

## B. Brain-Computer Interfaces (BCI)

### I. Die Schnittstelle zum menschlichen Gehirn

Bereits 1875 wurde die Entdeckung gemacht, dass das Gehirn von Säugtieren elektrische Signale produziert.<sup>31</sup> Darauf aufbauend wurde ab 1929 die sog. EEG als grundlegendes Mittel der Hirnforschung entwickelt, womit die elektrischen Signale des Gehirns durch die Kopfhaut hindurch aufgezeichnet werden können.<sup>32</sup> Mit dieser Erfindung war ein historischer Durchbruch gelungen, der sowohl die Erforschung des menschlichen Gehirns, als auch die neurologische und psychiatrische Diagnostik bis heute bestimmt.<sup>33</sup>

1965 komponierte Musiker *Alvin Lucier* sein Stück „Music for Solo Performer“, welches mithilfe von Echtzeit-EEG gespielt werden musste, bei der Alpha-Wellen im Gehirn so weit verstärkt wurden, dass diese Schwingungen in Lautsprechern auslösten, welche wiederum Schlaginstrumente stimulierten.<sup>34</sup> Damit war eine der ersten grundlegenden Verknüpfungen des menschlichen Gehirns mit einer Maschine gelungen. Beinahe zeitgleich wurde die Methode des Neurofeedbacks entwickelt, mithilfe dessen die Selbstregulierung von Gehirnfunktionen erlernt werden sollte, indem Gehirnaktivität in Echtzeit analysiert, aufbereitet und dem Probanden als Rückmeldung dargestellt werden.<sup>35</sup> All diese Schritte führten letztendlich zur Erforschung der Möglichkeit von Gehirn Computer Kommunikation und zur Geburt der BCI.<sup>36</sup> Ebenso wurde damit die Technisierung des menschlichen Geistes eingeläutet.

---

31 *Caton*, British Medical Journal 1875, S. 278 (278).

32 *Berger*, Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten 1229, S. 527-570.

33 *Tudour/Tudor/Tudor*, Acta medica Croatica 2005, S. 307 (312 f.); *Millet*, Perspectives in Biology and Medicine 2001, S. 522 (540 f.).

34 *Straebel/Thoben*, Organised Sound 2014, S. 17 (22).

35 *Kamiya*, in: Charles Tart (Hrsg.), Altered States of Consciousness: A Book of Readings, 1969, S. 489 (489 ff.); bzgl. klinischer Anwendungsmöglichkeiten von Neurofeedback: *Sterman/Friar*, Electroencephalography and Clinical Neurophysiology 1972, S. 89 (92).

36 *Vidal*, Annual Review of Biophysics and Bioengineering 1973, S. 157 (157 ff.).

## II. Funktion von BCI

Für die technologische Schnittstelle zum menschlichen Gehirn gibt es viele verschiedene Bezeichnungen und auch entsprechend viele Definitionen.<sup>37</sup> Doch um diese Arbeit so umfassend wie möglich zu gestalten, soll eine sehr inklusive und allgemeine Definition verwendet werden, die alle möglichen Ausgestaltungen berücksichtigt: BCI sind eine Verknüpfung des menschlichen zentralen Nervensystems, insb. des Gehirns, mit einem elektronischen System, wie bspw. einem Computer.<sup>38</sup>

Das zentrale Nervensystem ist dafür da, um äußere und innere Vorgänge, Einflüsse und Sinnesreize zu verarbeiten und entsprechende hormonelle oder neuromuskuläre Outputs zu generieren.<sup>39</sup> Diese Outputs sind das Resultat eines komplexen neuronalen und muskulären Zusammenspiels: Reize oder innere Vorgänge aktivieren bestimmte Hirnareale, die dafür sorgen, dass entsprechende Signale durch das Nervensystem geschickt werden, welches wiederum die jeweiligen Muskeln ansteuert, um die gewollte Aktion bzw. Reaktion auszuführen.<sup>40</sup> Um dies zu bewerkstelligen, sind verschiedene elektrophysiologische, neurochemische und metabolische Prozesse verantwortlich, die sich bspw. als elektrische oder magnetische Signale im Gehirn bemerkbar machen.<sup>41</sup> Genau diese Signale können BCI aufzeichnen und in Outputs umwandeln.<sup>42</sup> Diese Output-Generierung kann entweder durch exogene oder endogene Reize/Signale veranlasst werden.<sup>43</sup> Eine Veranlassung durch exogene Reize liegt vor, wenn visuelle oder auditive Stimuli eine Aktion/Reaktion hervorrufen, wohingegen eine Veranlassung durch endogene Signale eintritt, wenn unabhängig von physikalisch manifestierten Stimuli, allein durch die Kontrolle der eigenen Gehirnaktivitäten, ein Output erzeugt wird.<sup>44</sup> Um aus exogen oder endogen erzeugten Hirnak-

---

37 Clément, Brain-Computer Interface Technologies, 2019, S. 1.

38 Guger et al., in: Guger, Brain-Computer Interface Research, 2024, S. 1 (1); Peksa/Mamchur, Sensors 2023, S. 1 (1); Clément, Brain-Computer Interface Technologies, 2019, S. 1.

39 Liyanage/Bhatt, in: Dey/Shour/Fong, Wearable and Implantable Medical Devices, 2020, S. 55 (56); Wolpaw/Winter Wolpaw, in: Wolpaw/Winter Wolpaw, Brain-Computer Interfaces, 2012, S. 3 (3).

40 Baek et al., Computational Intelligence and Neuroscience 2019, S. 1 (1).

41 Wolpaw/Winter Wolpaw, in: Wolpaw/Winter Wolpaw, Brain-Computer Interfaces, 2012, S. 3 (4).

42 Guger et al., in: Guger et al., Brain-Computer Interface Research, 2019, S. 1 (1).

43 Orban et al., Bioengineering 2022, S. 1 (6 f.).

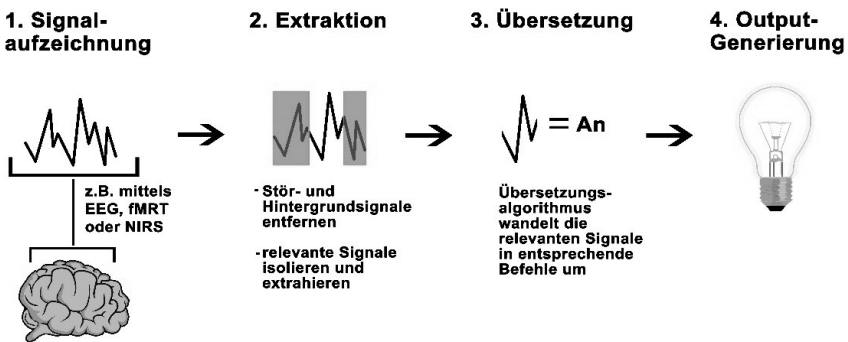
44 Mugdal et al., Interdisciplinary Neurosurgery 2020, S. 1 (2).

tivitäten entsprechende Outputs zu generieren, gibt es für ein BCI zwei Möglichkeiten:<sup>45</sup>

- 1) Goal selection: Hier teilt der Nutzer dem BCI lediglich das Ziel mit, welches erreicht werden soll. Bspw. teilt der Nutzer per Gedanke mit, dass er mit seinem automatisierten Rollstuhl in die Küche möchte. Das BCI übermittelt diese Zielvorgabe an die Software des automatisierten Rollstuhls, welche dann den gesamten Prozess autonom steuert, bis der Nutzer in der Küche angekommen ist.
- 2) Process control: Hier ist der Nutzer in alle Details des Prozesses involviert und steuert den automatisierten Rollstuhl zu jeder Zeit. Der automatisierte Rollstuhl erreicht das Ziel somit nicht mehr auf seine eigene Art und Weise, sondern führt lediglich alle Befehle des Nutzers aus.

Bei beiden Möglichkeiten folgen BCI zusammengefasst vier Schritten: 1. Signalaufzeichnung, 2. Extraktion von relevanten Signalen, 3. Übersetzung der relevanten Signale und 4. Output-Generierung.<sup>46</sup>

Abbildung 1: Funktionsweise BCI.



Zu Beginn werden bei der Signalaufzeichnung die Gehirnaktivitäten mithilfe von Sensoren aufgezeichnet. Dafür können verschiedene Technologien eingesetzt werden, die in Kapitel C.I.I.a und b. genauer thematisiert werden. Da bei der initialen Aufzeichnung der Gehirnaktivitäten auch weitere

45 Wolpaw/Winter Wolpaw, in: Wolpaw/Winter Wolpaw, Brain-Computer Interfaces, 2012, S. 3 (9 f.).

46 Maiseli et al., Brain Informatics 2023, S. 1 (2); Shih et al., Mayo Clinic Proceedings 2012, S. 268 (270); Peksa/Mamchur, Sensors 2023, S. 1 (2).

irrelevante Stör- und Hintergrundsignale aufgezeichnet werden, müssen fortführend die für die Handlung relevanten Signale isoliert und extrahiert werden.<sup>47</sup> Dies wird automatisiert durch eine Signalverarbeitungs-Software vorgenommen.<sup>48</sup> Erst danach kann mithilfe eines Übersetzungsalgorithmus, welcher sich bspw. Deep Learning oder Machine Learning Methoden bedient, eine Konvertierung der relevanten Signale zu entsprechenden Befehlen stattfinden.<sup>49</sup> Dieser Befehl wird abschließend an das externe Gerät weitergeleitet, welches dann den gewünschten Output erzeugt.<sup>50</sup> Um die Zusammenarbeit dieser einzelnen Schritte und die Interaktion mit dem Nutzer zu überwachen, bedarf es übergeordnet noch einer einheitlichen Betriebsumgebung, bei der alle Funktionen zusammenlaufen, koordiniert und kontrolliert werden.<sup>51</sup>

BCI ermöglichen dem Nutzer somit neue künstliche Formen von Outputs, die das natürliche komplexe Zusammenspiel zwischen Gehirn, Nervensystem und Muskeln umgehen,<sup>52</sup> somit nicht hormonell oder neuromuskulär sind und die herkömmlichen natürlichen Outputs entweder ersetzen, wiederherstellen, aufwerten, ergänzen oder verbessern können.<sup>53</sup> So kann bspw. die verlorene Fähigkeit des Gehens dadurch ersetzt werden, dass ein automatischer Rollstuhl per BCI gesteuert wird, die Funktion von gelähmten Armen durch BCI wiederhergestellt werden, die Aufmerksamkeit von Personen aufgewertet werden, indem BCI die Gehirnaktivität

---

47 *Krusienski/McFarland/Principe*, in: Wolpaw/Winter Wolpaw, *Brain-Computer Interfaces*, 2012, S. 123 (123); *Maiseli et al.*, *Brain Informatics* 2023, S. 1 (2); *Peksa/Mamchur*, *Sensors* 2023, S. 1 (2).

48 *Santamaría-Vázquez et al.*, *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 2023, S. 1 (2); *Dong et al.*, *Cyborg and Bionic Systems* 2023, S. 1 (2); *Guger et al.*, in: *Guger et al.*, *Brain-Computer Interface Research*, 2019, S. 1 (1); *Wilson/Guger/Schalk*, in: *Wolpaw/Winter Wolpaw, Brain-Computer Interfaces*, 2012, S. 165 (176 ff.).

49 *Hossain et al.*, *Frontiers in Computational Neuroscience* 2023, S. 1 (2); *Shih et al.*, *Mayo Clinic Proceedings* 2012, S. 268 (272); *Santamaría-Vázquez et al.*, *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 2023, S. 1 (2); detaillierter: *McFarland/Krusienski*, in: *Wolpaw/Winter Wolpaw, Brain-Computer Interfaces*, 2012, S. 147 (147 ff.); *Peksa/Mamchur*, *Sensors* 2023, S. 1 (11 ff.).

50 *Dong et al.*, *Cyborg and Bionic Systems* 2023, S. 1 (2); *Shih et al.*, *Mayo Clinic Proceedings* 2012, S. 268 (272).

51 *Santamaría-Vázquez et al.*, *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 2023, S. 1 (2); *Guger et al.*, in: *Guger et al.*, *Brain-Computer Interface Research*, 2019, S. 1 (1).

52 *Baek et al.*, *Computational Intelligence and Neuroscience* 2019, S. 1 (1f.); *Wolpaw/Winter Wolpaw*, in: *Wolpaw/Winter Wolpaw, Brain-Computer Interfaces*, 2012, S. 3 (6 ff.); *Mugdhal et al.*, *Interdisciplinary Neurosurgery* 2020, S. 1 (2).

53 *Wolpaw/Winter Wolpaw*, in: *Wolpaw/Winter Wolpaw, Brain-Computer Interfaces*, 2012, S. 3 (3 f.).

überwacht und bei Aufmerksamkeitsverlust Alarm schlägt, die Handlungsfähigkeit ergänzt werden, indem z.B. ein zusätzlicher Roboterarm per BCI gesteuert werden kann und die eingeschränkte Möglichkeit, Gliedmaßen zu bewegen (bspw. aufgrund eines Schlaganfalls), durch BCI verbessert werden.<sup>54</sup>

### 1. Nicht-invasive BCI

Bei einem nicht-invasiven Einsatz von BCI können die Neurodaten durch externe Geräte aufgezeichnet werden. Diese Aufzeichnung ist mithilfe vieler verschiedener Methoden möglich. Weit verbreitet und gut erforscht ist der diesbezügliche Einsatz von EEG, bei der Elektroden direkt an der Kopfhaut angebracht werden.<sup>55</sup> EEG zeichnet sich durch eine einfache, portable Nutzung und niedrige Kosten aus, aber weist dafür oftmals eine gewisse Ungenauigkeit auf, da Signale nur global aufgezeichnet werden können.<sup>56</sup> Bessere und schnellere Ergebnisse liefert die Magnetenzephalographie (MEG) und die Magnetresonanztomographie (fMRT), sind dafür aber, aufgrund der Größe, der notwendigen Fixierung des Kopfes und dem magnetischen Feld, kaum flexibel einzusetzen.<sup>57</sup> Neben diesen beiden verbreiteten Methoden gibt es alternativ noch die relativ günstige und portable Möglichkeit der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS), bei der anhand des Blutflusses Aktivitäten im Gehirn erkannt werden.<sup>58</sup>

Alle nicht-invasiven Methoden haben jedoch gemeinsam, dass sie für den Nutzer recht unkomfortabel sind, da es bei der EEG-Methode bspw. oftmals notwendig ist, die Haut kahl zu rasieren und ein Gel aufzutragen, welches die Signale besser leitet.<sup>59</sup> Allerdings werden die nicht-invasiven

---

54 Ebenda, S. 3 (4 f.).

55 *McFarland/Wolpaw*, Current Opinion in Biomedical Engineering 2017, S. 194 (198).

56 *Bansal/Mahajan*, EEG-Based Brain-Computer Interfaces: Cognitive Analysis and Control Applications, 2019, S. 63; *Zhang/Wang/Fuhlbrigge*, Proceedings of the 2010 IEEE 2010, S. 379 (380); *Zhao et al.*, Brain Sciences 2023, S. 1 (1 f.).

57 *Kosmyna/Lécuyer*, PLoS One 2019, S. 1 (4 f.); *Zhang/Wang/Fuhlbrigge*, Proceedings of the 2010 IEEE 2010, S. 379 (380); *Saha et al.*, Frontiers in Systems Neuroscience 2021, S. 1 (5).

58 *Zhang/Wang/Fuhlbrigge*, Proceedings of the 2010 IEEE 2010, S. 379 (378).

59 *Liyana/Bhatt*, in: *Dey/Shour/Fong*, Wearable and Implantable Medical Devices, 2020, S. 55 (69 f.).

BCI kontinuierlich weiterentwickelt, sodass die Genauigkeit, Verlässlichkeit und der Tragekomfort zukünftig steigen dürften.<sup>60</sup>

## 2. Invasive/Semi-Invasive BCI

Invasive und semi-invasive BCI liefern die beste Signalqualität und aussagekräftige Ergebnisse.<sup>61</sup> Während bei der semi-invasiven Methode Elektroden unter der Kopfhaut direkt auf dem Schädel platziert werden, wird bei der invasiven Methode sogar die Schädeldecke geöffnet, um sehr feine Elektroden direkt auf oder in der Großhirnrinde zu implantieren.<sup>62</sup> *Elon Musks* Unternehmen *Neuralink*, das sich auf invasive BCI spezialisiert hat, möchte per Roboter 96 Fäden in die Großhirnrinde implementieren, die insg. 3.072 Elektroden beinhalten.<sup>63</sup> Anfang 2024 implantierte *Neuralink* tatsächlich ihren ersten Chip in einem Menschen.<sup>64</sup> Ein solcher chirurgischer Eingriff birgt allerdings Gefahren für den Nutzer. Es können Schäden am Hirngewebe, Infektionen und Nervenschäden auftreten sowie unvorhersehbare Reaktionen des Gewebes auf die Elektroden hervorgerufen werden.<sup>65</sup> Allerdings werden bereits neue Materialien und Modelle erforscht, die eine langfristige Verträglichkeit, Stabilität und Kompatibilität gewährleisten sollen.<sup>66</sup>

---

60 *Ferracuti et al.*, *Brain Sciences* 2022, S.1 (10 f.); *Knierim/Bleichner/Reali*, *Sensors* 2023, S.1 (2 ff.).

61 *Saha et al.*, *Frontiers in Systems Neuroscience* 2021, S.1 (4); *Mak/Wolpaw*, *IEEE Reviews in Biomedical Engineering* 2009, S.189 f.; *Zhao et al.*, *Brain Sciences* 2023, S.1 (2).

62 Clément, *Brain-Computer Interface Technologies*, 2019, S.60 f.; *Kawala-Sterniuk*, *Brain Sciences* 2021, S.1 (13); *Zhao et al.*, *Brain Sciences* 2023, S.1 (2).

63 *Musk/Neuralink*, *An Integrated Brain-Machine Interface Platform with Thousands of Channels*, v. 16.7.2019, <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/703801v4.full.pdf> (abgerufen 16.1.2021).

64 *Drew*, *Elon Musk's Neuralink brain chip: what scientist think of first human trial*, v. 2.2.2024, <https://www.binasss.sa.cr/bibliotecas/bhm/feb24/34.pdf> (abgerufen 7.4.2024).

65 *Salahuddin/Gao*, *Frontiers in Neuroscience* 2021, S.1 (3 ff.); *Otto/Ludwig/Kipke*, in: *Wolpaw/Winter Wolpaw*, *Brain-Computer Interfaces*, 2012, S.79 (92 ff.).

66 *Tang et al.*, *nature electronics* 2023, S.109 (109 ff.); *Pampaloni et al.*, *Frontiers in Neuroscience* 2019, S.1 (2 ff.).

## III. Aktuelle Anwendungsmöglichkeiten

## 1. Medizinische Anwendungsmöglichkeiten

BCI werden derzeit hauptsächlich im medizinischen Bereich erforscht und verwendet, mit dem Ziel, erkrankten Menschen, die bspw. teilweise oder vollständig bewegungsunfähig sind, einen gewissen Grad an Selbstständigkeit zurückzugeben. Besonders bei Erkrankungen/Beschädigungen des motorischen Nervensystems (wie z.B. Amyotrophe Lateralsklerose, Zerebralparese oder Rückenmarksverletzungen) kommen BCI zum Einsatz, da diese die natürlichen, aber in diesen Fällen beschädigten, neuromuskulären Abläufe umgehen können.<sup>67</sup>

Die diesbezüglichen Anwendungsmöglichkeiten sind vielfältig. Gut erforscht ist die Kommunikation mithilfe von BCI für Personen, die vollständig paralysiert sind oder auf sonstige Art und Weise die Sprechfähigkeit verloren haben. Derartige Nutzer können mithilfe von Gehirnsignalen Buchstaben auswählen und Nachrichten schreiben oder sogar vom System synthetisiert aussprechen lassen.<sup>68</sup> Diese Methode kann auch genutzt werden, um durch das World Wide Web zu browsen.<sup>69</sup>

Neben Kommunikation können BCI beeinträchtigten Personen auch eine gewisse Autonomie ermöglichen. So kann bspw. ein automatisierter Rollstuhl per Gedanke gesteuert werden<sup>70</sup> sowie diverse Hilfsroboter.<sup>71</sup> Gelähmte Gliedmaßen können auch per BCI bewegt werden, bspw. mithilfe eines Exoskeletts oder durch auf der Haut angebrachte Elektroden, die die

67 Peksa/Mamchur, *Sensors* 2023, S. 1 (18 ff.); Shih *et al.*, *Mayo Clinic Proceedings* 2012, S. 268 (268); Karikari/Koshechkin, *Biophysical Reviews* 2023, S. 1 (1).

68 Einen guten Überblick bieten: Rupp *et al.*, in: Grübler/Hildt, *Brain-Computer Interfaces in their ethical, social and cultural contexts*, 2014, S. 7 (10); Bansal/Mahajan, *EEG-Based Brain-Computer Interfaces: Cognitive Analysis and Control Applications*, 2019, S. 58 ff.; Explizite Beispiele: Birbaumer *et al.*, *Nature* 1999, S. 297 (297 f.); McCane *et al.*, *Clinical Neurophysiology* 2015, S. 2124 (2124 ff.); Nijboer *et al.*, *Clinical Neurophysiology* 2008, S. 1909 (1909 ff.); Shah *et al.*, *Sensors* 2022, S. 1 (9 ff.).

69 Mugler *et al.*, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 2010, S. 599 (599 ff.); Bensch *et al.*, *Computational Intelligence and Neuroscience* 2007, S. 1 (1 ff.).

70 Cao *et al.*, *Journal of Neuroscience Methods* 2014, S. 33 (33 ff.); Herweg *et al.*, *Biological Psychology* 2016, S. 117 (117 ff.).

71 Tonin *et al.*, *Proceedings of the annual international conference of the IEEE EMBS* 2011, S. 1 (1 ff.); Stawicki/Gembler/Volosyak, *Computational Intelligence and Neuroscience* 2016, S. 1 (1 ff.); Xu *et al.*, *Mathematics* 2022, S. 1 (8 ff.).

entsprechenden Muskeln stimulieren.<sup>72</sup> Alternativ ist eine Steuerung von Prothesen<sup>73</sup> oder Roboterarmen<sup>74</sup> möglich.

Auch bei der Diagnose und Therapie von diversen psychischen Krankheiten können BCI eingesetzt werden. So können bspw. Epilepsie, Gehirntumore, Parkinson und Schlafstörungen anhand von Gehirnsignalen frühzeitig erkannt<sup>75</sup> und bspw. Aufmerksamkeitsdefizite (z.B. ADS und ADHS),<sup>76</sup> mentale Erschöpfung<sup>77</sup> und Auswirkungen von Schlaganfällen behandelt werden.<sup>78</sup> Bei der Wiederherstellung der Funktion der oberen Gliedmaßen bei Schlaganfallpatienten erzielen BCI mittlerweile sogar bessere Resultate als herkömmliche Therapien.<sup>79</sup>

## 2. Nicht-medizinische Anwendungsmöglichkeiten

Neben dem ausschließlich medizinischen Einsatz von BCI, entstehen auch immer mehr Anwendungsgebiete, die nicht ausschließlich medizinischer Natur sind oder sogar völlig davon losgelöst sind.<sup>80</sup> Ein aktuelles Forschungsfeld für nicht ausschließlich medizinische Anwendung von BCI ist die Steuerung eines Smart Homes per Gedanke, womit ein Anschluss des Gehirns an das IoT erreicht wird. Dabei sollen diverse Anwendungen und Geräte (bspw. Lampen, Heizungen, Sonnenschutz, TV) mithilfe einer entsprechenden Smart Home Software per BCI gesteuert werden können.<sup>81</sup>

---

72 Soekadar *et al.*, in: Guger *et al.*, Brain-Computer Interface Research, 2019, S. 53 (53); Bockbrader, Current Opinion in Biomedical Engineering 2019, S. 85 (86).

73 Yanagisawa *et al.*, Annals of Neurology 2012, S. 353 (360).

74 Bousseta *et al.*, IRBM 2018, S. 129 (130 ff.); Xu *et al.*, Electronics 2020, S. 1 (3 ff.); Sanna *et al.*, Information 2020, S. 1 (4 ff.).

75 Bansal/Mahajan, EEG-Based Brain-Computer Interfaces: Cognitive Analysis and Control Applications, 2019, S. 61.

76 Teo *et al.*, Research in Autism Spectrum Disorders 2021, S. 1 (6 ff.); Lim *et al.*, Child and Adolescent Psychiatry and Mental Health 2023, S. 1 (5 ff.).

77 Ramírez-Moreno *et al.*, Environmental Research and Public Health 2021, S. 1 (11 ff.).

78 Mattia/Molinari, in: Grübler/Hildt, Brain-Computer Interfaces in their ethical, social and cultural contexts, 2014, S. 49 (50f); Sebastián-Romagosa *et al.*, Frontiers of Neuroscience 2020, S. 1 (5).

79 Pichiorri *et al.*, Annals of Neurology 2015, S. 851 (857 f.); einen guten Überblick über Rehabilitationsmöglichkeiten bietet: Orban *et al.*, Bioengineering 2022, S. 1 (11 ff.).

80 Einen guten ersten Überblick bietet: Peksa/Mamchur, Sensors 2023, S. 1 (19 ff.).

81 Miralles *et al.*, The Scientific World Journal 2015, S. 1 (3 ff.); Kosmyna *et al.*, Frontiers in Human Neuroscience 2016, S. 1 (1 ff.); Srijony *et al.*, Proceedings of International Joint Conference on Advances in Computational Intelligence 2021, S. 1 (1 ff.).

Daneben können auch digitale Avatare<sup>82</sup> kontrolliert und Spiele per Gedanke gespielt werden.<sup>83</sup> So gibt es z.B. ein simples Fußballspiel, bei dem man durch die Vorstellung einer Handbewegung nach links oder rechts Tore schießen kann und das entweder zusammen (durch aufeinander abgestimmte Gehirnaktivitäten) oder gegeneinander gespielt wird.<sup>84</sup> Ebenso können mithilfe von BCI unter anderem virtuelle Helikopter geflogen<sup>85</sup> sowie bspw. Pacman,<sup>86</sup> Pinball,<sup>87</sup> Tetris,<sup>88</sup> World of Warcraft<sup>89</sup> und noch etliche weitere Spiele<sup>90</sup> gespielt werden. Ein Einsatz in Virtual Reality- und Augmented Reality-Umgebungen wird im Zuge dessen auch bereits untersucht und erprobt.<sup>91</sup>

Auch in vielen Bereich der bildenden Kunst können BCI-Anwendung finden. So ist es z.B. möglich mit Hirnströmen Bilder zu malen<sup>92</sup> und sogar ganze Kunstinstallationen zu steuern.<sup>93</sup> Ebenso können per BCI-Instrumente gespielt werden.<sup>94</sup> Auch im Bereich FashionTech haben BCI bereits Einzug gehalten, sodass Kleidungsstücke auf Gedanken und psychischen Zustand reagieren können.<sup>95</sup>

- 
- 82 *Guger/Allison/Edlinger*, in: Gröbler/Hildt, *Brain-Computer Interfaces in their ethical, social and cultural contexts*, 2014, S. 85 (91).
- 83 *Paszkiel et al.*, *NeuroSci* 2021, S. 109 (112 ff.); *Peksa/Mamchur*, *Sensors* 2023, S. 1 (19 f.).
- 84 *Bonnet/Lotte/Lécuyer*, *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games* 2013, S. 185 (185 ff.).
- 85 *Royer et al.*, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 2010, S. 581 (581 ff.).
- 86 *Reuderink/Nijholt/Poel*, in: Nijholt/Reidsma/Hondorp, *Intelligent Technologies for Interactive Entertainment*, 2009, S. 221 (221 ff.).
- 87 *Tangermann et al.*, *Advances in Neural Information Processing Systems* 2008, S. 1641 (1641 ff.).
- 88 *Pires et al.*, *Proceedings of the 2013 IEEE 2nd International Conference on Serious Games and Applications for Health* 2011, S. 1 (1 ff.).
- 89 *van de Laar et al.*, *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games* 2013, S. 176 (177 ff.).
- 90 *Moore Jackson/Mappus*, in: Tan/Nijholt, *Brain Computer Interfaces Applying our Minds to Human-Computer Interaction*, 2010, S. 89 (S. 95 f.).
- 91 *Kohli et al.*, *Microprocessors and Microsystems* 2022, S. 1 (5 ff.).
- 92 *Mießinger et al.*, *Frontiers in Neuroscience* 2010, S. 1 (2 ff.).
- 93 *Jade/Gentle*, in: Nijholt, *Brain Art*, 2019, S. 229 (232 ff.).
- 94 *Reck Miranda et al.*, *Proceedings of International Computer Music Conference* 2005, S. 1 (1 ff.).
- 95 *Cass*, *The Tech Behind the Mind-Reading Pangolin Dress Could Lead to Wireless - and Batteryless - Exoskeleton Control*, v. 11.9.2020, <https://spectrum.ieee.org/the-tech-behind-a-mind-reading-dress-could-lead-to-wireless-batteryless-exoskeleton-control> (abgerufen 06.1.2025).

Des Weiteren können BCI als Sicherheits- und Authentifizierungsmechanismen fungieren.<sup>96</sup> Dabei werden spezifischen Signale aus dem Gehirn genutzt, um bspw. die Identität einer Person zu bestätigen oder Zugang zu Informationen zu erhalten.<sup>97</sup> Da diese Signale sehr fälschungssicher sind und kaum kopiert oder gestohlen werden können, stellt diese Methode eine sicherere Alternative zu sonstigen derzeit gängigen Sicherheits- und Authentifizierungssystemen dar.<sup>98</sup>

Besonderes Aufsehen erregen die sog. Brain-to-Brain Interfaces. Dabei werden zwei unterschiedliche Gehirne mithilfe von BCI miteinander verknüpft, sodass nicht nur Informationen aus der Gehirnaktivität gelesen, sondern auch Informationen zurück ins Gehirn gesendet werden können.<sup>99</sup> Dies ermöglicht es mehreren Menschen gemeinsam per Gedanken Probleme zu lösen, indem sie bspw. kooperativ eine Art Tetris spielen, bei dem der ausführende Spieler nur aufgrund der Gehirnaktivitäten der anderen Mitspieler einen Spielstein rotiert oder nicht.<sup>100</sup> So kann durch Brain-to-Brain Interfacing per Gedanke der Körper eines anderen Menschen gesteuert werden, indem kognitive Befehle einer Person bei der jeweils anderen Person als aktive Handlungen umgesetzt wird.<sup>101</sup>

Abschließend ist noch anzumerken, dass nicht alle nicht-medizinischen Anwendungsmöglichkeiten einen direkten Vorteil für den Nutzer haben. Es gibt auch jene BCI, die lediglich die Hirnströme auswerten, um die Ergebnisse für Effizienz-/Effektivitätssteigerung und für Marketingzwecke zu nutzen.<sup>102</sup> Besonderes Interesse besteht darin, das menschliche Gehirn in Relation zur Arbeit und zu täglichen Situation zu untersuchen, um bspw. die Auswirkung von hoher Arbeitsbelastung und Ermüdung auf den Arbeitnehmer und auf den Arbeitsprozess als solchen zu analysieren.<sup>103</sup> Es wird also der kognitive Zustand einer Person überwacht, mit dem

---

96 Landau/Puzis/Nissim, *AMC Computing Surveys* 2020, S.1 (12 ff.); Qui et al., *ACM Computing Surveys* 2019, S.1 (3 ff.).

97 Abdulkader/Atia/Mostafa, *Egyptian Informatics Journal* 2015, S. 213 (218).

98 Ebenda.

99 Rao et al., *PLOS ONE* 2014, S.1 (1).

100 Jiang et al., *Scientific Reports* 2019, S.1 (2 ff.).

101 Rao et al., *PLOS ONE* 2014, S.1 (3 ff.).

102 Bansal/Mahajan, *EEG-Based Brain-Computer Interfaces: Cognitive Analysis and Control Applications*, 2019, S. 62 f.

103 Ramírez-Moreno et al., *Environmental Research and Public Health* 2021, S.1 (11 ff.); Mehta/Parasuraman, *Frontiers in Human Neuroscience* 2013, S.1 (8).

Ziel der Effizienzsteigerung.<sup>104</sup> Im schulischen Kontext kann das gleiche Vorgehen genutzt werden, um Aufmerksamkeit zu messen und zu verbessern.<sup>105</sup> Im Bereich Neuromarketing werden die Hirnströme analysiert, um die Wirksamkeit von Marketingmaßnahmen bestimmen zu können, mit dem Zweck, diese noch besser auf den Menschen anzupassen.<sup>106</sup> Diese Methoden werden bereits in großen Unternehmen wie Disney oder Google eingesetzt.<sup>107</sup> Eine ähnliche Auswertung der Gehirnaktivitäten ist auch bei Reden oder Auftritten von Politikern ö.ä. Interessenvertretern möglich, wodurch relativ genau abgelesen werden kann, wer bspw. den entsprechenden Politiker (nicht) unterstützt.<sup>108</sup> Ebenso ist es möglich, anhand von Gehirnaktivitäten zu bestimmen, welche politische Ausrichtung eine Person hat.<sup>109</sup>

### 3. Ausblick und zukünftige Anwendungsmöglichkeiten

BCI sind noch lange nicht im Mainstream angekommen, geschweige denn im kollektiven Bewusstsein der Gesellschaft angelangt.<sup>110</sup> Die Bemühung, BCI für die breite Masse zugänglich zu machen, besteht aber,<sup>111</sup> sodass auch bereits etliche Unternehmen auf diese neuartige Technologie spezialisiert sind.<sup>112</sup> In Anbetracht der umfangreichen, bis dato schon existierenden Anwendungsmöglichkeiten, ist es sehr wahrscheinlich, dass der nicht-medizinische Markt in Zukunft von BCI erschlossen wird. Zieht man die Entwicklungen von anderen hoch disruptiven Technologien heran, wie z.B. des Personal Computers (PC) und des Smart Phones und deren Weg zur Massentauglichkeit, kann eine sehr grobe und grundlegende Schätzung gewagt werden, wie lange es dauert, bis sich BCI ggf. im Mainstream etabliert haben werden.

104 Roy et al., 35th Annual International Conference of the IEEE EMBS 2013, S. 6607 (6607 ff.).

105 Al-Naffjan/Aldayel, Sustainability 2022, S. 1 (9 ff.).

106 Nomura/Mitsukura, Procedia Computer Science 2015, S. 131 (135 ff.).

107 Ienca/Andorno, Life Sciences, Society and Policy 2017, S. 1 (10 ff.).

108 Vecchiato et al., 31st Annual International Conference of the IEEE EMBS 2009, S. 57 (59f.).

109 Zumindest im amerikanischen Zwei-Parteien System: Schreiber et al., PLOS ONE 2013, S. 1 (2f.).

110 Grübler/Hildt, in: Grübler/Hildt, Brain-Computer Interfaces in their ethical, social and cultural contexts, 2014, S. 115 (116).

111 Allison/Grainmann/Gräser, Intelligent Systems IEEE – Conference Paper 2008, S. 1 (4); Zhang/Wang/Fuhlbrigge, Proceedings of the 2010 IEEE 2010, S. 379 (381 ff.).

112 Kawala-Sterniuk, Brain Sciences 2021, S. 1 (14 ff.); Sawangjai et al., IEEE Sensors Journal 2020, S. 3996 (3997 ff.).

Nach der Entwicklung des ersten funktionsfähigen Digitalrechners Z3 von Konrad Zuse im Jahre 1941,<sup>113</sup> dauerte es ca. 36 Jahre, bis mit dem Apple II 1977 der erste massentaugliche PC auf den Markt kam.<sup>114</sup> Bis wirklich eine vollständige Durchdringung der Gesellschaft durch PCs stattfand, vergingen noch weitere ca. 13 Jahre.<sup>115</sup> Der Grundstein für das heutige Smartphone wurde in den 1970ern gelegt, als die ersten Geräte konzipiert wurden, die Telefonie und Rechenleistung miteinander verbanden.<sup>116</sup> Allerdings dauerte es noch 47 Jahre, bis Apple 2007 das erste iPhone herausbrachte, womit Smartphones die bis dato bereits weitverbreiteten gewöhnlichen Mobiltelefone schlagartig ersetzten.<sup>117</sup> Folgt man diesen beiden Beispielen, dauert es ca. 50 Jahre, bis sich eine disruptive Technologie am Markt vollständig durchgesetzt hat. Die ersten theoretischen Schritte in Richtung BCI wurden bereits in den 1970ern gemacht, wobei aber in den 1990ern die tatsächlich ersten Studien an Menschen durchgeführt wurden,<sup>118</sup> die zu den derzeitigen BCI, wie sie hier in dieser Arbeit beschrieben sind, geführt haben. Somit würde eine wirkliche Massentauglichkeit von BCI rund um 2040 eintreten.

Es wird allgemein angenommen, dass BCI zuerst in der Gaming-Industrie adaptiert werden.<sup>119</sup> Die dort vorhandene Zielgruppe ist bereits daran gewöhnt Headsets o.Ä. zu tragen, hat großes Interesse an neuartiger Technologie und ist auch bereit, Geld für ergänzende Peripheriegeräte auszugeben.<sup>120</sup> Da es bereits etliche Entwicklungen auf dem Bereich BCI-Gaming gibt, ist ein weitreichendes Vordringen der Technologie in den Gaming-Bereich schon weit vor 2040 denkbar. Danach ist eine sukzessive Verbreitung in andere Bereiche wahrscheinlich. Nach der Gaming-Branche erscheint eine Adaption der Technologie in der Industrie naheliegend. Nach der um-

---

113 Zuse, in: Grötschel et al., *Vision als Aufgabe – das Leibnitz Universum im 21. Jahrhundert*, 2016, S. III (116 ff.).

114 Abbate, *Proceedings of the IEEE* 1999, S. 1695 (1696).

115 Durchdringung der Gesellschaft wird hier festgemacht an zwei Ereignissen: 1. Veröffentlichung des ersten wirklichen Betriebssystems Windows 3.0 im Jahre 1990, womit ein einfacherer Zugang zur neuen Technologie gewährleistet wurden und 2. die Erfindung von HTML 1989, womit der Grundstein für das World Wide Web gelegt wurde.

116 Islam/Want, *PERVASIVE computing* 2014, S. 89 (89).

117 Ebenda.

118 Kawala-Sterniuk, *Brain Sciences* 2021, S. 1 (14 ff.).

119 van Erp/Lotte/Tangermann, *Computer* 2012, S. 26 (28); Lijanage/Bhatt, in: Dey/Shour/Fong, *Wearable and Implantable Medical Devices*, 2020, S. 55 (70).

120 Allison/Graimann/Gräser, *Intelligent Systems IEEE – Conference Paper* 2008, S. 1 (4).

fangreichen Digitalisierung der Industrie unter der Bezeichnung „Industrie 4.0“, könnte die „Industrie 5.0“ die technische Hybridisierung der Arbeitnehmer beinhalten, um bspw. den mentalen und emotionalen Zustand von Personen zu überwachen, die schwere und risikoträchtige Maschinen bedienen oder die zeitgleiche und damit effizientere Steuerung von mehreren Maschinen zu ermöglichen. Rund um 2040 würden BCI dann in private Haushalte Einzug halten und alle Bereiche des privaten Lebens durchdringen.

Derzeit ist der Endverbrauchermarkt rundum BCI noch unbedeutend bzw. kaum kommerziell erfolgreich.<sup>121</sup> Damit eine Massentauglichkeit erreicht werden kann, bedarf es aber noch einige Weiterentwicklungen der bereits existierenden BCI. Diese müssen vor allem sicherer, zuverlässiger, nutzerfreundlicher (robuste, genaue und einfache Nutzung der Technologie/Software; ohne Gel und Rasur der Kopfhaut), langlebiger, kostengünstiger und auch ästhetischer werden, damit eine breite Adaption stattfinden kann.<sup>122</sup> Allerdings sind auf all diesen Gebieten bereits etliche Erfolge zu verzeichnen. So gibt es kabellose und universell einsetzbare BCI, die mit innovativen Deep-Learning Algorithmen und flexiblen Elektroden arbeiten<sup>123</sup> und individuelle anpassbare BCI, die kostengünstig mithilfe eines 3D-Druckers hergestellt werden können.<sup>124</sup>

Bei der Entwicklung von BCI lassen sich einige Trends ablesen, die zu ganz neuen Anwendungsmöglichkeiten führen bzw. die bestehenden Anwendungen weiter ausbauen werden. Derzeit erhalten bspw. passive BCI, die teilweise autonom arbeiten (z.B. um den mentalen und emotionalen Zustand zu überwachen) und nicht wie aktive und reaktive BCI zwangsläufig ein aktives Zutun der Nutzer benötigen, mehr Aufmerksamkeit.<sup>125</sup> Dies führt mit sich, dass BCI zukünftig vermehrt in der Bildung Anwendung finden könnten, indem die Konzentration und Aufmerksamkeit von Schü-

---

121 *Smalley*, Nature Biotechnology 2019, S. 978 (980 ff.); *Drew*, Nature Electronics 2023, S. 90 (91 ff.).

122 *Liyana/Bhatt*, in: Dey/Shour/Fong, Wearable and Implantable Medical Devices, 2020, S. 55 (69 f.); *Smalley*, Nature Biotechnology 2019, S. 978 (980 ff.); *Hochberg/Anderson*, in: Wolpaw/Winter Wolpaw, Brain-Computer Interfaces, 2012, S. 317 (321).

123 *Mahmood et al.*, Nature Machine Intelligence 2019, S. 412 (413 f.).

124 *Auda et al.*, Adjunct Publication of the 33rd Annual ACM Symposium on UIST 2020, S. 70 (70 ff.).

125 *Kawala-Sterniuk*, Brain Sciences 2021, S. 1 (19).

lern und auch der Lernerfolg genau überwacht werden.<sup>126</sup> Daneben wird auch die Verbindung zwischen Menschen mithilfe von BCI derzeit intensiv erforscht. Hier wurde bereits ein System entwickelt, bei dem Gedanken in Berührungen übersetzt werden können, die dann mit weiterer unterstützender Technologie bei einer anderen Person tatsächlich fühlbar dargestellt werden.<sup>127</sup> Dies könnte in Zukunft dazu führen, dass auch Echtzeit-Kommunikation zwischen zwei Personen mit BCI abgebildet werden kann. Facebook arbeitet diesbezüglich an einem System, das Gedanken direkt in Textnachrichten übersetzt.<sup>128</sup>

Relevanter könnten in Zukunft auch die Fusion von BCI und anderen Technologien werden. Populär ist dabei die Verknüpfung mit Virtual und Augmented Reality<sup>129</sup> oder die Verknüpfung des menschlichen Gehirns mit KI.<sup>130</sup> Hier könnte als Ziel von BCI das transhumanistische Ideal der Erweiterung der menschlichen kognitiven Fähigkeiten gesehen werden.<sup>131</sup> Alle diese Entwicklungen führen auch zu einer umstrittenen Form von BCI, die hier abschließend noch genannt werden soll: militärische BCI. Es wird davon ausgegangen, dass BCI in den nächsten 20 bis 30 Jahren weitreichend bei militärischen Aktivitäten eingesetzt werden könnten.<sup>132</sup> Dies beinhaltet vor allem die Kommunikation von Kommandos, Strategien oder wichtigen Informationen, das Monitoring von Soldaten in Gefechtssituationen und ggf. die Anpassung vom emotionalen Zustand sowie die Verarbeitung von Schmerzen, das Upload von Wissen und auch die Steuerung von Kriegsmaschinen.<sup>133</sup>

---

126 Wang/Jung, PLOS ONE 2011, S. 1 (10); van Erp/Lotte/Tangemann, Computer 2012, S. 26 (30); Al-Nafjan/Aldayel, Sustainability 2022, S. 1 (9 ff.).

127 Wang et al., IEEE International Conference on SMC 2020, S. 3488 (3489).

128 Constine, Facebook is building brain-computer interfaces for typing and skin-hearing, v. 19.4.2017, <https://techcrunch.com/2017/04/19/facebook-brain-interface> (abgerufen 6.1.2025).

129 Gera, The Neuroscience of Mind-Control Gaming, v. 26.11.2018, <https://variety.com/2018/gaming/features/brain-computer-interface-neurable-1203036143/> (abgerufen 5.1.2025); Kohli et al., Microprocessors and Microsystems 2022, S. 1 (5 ff.).

130 Chudler/Johnson, Brain-Computer Interfaces and the Future of Humanity, v. 23.4.2017, <https://www.psychologytoday.com/us/blog/brain-bytes/201704/brain-computer-interfaces-and-the-future-humanity> (abgerufen am 6.1.2025).

131 Cinel/Valeriani/Poli, Frontiers in Human Neuroscience 2019, S. 8 ff.

132 Binnendijk/Marler/Bartels, Brain-Computer Interfaces U.S. Military Applications and Implications, 2020, S. 17 ff.

133 Ebenda.