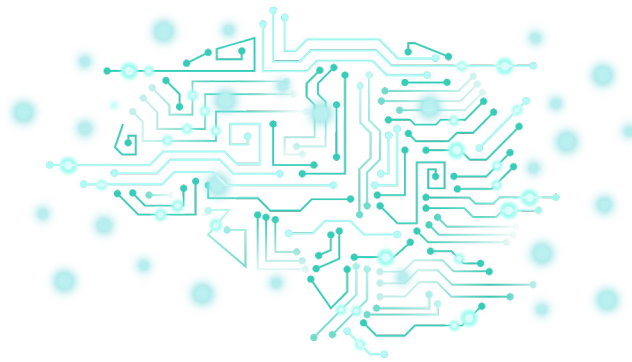


# Künstliche Intelligenz und Neurotechnologie



Hochschule der Medien Stuttgart  
Aktuelle Themen | Prof. Dr. Koch | WS 20/21

Maria Sesterheim (Matrikel-Nr.: 39257)  
Vanessa Dragojevic (Matrikel-Nr.: 39208)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Künstliche Intelligenz und Neurotechnologie</b>	<b>2</b>
<b>Künstliche Intelligenz</b>	<b>3</b>
Was ist Künstliche Intelligenz?	3
<b>Neurotechnologie</b>	<b>4</b>
Was ist Neurotechnologie?	4
Anwendungsgebiete von Neurotechnologien	4
<b>Mensch gegen Maschine</b>	<b>6</b>
Wie lernen Menschen?	7
Wie lernen Maschinen?	9
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>12</b>
<b>Künstliche Intelligenz und Brain-Machine-Interfaces</b>	<b>13</b>
<b>Einleitung</b>	<b>14</b>
<b>Geschichte der Brain-Machine-Interfaces</b>	<b>15</b>
Wie funktioniert ein BMI?	17
<b>Künstliche Intelligenz und BMI</b>	<b>18</b>
<b>Aktuelle Herausforderungen</b>	<b>19</b>
Technik	19
Ethik und NeuraLink	20
<b>Fazit</b>	<b>21</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>22</b>

Wissenschaftliche Arbeit im Master-Studiengang Audiovisuelle Medien

# **Künstliche Intelligenz und Neurotechnologie**

**Vanessa Dragojevic**

an der Hochschule der Medien Stuttgart

am 14. März 2021

# Künstliche Intelligenz

## Was ist Künstliche Intelligenz?

Künstliche Intelligenz (KI) ist ein Teilgebiet der Informatik, welches sich mit der Automatisierung intelligenten Verhaltens und dem maschinellen Lernen befasst und beschreibt die Fähigkeit einer Maschine, Aufgaben und Aktivitäten auszuführen, die normalerweise von Menschen ausgeführt werden.

Eine KI sammelt und organisiert, bzw. wird vielmehr mit einer großen Menge von Daten „gefüttert“, um daraus nützliche Erkenntnisse zu gewinnen.

Oftmals beschreibt der Begriff künstliche Intelligenz auch den Versuch, bestimmte Entscheidungsstrukturen des Menschen nachzubilden, indem z. B. ein Computer so gebaut und programmiert wird, dass er relativ eigenständig bestimmte Probleme bearbeiten kann. Oftmals wird damit aber auch eine nachgeahmte Intelligenz bezeichnet, wobei durch meist einfache Algorithmen ein „intelligentes Verhalten“ simuliert werden soll.

Charakteristische Eigenschaften für eine KI sind Autonomie und Adaptivität.

KI-Systeme besitzen also die Fähigkeit, Aufgaben in komplexen Umgebungen auszuführen, ohne konstante Anleitung eines Menschen. Außerdem sind sie fähig ihre Leistung selbstständig zu verbessern, indem sie aus ihren Erfahrungen lernen.

Generell wird bei den Systemen zwischen schwacher und starker KI unterschieden:

- Unter schwacher KI versteht man Maschinen, die eine einzelne, menschliche kognitive Fähigkeit ersetzen können. Systeme mit schwacher KI erfüllen eine bestimmte Aufgabe und verhalten sich dabei intelligent.
- Eine starke KI wäre eine Maschine, die im Ganzen dieselben Fähigkeiten wie ein Mensch besitzt oder die menschlichen Fähigkeiten sogar übersteigt. Das System mit starker KI könnte so jede intellektuelle Aufgabe erfüllen. Es wäre intelligent (im Vergleich zu der schwachen KI, die sich lediglich intelligent verhält) und würde über ein Bewusstsein verfügen.

Die bis heute vorhandenen KI-Lösungen fallen alle in die Kategorie “schwache KI”. Starke KI-Systeme gibt es lediglich im Bereich der Science-Fiction.<sup>1</sup>

## Neurotechnologie

Was ist Neurotechnologie?

Neurotechnologie ist ein spezieller Zweig der Technologie und umfasst alle Geräte, die Signale vom menschlichen Gehirn lesen. Diese Geräte werden basierend auf den gelesenen Signalen aktiv.

Neurotechnologie ist jede Technologie, die einen grundlegenden Einfluss darauf hat, wie Menschen das Gehirn und verschiedene Aspekte des Bewusstseins, Denkens und Aktivitäten im Gehirn verstehen. Darin inbegriffen sind auch Technologien, die die Gehirnfunktion verbessern und reparieren sollen und es Forschern ermöglichen, das Gehirn zu visualisieren. Neurotechnologie hat erhebliche Auswirkungen auf die Gesellschaft, obwohl ihre Präsenz so alltäglich ist, dass viele ihre Allgegenwärtigkeit nicht erkennen.

Gegenwärtig kann die moderne Wissenschaft nahezu alle Aspekte des Gehirns abbilden und einen gewissen Grad der Funktion des Gehirns steuern. Therapeutisch kann dies dabei helfen, die motorische Koordination von Schlaganfall Opfern zu verbessern, die Gehirnfunktion zu verbessern, epileptische Episoden zu reduzieren und Patienten mit degenerativen motorischen Erkrankungen, wie zum Beispiel Parkinson, Huntington und ALS zu verbessern. Fortschritte auf diesem Gebiet versprechen viele neue Verbesserungen und Rehabilitationsmethoden für Patienten mit neurologischen Problemen. Es bietet auch die Möglichkeit, die Mechanismen aufzudecken, durch die Geist und Bewusstsein aus dem Gehirn hervorgehen.<sup>2</sup>

### Anwendungsgebiete von Neurotechnologien

Heutzutage findet Neurotechnologie vor allem im medizinischen Bereich Anwendung, wie zum Beispiel:

---

<sup>1</sup> Wikipedia. „Künstliche Intelligenz“. Enzyklopädie, 11. März 2021. [https://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%BCnstliche\\_Intelligenz](https://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%BCnstliche_Intelligenz). Abgerufen am 12.03.2021

<sup>2</sup> Wikipedia. „Neurotechnology“. Enzyklopädie, 11. Januar 2021. <https://en.wikipedia.org/wiki/Neurotechnology>. Abgerufen am 12.03.2021

## LIVE IMAGING

Zur Abbildung von Gehirnströmen beim Live Imaging kommen spezielle Geräte zum Einsatz, welche die Gehirnaktivität durch Aufzeichnung von Magnetfeldern, die durch natürliche Ströme im Gehirn erzeugt werden, messen. In diese Kategorie fallen Geräte wie MRT und CT.<sup>3</sup>

## ZELLTHERAPIE

Im Rahmen der Zelltherapie haben Forscher begonnen, die Verwendung von Stammzellen im Gehirn zu untersuchen. Eine große Anzahl von Studien wird durchgeführt, um festzustellen, ob diese Therapieform in großem Maßstab angewendet werden kann. In Experimenten wurden zum Beispiel Stammzellen im Gehirn von älteren Menschen mit degenerativen Erkrankungen erfolgreich eingesetzt, um das Gehirn zu veranlassen, neue Zellen zu produzieren und mehr Verbindungen zwischen Neuronen herzustellen.<sup>4</sup>

## IMPLANTAT TECHNOLOGIEN

Implantat Technologien, auch Brain-Computer-Interfaces genannt, sind alle Geräte, die zur Überwachung oder Regulierung der Gehirnaktivität verwendet werden. Zum Beispiel können Menschen mit Amyotropher Lateralsklerose, was eine nicht heilbare degenerative Erkrankung des motorischen Nervensystems ist welche beispielsweise auch der bekannte Physiker Stephen Hawking hatte - solche Geräte nutzen, um zu kommunizieren. Diese Maschinen lesen die Hirnaktivität und sprechen für die Person mit der sie verbunden sind.<sup>5</sup>

## INTELLIGENTE PROTHESEN

Ein anderes Beispiel sind intelligente Prothesen. Diese können die Lebensqualität von Menschen mit beispielsweise Amputierten Gliedern enorm erhöhen. Die Geräte lesen die Signale im Gehirn und bewegen sich so, wie andere Körperteile. Visionen von Elon Musk beschreiben beispielsweise auch die direkte Verbindung des menschlichen Gehirns mit dem Internet mithilfe eines Gehirchips. Dies kann auch

---

<sup>3</sup> Shih, Krusienski, und Wolpaw, „Brain-Computer Interfaces in Medicine“.

<sup>4</sup> „Neurotechnology“.

<sup>5</sup> „Neurotechnology“.

dafür eingesetzt werden, um Krankheiten wie Alzheimer zu behandeln, und um das menschliche Gehirn mit Künstlicher Intelligenz zu erweitern.<sup>6</sup>

## PHARMAZEUTIKA

Pharmazeutika bzw. Arzneimittel spielen eine wichtige Rolle bei der Aufrechterhaltung einer stabilen Gehirnchemie und sind die am häufigsten verwendete Neurotechnologie in der Öffentlichkeit und in der Medizin. Während Arzneimittel in der Regel nicht erwähnt werden und ein eigenes Fachgebiet haben, ist die Rolle von Arzneimitteln in der modernen Gesellschaft möglicherweise die weitreichendste und am weitesten verbreitete.<sup>7</sup>

## Mensch gegen Maschine

Nach Wolfgang Wahlster, Informatiker und CEO des Deutschen Forschungszentrums für KI, muss man die menschliche Intelligenz in vier verschiedene Bereiche unterteilen: die kognitive Intelligenz, die sensomotorische Intelligenz, die emotionale Intelligenz und die soziale Intelligenz.<sup>8</sup>

## KOGNITIVE INTELLIGENZ

Bei der kognitiven Intelligenz handelt es sich um das Aufnehmen und Erlernen von Wissen sowie das Kombinieren und das Schlussfolgern aus diesem Wissen. Das entspricht oft dem, was Menschen sich in einer akademischen Ausbildung aneignen. Bei der kognitiven Intelligenz sind Kognitive Systeme dem Menschen schon in vielen Bereichen überlegen. Zu diesem Bereich gehört das Schachspiel, das Spiel von Go und sonstige Brettspiele.<sup>9</sup>

## SENSOMOTORISCHE INTELLIGENZ

Sensomotorik bezeichnet das Zusammenspiel von sensorischen und motorischen Leistungen. Damit ist die Steuerung und Kontrolle der Bewegungen von Lebewesen im Zusammenspiel mit Sinnesrückmeldungen gemeint. Bei dieser Intelligenz ist der

---

<sup>6</sup> „Neurotechnology“.

<sup>7</sup> „Neurotechnology“.

<sup>8</sup> „Künstliche Intelligenz“.

<sup>9</sup> „Künstliche Intelligenz“.

Mensch der Maschine noch überlegen, allerdings sind manche Maschinen in Bereichen einzelner Sensoren überlegen.

Beispielsweise ist das menschliche Auge grundsätzlich sehr gut ausgebildet. Aber eine geeignete Videokamera kann etwa auch Licht im Infrarotbereich und UV-Bereich verarbeiten, was ein Mensch nicht kann. Oder: In der Akustik können Mikrofone wesentlich geringere Lautstärken oder in Frequenzbereichen aufnehmen als das menschliche Ohr.

Jedoch kann ein Mensch diese Sinneseindrücke kombinieren, auch Sensorfusion genannt, was eine Maschine bislang nur wenig kann. Dies könnte sich jedoch innerhalb weniger Jahre ändern.<sup>10</sup>

## EMOTIONALE INTELLIGENZ

Wie der Name bereits verrät, dreht es sich hierbei um Emotionen. Der Mensch kann sich in einen anderen Menschen hineinfühlen, Sympathie und Empathie, Mitgefühl, Mitleid, Trauer, Angst und Freude empfinden, Liebesgedichte schreiben, Zornausbrüche haben und vieles mehr.

Auf diesem Gebiet leistet die Maschine bislang fast nichts. Was Maschinen heute allerdings schon in Ansätzen können, ist die sogenannte Sentiment-Analyse. Das bedeutet, dass Maschinen durch die Beobachtung der menschlichen Körpersprache, also der Gestik, Mimik usw. dazu in der Lage sind, die Emotionen eines Menschen zu lesen.<sup>11</sup>

## SOZIALE INTELLIGENZ

Soziale Intelligenz ist die Fähigkeit, in einer menschlichen Gruppe angemessen zu (re-)agieren, wie etwa eine Stimmung zu erkennen oder diese konstruktiv zu beeinflussen. Auf diesem Gebiet kann die Maschine bislang nichts leisten.<sup>12</sup>

## Wie lernen Menschen?

Alle Bewegungsabläufe, egal wie einfach oder schwierig, müssen wir erst einmal lernen.

---

<sup>10</sup> „Künstliche Intelligenz“.

<sup>11</sup> „Künstliche Intelligenz“.

<sup>12</sup> „Künstliche Intelligenz“.



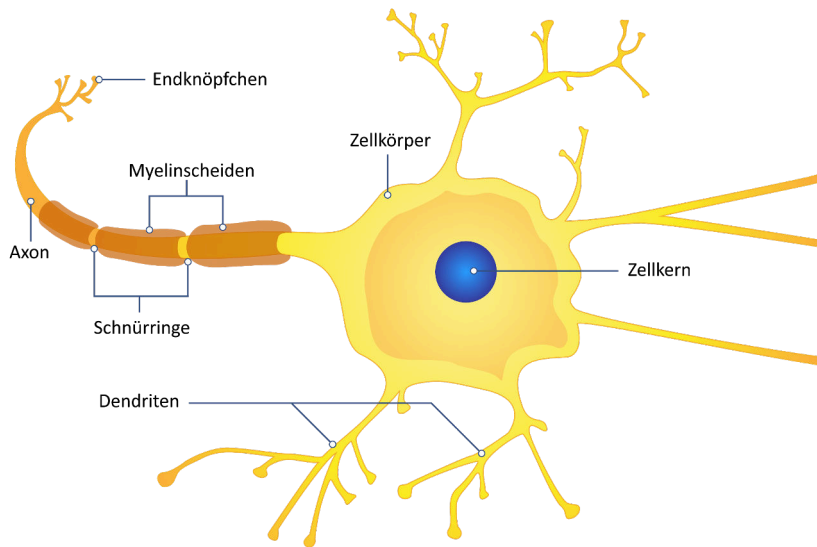
Im durchschnittlichen Menschlichen Gehirn gibt es über 100 Milliarden sogenannter Nervenzellen, auch Neurone genannt, die bioelektrische Signale aussenden und abertausende Verbindungsmöglichkeiten zu anderen Neuronen haben und miteinander kommunizieren. Die sogenannte synaptische Plastizität beschreibt dabei als Grundlage von Lernen und Gedächtnis nicht nur das Übertragen von elektrischen Signalen von einer Nervenzelle zur nächsten, sondern auch die Intensität dieser Signale durch Verstärkung oder Abschwächung. Was genau passiert also an den Nervenzellen, wenn wir etwas lernen? Dafür muss man sich zuerst anschauen, wie ein Neuron aufgebaut ist und was beim Übertragen der bioelektrischen Signale genau geschieht.<sup>13</sup>

Ein Neuron besteht aus einem Zellkörper und meist vielen Fortsetzen, welche auch als Dendriten bezeichnet werden. Zudem besitzen sie auch einen längeren Fortsatz, das sogenannte Axon. Die Dendriten nehmen elektrische Reize auf und leiten sie zunächst zum Zellkörper, von welchem aus sie über das Axon zu anderen Nervenzellen weitergeleitet werden. Die Übertragung von einer Zelle zur nächsten erfolgt an den Synapsen, an welchen der elektrische Impuls schließlich in einen chemischen übersetzt wird. Dadurch strömen Kalzium Ionen in die Präsynapse hinein und Vesikel, die aussehen wie kleine Bläschen, setzen Botenstoffe wie beispielsweise Glutamat frei. Die Botenstoffe strömen über den Synaptischen Spalt zur Post-Synapse, wo sie an Glutamat Rezeptoren binden und zur Folge haben, dass Natrium in die nächste Zelle strömt. Dieser Impuls gelangt dann zum nächsten Zellkörper und dort durch das Axon zur nächsten Synapse. Und von dieser wieder weiter zur Nächsten.<sup>14</sup>

---

<sup>13</sup> MaxPlanckSociety. „Synaptische Plastizität - Wie das Gehirn lernt“. Videoplattform. Youtube, 6. November 2014. <https://www.youtube.com/watch?v=EGKTH60rvoU&t=1s>. Abgerufen am 12.03.2021

<sup>14</sup> MaxPlanckSociety, „Synaptische Plastizität - Wie das Gehirn lernt“.



Bildquelle: [https://www.bvmed.de/wbt/interaktion/kap4\\_it1/bild1.png](https://www.bvmed.de/wbt/interaktion/kap4_it1/bild1.png)

Wenn wir etwas lernen, dann entsteht ein Prozess den man Langzeitpotenzierung nennt. Ein und dieselbe Kontaktstelle zwischen zwei Nervenzellen wird dann wiederholt aktiviert. Normalerweise wird an den Synapsen nicht jeder einlaufende Impuls an die nächste Zelle weitergegeben, doch wenn man etwas übt, wird die Frequenz erhöht und immer mehr Impulse laufen über die Synapsen. Nach einer Weile stellt sich Langzeitpotenzierung ein, es werden also mehr einlaufende Reize an die nächste Zelle weitergegeben. Die Impulse werden besser übertragen und zudem reagiert die Postsynapse stärker auf dem Impuls. Lernen findet also an den Synapsen statt und bewirkt, dass Impulse effizienter von einer Zelle zur nächsten übermittelt werden.<sup>15</sup>

## Wie lernen Maschinen?

Wie unser Gehirn ist auch ein künstliches neuronales Netz aus einem hierarchischen System von miteinander verbundenen Knoten aufgebaut. Anfangs sind alle Verbindungen und Knoten noch gleich gewichtet. Doch dies ändert sich, wenn die künstliche Intelligenz die ersten Informationen erhält.

Durch unzählige Wiederholungen in verschiedensten Situationen lernt die KI so, die jeweils richtigen Entscheidungen zu treffen. Ähnlich wie unser Gehirn lernt dieses Netzwerk durch positive Verstärkung: Bringt eine Aktion Erfolg, wird sie beibehalten.

<sup>15</sup> MaxPlanckSociety, „Synaptische Plastizität - Wie das Gehirn lernt“.

Bringt sie keinen, wird sie beim nächsten Mal verändert. Im Laufe der Zeit verändert sich dadurch auch die Struktur ihres neuronalen Netzes: Die Verbindungen und Knoten erfolgreicher Aktionen werden immer dominanter, die erfolglosen verkümmern – genau wie in unserem Gehirn.<sup>16</sup>

Das Lernen der künstlichen Intelligenz lässt sich anhand von verschiedenen Strategien erklären:

### ÜBERWACHTES LERNEN

Beim überwachten Lernen bekommt die KI eine Input-Variable und eine Output-Variable vorgegeben. Als Trainingsdaten können zum Beispiel tausende Bilder von Hunden und Katzen dienen, die alle mit der Information der abgebildeten Tierart als Zielwert beschriftet sind. Während des Trainingsdurchgangs vergleicht die KI und versucht, Assoziationen herzustellen, also den Zusammenhang zwischen Input- und Output zu erkennen. Ziel ist es, dass die KI anschließend bei neuem Input automatisch den Output vorhersagen kann. Das Vorhandensein von Zielwerten vereinfacht das Lernproblem, da es eine klare Möglichkeit gibt, die Leistung während des Trainings zu bestimmen. Der Lern-Algorithmus gleicht seine Vorhersage mit den Zielwerten ab und verwendet die Fehlerinformationen, die sich daraus ergeben, um seine Leistung schrittweise zu verbessern.<sup>17</sup>

### UNÜBERWACHTES LERNEN

Beim unüberwachten Lernen haben die Trainingsdaten kein Label, d.h. keinen zugeordneten Output. Im eben erwähnten Beispiel der Tierbilder wird der Maschine also nicht mitgeteilt, bei welchem Bild es sich um welches Tier handelt. Die KI muss selbst Gemeinsamkeiten zwischen den Inputs herausfinden und clustern. Auf der einen Seite hat der Lernalgorithmus hierdurch eine größere Entscheidungsfreiheit. Auf der anderen Seite ist jedoch nicht gewährleistet, dass die gefundenen Muster aussagekräftig oder für den jeweiligen Zweck nützlich sind.<sup>18</sup>

---

<sup>16</sup> Wissen. „Künstliche Intelligenz: Wie Maschinenhirne lernen“. Wissensportal, 17. November 2017. <https://www.wissen.de/kuenstliche-intelligenz-wie-maschinenhirne-lernen>. Abgerufen am 12.03.2021

<sup>17</sup> Dr. Künneth, Roland. „Künstliche Intelligenz - Maschinen lernen nie aus“. Industrieinitiative. Automation Valley Nordbayern, 13. März 2019.

<https://www.automation-valley.de/2019/03/13/ki-maschinen-lernen-nie-aus/>. Abgerufen am 12.03.2021

<sup>18</sup> Dr. Künneth, „Künstliche Intelligenz - Maschinen lernen nie aus“.

Unüberwachtes Lernen wird meist anhand der Aufgabenstellung unterschieden in Clustern und Assoziationen. Beim Clustern müssen beispielsweise die Tierfotos nicht zwingend nach der Tierart kategorisiert werden, sondern es können, je nach Datenlage, auch Gruppierungen nach Farben oder Körpergröße herauskommen. Beim Assoziieren wiederum werden Ereignisse gruppiert, die häufig zusammen auftreten. Ein Beispiel hierfür sind Analysen von Warenkörben bei denen Händler die Waren identifizieren, die von den Kunden meist zusammen gekauft werden.<sup>19</sup>

#### WEITERE LERnteCHNIKEN

Neben den bereits erwähnten Lerntechniken gibt es zudem das Bestärkende Lernen. Bei dieser Lernmethode lernt die KI durch Belohnung und Bestrafung den Nutzen in vorkommenden Situationen zu maximieren. Das bedeutet, dass die KI eine Strategie erlernen muss. Im Gegensatz zu den vorherigen Lernstrategien gibt es jedoch keine Labels und die Performance spielt eine bedeutend wichtigere Rolle. Idealerweise reagiert eine Maschine dabei sogar in Echtzeit, was beispielsweise bei selbstfahrenden Autos zwingend notwendig ist.<sup>20</sup>

---

<sup>19</sup> Dr. Künneth, „Künstliche Intelligenz - Maschinen lernen nie aus“.

<sup>20</sup> Mucker, Clemens. „Wie künstliche Intelligenz lernt - Strategien für AI“. Blog. Nagarro, 23. Juli 2018. <http://www.anecon.com/blog/wie-kuenstliche-intelligenz-lernt-strategien-fuer-ai/>.

## Literaturverzeichnis

- Dr. Künneth, Roland. „Künstliche Intelligenz - Maschinen lernen nie aus“. Industrieinitiative. Automation Valley Nordbayern, 13. März 2019.  
<https://www.automation-valley.de/2019/03/13/ki-maschinen-lernen-nie-aus/>.  
Abgerufen am 12.03.2021.
- Wikipedia. „Künstliche Intelligenz“. Enzyklopädie, 11. März 2021.  
[https://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%BCnstliche\\_Intelligenz](https://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%BCnstliche_Intelligenz).
- Wissen. „Künstliche Intelligenz: Wie Maschinenhirne lernen“. Wissensportal, 17. November 2017.  
<https://www.wissen.de/kuenstliche-intelligenz-wie-maschinenhirne-lernen>.  
Abgerufen am 12.03.2021.
- MaxPlanckSociety. „Synaptische Plastizität - Wie das Gehirn lernt“. Videoplattform. Youtube, 6. November 2014.  
<https://www.youtube.com/watch?v=EGKTH60rvoU&t=1s>. Abgerufen am 12.03.2021.
- Mucker, Clemens. „Wie künstliche Intelligenz lernt - Strategien für AI“. Blog. Nagarro, 23. Juli 2018.  
<http://www.anecon.com/blog/wie-kuenstliche-intelligenz-lernt-strategien-fuer-ai/>. Abgerufen am 12.03.2021.
- Shih, Jerry J., Dean J. Krusienski, und Jonathan R. Wolpaw. „Brain-Computer Interfaces in Medicine“. *Mayo Clinic Proceedings* 87, Nr. 3 (März 2012): 268–79.  
<https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2011.12.008>.
- Wikipedia. „Neurotechnology“. Enzyklopädie, 11. Januar 2021.  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Neurotechnology>. Abgerufen am 12.03.2021.

Wissenschaftliche Arbeit im Master-Studiengang Audiovisuelle Medien

# **Künstliche Intelligenz und Brain-Machine-Interfaces**

**Maria Sesterheim**

an der Hochschule der Medien Stuttgart

am 14. März 2021

## Einleitung

Bei der Kommunikation zwischen Mensch und Maschine benötigt es immer eine Schnittstelle. Genau wie der Computer verfügt auch der Mensch im übertragenen Sinn über Ein- und Ausgabegeräte, die uns die Kommunikation mit der Umwelt ermöglichen. Momentan tauschen wir Informationen mit digitalen Geräten beispielsweise über das Tippen auf der Tastatur oder Sprachbefehle aus, nehmen Informationen über unser visuelles und auditives System entgegen und verarbeiten diese mit unserem Gehirn. Brain-Machine-Interfaces (BMI) oder Brain-Computer-Interfaces (BCI) sollen einen direkten Informationsaustausch zwischen Gehirn und Computer gewährleisten und gehen dabei den Weg über das periphere Nervensystem und unsere Muskeln.<sup>21</sup>

Die Erforschung des BMIs wird bis heute maßgeblich von der Medizin vorangetrieben. BMIs haben das Potenzial Patienten mit neuronalen Defekten erheblich mehr Lebensqualität zu ermöglichen.<sup>22</sup> In der Zukunft könnten BMIs aber nicht nur Krankheiten heilen, sondern auch gesunden Menschen zu einer erhöhten Leistung verhelfen. „Das beginnt bei der Fähigkeit zu kommunizieren, geht über Muskel- und Nervenstimulation bis hin zur gesteigerten Aufmerksamkeitskapazität.“, so der Professor und Diplomingenieur Gernot Müller-Putz vom Institut für Neurotechnologie an der TU Graz.<sup>23</sup>

Über die letzten 25 Jahre hinweg hat sich die Neurotechnologie zu einem sehr aktiven und schnell wachsenden wissenschaftlichen Feld entwickelt, genauso wie die Forschung im Bereich der Künstlichen Intelligenz.<sup>24</sup> Die rasanten Fortschritte in der Neurotechnologie sind dabei eng mit den Errungenschaften der KI-Technologien verknüpft. Die vorliegende Arbeit soll einen Überblick über BMIs geben und den Zusammenhang zwischen Künstlicher Intelligenz und Neurotechnologie beleuchten.

---

<sup>21</sup> Frauentdienst, „Brain-Computer-Interfaces - Ein Überblick“. Abgerufen am 05.03.2021.

<sup>22</sup> Thomson, Carra, und Nicoletis, „Perceiving Invisible Light through a Somatosensory Cortical Prosthesis“. S. 274

<sup>23</sup> Kolisch, „Den Rollstuhl mit Gedanken steuern“. Abgerufen am 05.03.2021.

<sup>24</sup> Thomson, Carra, und Nicoletis, „Perceiving Invisible Light through a Somatosensory Cortical Prosthesis“. S. 270, Figure 1.

## Geschichte der Brain-Machine-Interfaces

Bereits im Jahr 1929 wurde ein grundsätzliches Prinzip erstmals erfolgreich durchgeführt. Das "Elektrenkephalogramm des Menschen" (heute besser bekannt als Elektroenzephalographie (EEG)) machte es erstmals möglich, Hirnströme zu messen und aufzuzeichnen.<sup>25</sup> Damit schuf der deutsche Neurologe und Psychiater Hans Berger die Basis für BMIs.

Ein wirklicher Meilenstein in der Geschichte der BMIs ist das Jahr 1973. Der belgische Wissenschaftler Jacques J. Vidal stellte sich die Frage, ob beobachtbare, elektrische Gehirnsignale als Informationsträger in der Kommunikation zwischen Mensch und Computer eingesetzt werden könnten und ob man über dieses System auch Geräte, wie beispielsweise Prothesen steuern könnte.<sup>26</sup> Zwar konnte Vidal seine Idee nicht wie gewünscht umsetzen, doch bleibt seine Vision bis heute wegweisend.<sup>27</sup>

Der Anlauf der BMI-Forschung ging relativ langsam vonstatten, allerdings nimmt sie seit den 2000er Jahren rapide an Fahrt auf.

Ein herausragendes Experiment im Bereich der BMIs wurde 1999 von einer amerikanischen Forschergruppe durchgeführt. Hierbei wurden die Gehirnströme von Ratten gemessen, die sich selbst über einen Hebel mit Trinkwasser versorgen konnten. Basierend auf dem Muster der Hirnströme beim Vorgang des Drückens wurde der Hebelmechanismus so programmiert, dass er auf eben dieses Muster reagiert und Trinkwasser ausgibt. Die Ratten lernten schließlich, dass die Betätigung des Hebels nicht mehr nötig war, um an Wasser zu gelangen und unterließen dies auch. Die Wissenschaftler um John K. Chapin et al. bewiesen damit, dass ein Roboterarm allein mit der Kraft der Gedanken, also durch kortikale Neuronen, kontrolliert werden kann.<sup>28</sup>

Ein Jahr zuvor wurde erstmals ein BMI in das menschliche Gehirn implantiert. Der Wissenschaftler Philip Kennedy implantierte Elektroden in das Gehirn eines

---

<sup>25</sup> Frauendienst, „Brain-Computer-Interfaces - Ein Überblick“.

<sup>26</sup> Vidal JJ. Toward direct brain-computer communication. *Annu Rev Biophys Bioeng.* 1973;2:157-180.

<sup>27</sup> Nam, Chang S., Anton Nijholt, und Fabien Lotte, Hrsg. *Brain-computer interfaces handbook: technological and theoretical advances.* Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2018.

<sup>28</sup> Chapin u. a., „Real-Time Control of a Robot Arm Using Simultaneously Recorded Neurons in the Motor Cortex“.



vollständig gelähmten Mannes und brachte ihm bei, einen Computercursor mit seinen Gedanken zu kontrollieren.<sup>29</sup>

In der modernen BMI-Geschichte kommt es auch vermehrt zum Einsatz von invasiven Brain-Computer-Interfaces, da diese sich als effizienter herausgestellt haben.<sup>30</sup> Außerdem werden BMIs inzwischen nicht nur erforscht sondern haben sich in der Therapie von Parkinson, Epilepsie oder zur Beobachtung der Hirnaktivität bewährt.<sup>31</sup>

2013 konnte die Forschergruppe um Miguel Nicolelis eine weitere erstaunliche Erkenntnis erlangen. In einem Experiment ermöglichten sie einer Ratte mit Hilfe eines BMIs, das für sie unsichtbare Infrarotlicht fühlbar zu machen.

Im Versuchsaufbau arbeiteten die Wissenschaftler zunächst mit normalem, sichtbarem Licht. Dabei leuchtet das Licht immer an dem Ort auf, wo die Ratte eine Belohnung in Form von Nahrung findet. Nachdem die Ratte nun also auf den Zusammenhang zwischen Aufleuchten und Belohnung trainiert wurde, brachten die Wissenschaftler einen Infrarotsensor an der Ratte an. Dieser wiederum wurde mit einem BMI im Gehirn der Ratte gekoppelt. Das BMI selbst war mit dem Hirnareal verbunden, das für den Tastsinn in den Schnurr- oder Fühlhaaren der Ratte zuständig ist.

Im nächsten Versuch wurde dann das normale Licht durch nicht sichtbares Infrarotlicht ausgetauscht. Nach einem Monat war die Ratte im Stande, das Aufleuchten des Infrarotlichts zu erkennen und erfolgreich ihre Belohnung abzuholen. Die Wissenschaftler konnten also beweisen, dass die Stimulation des Tastsinnes in den Fühlhaaren der Ratte über den Infrarotsensor und das BMI gelungen war. Darüber hinaus konnten sie zeigen, dass die Ratte einen Zusammenhang zwischen dem Sinneseindruck und dem Licht herstellen konnte.<sup>32</sup>

2014 kam es zum ersten Mal zu einer Brain-To-Brain Kommunikation zwischen menschlichen Probanden mittels EEG. Dabei entwickelte der Neurowissenschaftler Rajesh Rao folgenden Versuchsaufbau: Zwei Studenten spielen gemeinsam ein Videospiel. Allerdings befinden sie sich nicht im gleichen Raum. Außerdem sieht nur Proband A das Spiel auf einem Display. Währenddessen wird seine Hirnaktivität

---

<sup>29</sup> Kennedy PR, Bakay RA, Moore MM, Adams K, Goldwaithe J. Direct control of a computer from the human central nervous system. *IEEE Trans Rehabil Eng.* 2000;8(2): 198-202

<sup>30</sup> Lebedev und Nicolelis, „Brain–Machine Interfaces“.

<sup>31</sup> Shih, Krusienski, und Wolpaw, „Brain-Computer Interfaces in Medicine“.

<sup>32</sup> Thomson, Carra, und Nicolelis, „Perceiving Invisible Light through a Somatosensory Cortical Prosthesis“.

über eine EEG-Kappe gemessen. Proband B sieht das Spiel nicht, hat allerdings das Eingabegerät, um in das Spiel einzugreifen. Proband A stellt sich nun seine Spielzüge ausschließlich gedanklich vor. Diese Hirnaktivität wird in Form von elektrischen Signalen an Proband B weitergeleitet. Hierfür wurde er mit einer Magnetspule am Kopf ausgestattet, die das Signal per Internet empfängt. Sobald der Proband A gedanklich in Aktion tritt, führt Proband B die Gesten unwillkürlich aus greift entsprechend ins Spiel ein.<sup>33</sup>

Inzwischen hat sich das Feld der Neurotechnologie stetig erweitert. Das KI-Zeitalter, sowie leistungsfähigere Hardware und die Echtzeitfähigkeit der Systeme tragen erheblich zum stetigen Wachstum dieses Forschungsbereiches bei.

## Wie funktioniert ein BMI?

Brain-Machine-Interfaces oder Brain-Computer-Interfaces beschreiben nach Shih et al. ein System, das die Aktivität des zentralen Nervensystems misst, diese analysiert und in für den Computer verständliche Befehle übersetzt. Darüber hinaus leitet es diese Informationen an ein Ausgabegerät weiter, welches dann die entsprechende Aktion ausführt. Dabei ermöglichen BMIs dem Nutzer mit ihrer Umgebung zu interagieren oder zu kommunizieren, indem sie ihre Hirnaktivität anstatt ihrer Muskeln benutzen.<sup>34</sup>

Die Signalakquirierung gehört zu einer der Hauptaufgaben des BMIs. Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Signale zu messen. Einerseits das EEG, eine nicht-invasive Methode, die die Hirnströme über Elektroden auf der Kopfhaut misst. Durch den großen Abstand zum Gehirn resultiert dies jedoch in ungenauen Messdaten. Andererseits die invasiven Methoden, die Elektroden entweder mit der Hirnrinde oder direkt mit dem entsprechenden Hirnareal verbinden. Die invasiven Methoden sind deutlich präziser, allerdings erfordern sie einen chirurgischen Eingriff und sind damit auch mit gesundheitlichen Risiken verbunden.<sup>35</sup>

Nach Messung werden die Signale verstärkt und digitalisiert. Daraufhin wird das gewonnene Signal analysiert und von Machine Learning Algorithmen nach

---

<sup>33</sup> Albers, Regina, Judith Blage, und Silvia Sanides. „Gehirn unter Strom“, FOCUS, 2015, 86.

<sup>34</sup> Shih, Krusienski, und Wolpaw, „Brain-Computer Interfaces in Medicine“. S. 268

<sup>35</sup> Reinhardt, „Wie funktionieren Brain-Computer-Interfaces? Möglichkeiten für die Medizin“. Abgerufen am 07.03.2021.

relevanten Mustern untersucht. Die KI extrahiert hierbei die sachdienlichen Daten und übersetzt sie in Befehle, die ein Ausgabegerät kontrollieren. Beispiele hierfür wären eine Prothese, ein motorisierter Rollstuhl oder ein Sprachcomputer. Außerdem kann das Gerät auch Feedback an den Nutzer senden, damit dieser seine Hirnaktivität gegebenenfalls anpassen kann.<sup>36</sup> Dieses Modell basiert dabei auf einem vorangegangenen Lernprozess, bei dem die KI trainiert wird, bestimmte Hirnaktivitätsmuster den richtigen Befehlen zuzuordnen. Gleichzeitig lernt aber auch der Nutzer, seine Hirnaktivität anzupassen und damit das angeschlossene Ausgabegerät besser zu kontrollieren.

## **Künstliche Intelligenz und BMI**

Die Signale des Gehirns sind hochkomplex und um diese verstehen zu können, werden in der Wissenschaft riesige Mengen an Daten gesammelt und analysiert. Gerade hierfür eignet sich KI hervorragend, da ihre Algorithmen über maschinelles Lernen statistische Modelle basierend auf den zugeführten Daten aufstellen. Dabei erkennt die KI Muster und generiert eigenständig Gesetzmäßigkeiten in den Daten. Der Einsatz von KI-Technologien beschleunigt die Datenauswertung immens und macht die Wissenschaft insgesamt effizienter. Außerdem zeigt die Erforschung von neuronalen Netzwerken die enge Verbundenheit zwischen KI und Neurowissenschaft. Der Aufbau von neuronalen Netzen imitiert Eigenschaften der biologischen Neuronen. Genau wie im Gehirn werden die Neuronen in einem Machine Learning Netzwerk untereinander verschaltet. Wenn ein Neuron schließlich einen Input empfängt, löst dies Informationsfluss zu weiteren Neuronen aus.

Beim Lernvorgang des Menschen werden die Verbindungen zwischen unseren Neuronen durch Wiederholungen gestärkt. Im Gegensatz zum Menschen, der durch sein alltägliches Leben und den damit einhergehenden Erfahrungen lernt, lernt das neuronale Netzwerk durch eine große Menge an Trainingsdaten. Die Festigung der Nervenverbindungen erfolgt hierbei durch Gewichte, die während des Trainings die Verbindungen zwischen den Neuronen priorisieren.<sup>37</sup>

Mit Hilfe der neuronalen Netzwerke gelingt es Wissenschaftlern sogenannte "virtual brains" zu erschaffen, die das menschliche Hirn repräsentieren sollen. Anhand der immer besser werdenden Simulationen können die Forscher Thesen zunächst

---

<sup>36</sup> Shih, Krusienski, und Wolpaw, „Brain-Computer Interfaces in Medicine“. S. 271, Figure 2.

<sup>37</sup> Jing, „Fascinating Relationship between AI and Neuroscience“. Abgerufen am 07.03.2021.

virtuell testen und die zu erwartenden Resultate prognostizieren. Dies steigert die Effizienz der Forschung, da man bereits vorab feststellen kann, ob sich eine Investition in weiterführende Tests an Tieren und Menschen lohnt, oder nicht.<sup>38</sup>

Dennoch arbeiten KI und das menschliche Gehirn sehr unterschiedlich. Zwar sind neuronale Netze von der menschlichen Anatomie inspiriert, dennoch “sind sie nur eine sehr grobe Abbildung in Form von Zahlen in einer hochdimensionalen Matrix.”<sup>39</sup>

Unser Gehirn jedoch ist ein ausgeklügeltes, biologisches System, das über chemische und elektrische Impulse kommuniziert.

## Aktuelle Herausforderungen

### Technik

Die Komplexität des Signals stellt eine der größten Herausforderungen im Bereich der BMIs dar. Bislang ist es nur möglich einen kleinen Teil der Hirnaktivität zu messen, eine komplette “Verkabelung” des Gehirns ist bislang undenkbar. Dieser Umstand hat zur Folge, dass der große Zusammenhang im System Gehirn bislang nicht gut erforscht werden kann. Es ist beispielsweise unklar, wie unser Bewusstsein entsteht, wie Gedanken oder Erinnerungen geformt werden, inwiefern sich Emotionen auf unsere Hirnaktivität und somit auch unser Handeln auswirken.<sup>40</sup> Vermutlich besteht die Verarbeitung und Interpretation von Informationen in unserem Gehirn nicht ausschließlich auf elektrochemischen Signalen. Individuelle Prägung und Erfahrungen beeinflussen unser Handeln und darüber hinaus verändert das Gehirn jeden Tag seine Vernetzung. Langfristig gesehen benötigt es gegebenenfalls sogar einen anderen Ansatz, um den sogenannten “Code des Gehirns” zu entschlüsseln. Dabei muss die Anpassungsfähigkeit des Gehirns genauer studiert und die gewonnenen Erkenntnisse in die KI-Algorithmen miteinfließen. So weist das Bernstein Netzwerk darauf hin, dass es den Deep Learning Methoden noch immer an einer fundamentalen Eigenschaft fehlt, die die Biologie perfektioniert hat: die Robustheit und die Fähigkeit zu generalisieren, unabhängig von den Daten, auf die sie trainiert wurde. Wie eingangs erwähnt, arbeitet die KI sehr spezifisch und hat nur bedingt die Fähigkeit, Erlerntes auf ähnliche Situationen zu transferieren. Im Gegensatz dazu sind die Gehirne von Wirbeltieren extrem adaptiv bei Veränderungen im Signal (z.B.: Tag- und Nacht-Sicht). Die grundlegende Frage ist also, mit welchen Voraussetzungen und welche rechengestützten

---

<sup>38</sup> Jing, „Fascinating Relationship between AI and Neuroscience“.

<sup>39</sup> Jing, „Fascinating Relationship between AI and Neuroscience“.

<sup>40</sup> Abdulkader, Atia, und Mostafa, „Brain Computer Interfacing“.

Prinzipien das Hirn nutzt, um diese hervorragende Anpassungsfähigkeit und damit Robustheit vorzuweisen.<sup>41</sup>

## Ethik und Neuralink

Neben den technischen Herausforderungen gilt es auch ethische und gesundheitliche Aspekte abzuwägen. Welche ethischen Fragen aufkommen, lässt sich am Beispiel der Firma Neuralink des Unternehmers Elon Musk gut aufzeigen.

Musk entwickelt eine integrierte Lösung für ein BMI, das zehntausende ultrafeine, flexible Elektroden direkt in das Gehirn implantiert. Diese Elektroden können einerseits messen, andererseits auch in das Gehirn schreiben. Musk hat außerdem die Vision, nicht nur ein Interface, sondern beliebig viele zu implantieren. Der Einfluss des BMIs kann vom Anwender dann über eine App auf dem Smartphone gesteuert werden.<sup>42</sup>

Zwar waren auch Musks Bemühungen im Bereich der Neurotechnologie angetrieben von der Idee Menschen mit neurologischen Einschränkungen zu helfen, allerdings äußert der Unternehmer auch die Vorstellung, gesunde Menschen mit einem BMI auszustatten. Neuralink erweitert das Gehirn um eine weitere, künstliche Ebene, die uns mit Hilfe von KI "super-intelligent" machen soll.<sup>43</sup>

Forscher der North Carolina University wiesen darauf hin, dass die Technologie der BMIs zum Verlust von menschlicher Authentizität führen kann. Es stellt sich nämlich die Frage, ob ein Mensch nun erfolgreich aufgrund seiner persönlichen Leistung ist oder ob dies nicht auf den Chip zurückzuführen ist.<sup>44</sup> So berichtet auch der Deutschlandfunk in einem Gespräch mit dem Kölner Neurologen Lars Timmermann von solchen Nebenwirkungen. Manche Patienten, die eine tiefe Hirnstimulation zur Behandlung ihrer Parkinsonkrankheit erhielten, erscheinen nach der Operation wie ausgewechselt. Ihre Familie und Bekannten erkennen den Menschen in seinem Verhalten nicht wieder. In diesem Fall hilft nur das Abstellen der Hirnelektroden.<sup>45</sup>

Elon Musk spricht außerdem davon, Gehirne untereinander zu vernetzen und damit den Informationsaustausch untereinander zu ermöglichen. Hierbei wird die Frage

---

<sup>41</sup> „Neuronal Intelligence: Narrowing the gap between neuroscience and AI“. Abgerufen am 07.03.2021.

<sup>42</sup> Maynard, „Neuralink's Technology Is Impressive. Is It Ethical?“ Abgerufen am 07.03.2021.

<sup>43</sup> Karakas, „Elon Musk's Neuralink Demo. Today Is Yet Another Historical Event“. Abgerufen am 10.03.2021.

<sup>44</sup> Maynard, „Neuralink's Technology Is Impressive. Is It Ethical?“

<sup>45</sup> Raabe, „Forschung Aktuell“.

nach der Sicherheit solcher Systeme laut und die Relevanz von Richtlinien für das sogenannte “right to brain privacy”.

Abschließend sind auch die sozialen und gesellschaftlichen Veränderungen, die der Einsatz eines solchen BMIs mit sich bringt, zu nennen. Voraussichtlich werden zu Beginn nur wenige, entsprechend vermögende Menschen Zugriff auf ein solches Gehirnimplantat haben. Das verschafft einer kleinen Bevölkerungsgruppe einen enormen Vorteil gegenüber der anderen. Die Schere zwischen armen und reichen Menschen wird folglich noch größer.

## **Fazit**

Abschließend ist zu konstatieren, dass künstliche Intelligenz ein wertvolles Tool für die Neurotechnologie geworden ist und deren Entwicklung stetig antreibt. Gleichzeitig lernen KI-Wissenschaftler von den Erkenntnissen der Neurowissenschaftler und nutzen deren Ideen als Inspiration für neue Algorithmen. Die Therapiemöglichkeiten durch BMIs könnten Patienten sehr viel Lebensqualität zurückgeben und das macht die Forschung in diesem Bereich absolut relevant. Die künstliche Erweiterung des gesunden Gehirns um einer weitere, “superintelligente” Ebene ist allerdings eine Technologie, die mit extrem schwierigen ethischen Fragen einhergeht. Zwar sind wir von dieser Realität noch Jahrzehnte entfernt, dennoch ist es denkbar, dass BMIs in der Zukunft einen festen Platz in unserem Alltag einnehmen und dabei unzählige Bereiche des Lebens berühren. Genauso rasant wie sich die Forschung in der Neurotechnologie und Künstlichen Intelligenz voran bewegt, sollten daher auch die ethischen Fragen berücksichtigt und entsprechende Strategien erarbeitet werden, um mit dieser Herausforderung angemessen umzugehen.

Aus Sicht der Neurotechnologie müssen aber zunächst ganz andere Hürden gemeistert werden. Das langfristige Ziel manifestiert sich hierbei in der Entwicklung einer gemeinsamen Sprache zwischen KI und dem Gehirn.

## Literaturverzeichnis

- Albers, Regina, Judith Blage, und Silvia Sanides. „Gehirn unter Strom“, Wissen & Gesundheit, 2015, 86.
- Bernstein Netzwerk Computational Neuroscience. „Neuronal Intelligence: Narrowing the gap between neuroscience and AI“, 26. September 2018.  
<https://www.bernstein-network.de/de/bernstein-conference/past-conferences/2018/satellite-workshops/neuronal-intelligence-narrowing-the-gap-between-neuroscience-and-ai>. Abgerufen am 07.03.2021.
- Chapin, John K., Karen A. Moxon, Ronald S. Markowitz, und Miguel A. L. Nicolelis. „Real-Time Control of a Robot Arm Using Simultaneously Recorded Neurons in the Motor Cortex“. *Nature Neuroscience* 2, Nr. 7 (Juli 1999): 664–70.  
<https://doi.org/10.1038/10223>.
- Chaudhary, U., N. Birbaumer, und M.R. Curado. „Brain-Machine Interface (BMI) in Paralysis“. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine* 58, Nr. 1 (Februar 2015): 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2014.11.002>.
- Coin, Allen, Megan Mulder, und Veljko Dubljević. „Ethical Aspects of BCI Technology: What Is the State of the Art?“ *Philosophies* 5, Nr. 4 (24. Oktober 2020): 31.  
<https://doi.org/10.3390/philosophies5040031>.
- Engber, Daniel. „The Neurologist Who Hacked His Brain - And Almost Lost His Mind“. Computerzeitschrift. *Wired*, 26. August 2016.  
<https://www.wired.com/2016/01/phil-kennedy-mind-control-computer/>.
- Frauendienst, Bernhard. „Brain-Computer-Interfaces - Ein Überblick“. Archiv Lehrveranstaltungen Ludwig-Maximilians-Universität München. Arbeitsgruppen Medieninformatik und Mensch-Maschine-Interaktion, 9. Februar 2007.  
<https://www.medien.ifi.lmu.de/lehre/ws0607/mmi1/essays/Bernhard-Frauendienst.xhtml>.
- Guger, Christoph, Brendan Allison, und Junichi Ushiba. „Brain-Computer Interface Research: A State-of-the-Art Summary 5“. In *Brain-Computer Interface Research*, herausgegeben von Christoph Guger, Brendan Allison, und Junichi Ushiba, 1–6. SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2017. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-57132-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-57132-4_1).
- Jing, Hong. „Fascinating Relationship between AI and Neuroscience“. Plattform für Data Science. *Towards Data Science*, 3. Mai 2020.  
<https://towardsdatascience.com/the-fascinating-relationship-between-ai-and-neuroscience-89189218bb0>.
- Karakas, Fahri. „Elon Musk’s Neuralink Demo. Today Is Yet Another Historical Event“. *Medium*, 28. August 2020.  
<https://medium.com/predict/elon-musks-neuralink-demo-today-is-yet-another-historical-event-5f4a07bbb5bd>. Abgerufen am 10.03.2021.

- Kolisch, Nicole. „Den Rollstuhl mit Gedanken steuern“. Gesundheitsportal. Netdoktor, 23. September 2016.  
<https://www.netdoktor.at/krankheit/neue-medien/brain-computer-interfaces-beim-cy-bathlon-6893643>.
- Lebedev, Mikhail A., und Miguel A.L. Nicolelis. „Brain–Machine Interfaces: Past, Present and Future“. *Trends in Neurosciences* 29, Nr. 9 (September 2006): 536–46.  
<https://doi.org/10.1016/j.tins.2006.07.004>.
- Maynard, Andrew. „Neuralink’s Technology Is Impressive. Is It Ethical?“  
Publikationsmedium für Technik und Menschen. OneZero, 23. Juli 2019.  
<https://onezero.medium.com/neuralinks-technology-is-impressive-is-it-ethical-812afb38b19e>.
- Müller, Oliver, und Stefan Rotter. „Neurotechnology: Current Developments and Ethical Issues“. *Frontiers in Systems Neuroscience* 11 (13. Dezember 2017): 93.  
<https://doi.org/10.3389/fnsys.2017.00093>.
- Nam, Chang S., Anton Nijholt, und Fabien Lotte, Hrsg. *Brain-computer interfaces handbook: technological and theoretical advances*. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2018.
- Bernstein Netzwerk Computational Neuroscience. „Neuronal Intelligence: Narrowing the gap between neuroscience and AI“, 26. September 2018.  
<https://www.bernstein-network.de/de/bernstein-conference/past-conferences/2018/satellite-workshops/neuronal-intelligence-narrowing-the-gap-between-neuroscience-and-ai>.
- Raabe, Kristin. „Persönlichkeitsverändernde Nebenwirkungen“. Hörfunk.  
Deutschlandfunk, 9. März 2011.  
[https://www.deutschlandfunk.de/persoenlichkeitsveraendernde-nebenwirkungen.676.de.html?dram:article\\_id=28237](https://www.deutschlandfunk.de/persoenlichkeitsveraendernde-nebenwirkungen.676.de.html?dram:article_id=28237).
- Reinhardt, Peter. „Wie funktionieren Brain-Computer-Interfaces? Möglichkeiten für die Medizin“. *DeviceMed* (blog), 6. November 2018.  
<https://www.devicemed.de/wie-funktionieren-brain-computer-interfaces-moeglichkeiten-fuer-die-medizin-a-772127/>.
- Shih, Jerry J., Dean J. Krusienski, und Jonathan R. Wolpaw. „Brain-Computer Interfaces in Medicine“. *Mayo Clinic Proceedings* 87, Nr. 3 (März 2012): 268–79.  
<https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2011.12.008>.
- Thomson, Eric E., Rafael Carra, und Miguel A.L. Nicolelis. „Perceiving Invisible Light through a Somatosensory Cortical Prosthesis“. *Nature Communications* 4, Nr. 1 (Juni 2013): 1482. <https://doi.org/10.1038/ncomms2497>.
- Trenkle, Andreas, und Kai Furmans. „Der Mensch als Teil von Industrie 4.0: Interaktionsmechanismen bei autonomen Materialflusssystemen“. In *Handbuch Industrie 4.0*, herausgegeben von Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl, und Michael ten Hompel, 1–15. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-662-45537-1\\_5-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45537-1_5-1).



Vidal, J J. „Toward Direct Brain-Computer Communication“. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering* 2, Nr. 1 (Juni 1973): 157–80.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.bb.02.060173.001105>.