

Marleen Halbach

Redakteurin für Medizin und Lebenswissenschaften

Telefon +49 221 8888 25-0

E-Mail redaktion@sciencemediacenter.de

Disclaimer

Dieses Fact Sheet wird herausgegeben vom Science Media Center Germany. Es bietet Hintergrundinformationen zu wissenschaftlichen Themen, die in den Schlagzeilen deutschsprachiger Medien sind, und soll Journalisten als Recherchehilfe dienen.

SMC-Fact Sheets verstehen sich nicht als letztes Wort zu einem Thema, sondern als eine Zusammenfassung des aktuell verfügbaren Wissens und als ein Hinweis auf Quellen und weiterführende Informationen.

Sie haben Fragen zu diesem Fact Sheet (z. B. nach Primärquellen für einzelne Informationen) oder wünschen Informationen zu anderen Angeboten des Science Media Center Germany? Dann schicken Sie uns gerne eine E-Mail an redaktion@sciencemediacenter.de oder rufen Sie uns an unter +49 221 8888 25-0.

Impressum

Die Science Media Center Germany gGmbH (SMC) liefert Journalisten schnellen Zugang zu Stellungnahmen und Bewertungen von Experten aus der Wissenschaft – vor allem dann, wenn neuartige, ambivalente oder umstrittene Erkenntnisse aus der Wissenschaft Schlagzeilen machen oder wissenschaftliches Wissen helfen kann, aktuelle Ereignisse einzuordnen. Die Gründung geht auf eine Initiative der Wissenschafts-Pressekonferenz e.V. zurück und wurde möglich durch eine Förderzusage der Klaus Tschira Stiftung gGmbH.

Nähere Informationen: www.sciencemediacenter.de

Diensteanbieter im Sinne RStV/TMG

Science Media Center Germany gGmbH
Schloss-Wolfsbrunnenweg 33
69118 Heidelberg
Amtsgericht Mannheim
HRB 335493

Redaktionssitz

Science Media Center Germany gGmbH
Rosenstr. 42–44
50678 Köln

Vertretungsberechtigte Geschäftsführer

Beate Spiegel, Volker Stollorz

Verantwortlich für das redaktionelle Angebot (Webmaster) im Sinne des §55 Abs.2 RStV

Volker Stollorz

