

## Materialien

Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Niels Birbaumer

## Technologien und Visionen der Mensch-Maschine-Entgrenzung

Expertise für das WBGU-Hauptgutachten  
„Unsere gemeinsame digitale Zukunft“

**Berlin 2017**



1                   **Technologien und Visionen der Mensch-**  
2                   **Maschine-Entgrenzung**  
3                   **– Externe Expertise –**  
4

5                   **Technologien und Visionen der Mensch-**  
6                   **Maschine-Entgrenzung**  
7

8                   *Stand der Forschung zu Gehirn-Maschine-Interfaces (Brain Machine Interfaces, BMI)*  
9                   *oder Brain Computer Interfaces (BCI) und Gehirn gesteuerten Neuroprothesen seit dem*  
10                  *Gutachten Juli 2016 von Kehl und Coenen*  
11

12                  **1            Einleitung: Stellungnahme zu bisherigen**  
13                  **Gutachten**

14                  Eingesehen wurden die Gutachten von Kehl und Coenen, Hofmann, Behnke, Schaal  
15                  und von Gransche und Warnke. Bis auf das letztgenannte Gutachten von Gransche und  
16                  Warnke bilden alle übrigen Gutachten den Stand der Forschung bis zum jeweiligen  
17                  Begutachtungszeitraum korrekt ab, besonders das Gutachten von Kehl und Coenen und  
18                  das von Hofmann. Das Gransche-Warnke Gutachten ist unkritisch und  
19                  pseudofuturistisch und die dort genannten Entwicklungen und Zukunftsperspektiven  
20                  entsprechen nicht dem Stand der Wissenschaft. Z.B. wird dort das Emotiv  
21                  Neurofeedback System als besonders tauglich und zur Klassifikation von Emotionen  
22                  aus dem EEG angesehen, da es sich viele hunderttausend Mal verkauft hat. Dieses  
23                  System ist technisch nicht in der Lage, irgendeinen Gehirnparameter artefaktfrei zu  
24                  registrieren, sondern erfasst im wesentlichen nur Augenartefakte. Es ist weder als

1 Neurofeedbackgerät noch als Brain Computer Interface System (BCI) tauglich. Es ist  
2 vor allem nicht in der Lage, aus den Hirnstromkurven spezifische Emotionen zu  
3 klassifizieren. Dies ist bisher mit keinem EEG-System mit ausreichender Klassifikation  
4 möglich. Der finanzielle Erfolg des Emotiv Systems korreliert nicht mit den klinischen  
5 oder irgendwelchen nachweisbaren Effekten, derartige Geräte werden im  
6 Psychotherapiemarkt immer wieder eingesetzt und feiern wie so viele  
7 „Psychotechniken“, auch wenn sie nur Placeboeffekte aufweisen, grosse Verkaufs- und  
8 Anwendungserfolge ähnlich wie die physikalischen Therapien in der Orthopädie oder  
9 Homöopathie auf.

10 Bisher existiert nur eine publizierte Untersuchung an Babies, bei denen  
11 Klassifikationen zwischen positiven und negativen Emotionen aus dem EEG in  
12 maximal 60% der Situationen erzielt werden (Hettich et al 2016): jeder menschliche  
13 Beobachter erzielt ohne jede Technologie von 80 bis 100% korrekte Einstufungen aus  
14 Gesichtsausdruck und Verhalten. Das Ziel, speziell für blinde oder andersartig  
15 pathologische Gruppen ein nicht-invasives BCI basierend auf dem EEG  
16 (Elektroenzephalogramm) zur Gefühlserkennung (besonders bei nicht-verbale jungen  
17 Kindern oder Autisten) zu entwickeln, wurde bisher nicht erreicht. Bei Erwachsenen  
18 sind allerdings unter Verwendung des funktionellen Kernspintomogramms (fMRI) klare  
19 Unterscheidungen zwischen positiven und negativen Emotionen möglich (Sitaram et al  
20 2017), angesichts der Kosten und des Aufwandes ist fMRI allerdings nur in besonderen  
21 Fällen und Fragestellungen an kleinen Personengruppen einsetzbar.

22 Die umfangreiche Literatur zum „Lügendetektor“ basiert ebenfalls indirekt auf Gefühls-  
23 erkennung über EEG und/oder Hautwiderstand oder fMRI und die Trefferquote bei  
24 rechtlichen Fragestellungen ist nur unter sehr eingegrenzten ‚spezifischen Bedingungen‘  
25 („guilty knowledge test“) signifikant über dem Zufall. Auch die Aussagen über elektro-  
26 magnetische Hirnstimulation im Gransche und Warnke Gutachten sind unkritisch  
27 optimistisch, wir gehen unten kurz auf nicht-invasive Hirnstimulation ein: auch hier  
28 sagt die Tatsache, dass vor allem in den USA viele Privatpersonen ihr Gehirn mit  
29 Gleichstromstimulation „traktieren“, nichts über deren Effektivität aus.

1 Angesichts der guten Qualität der übrigen Gutachten werden in diesem Gutachten die  
2 Entwicklungen der BCI-Technologie und deren Anwendungen und damit verwandten  
3 Neurotechnologien seit 2015 abgehandelt. Der Begriff BCI (Brain Computer Interface)  
4 wird hier synonym mit BMI (Brain Machine Interface) verwendet, da auch alle BMIs  
5 stets eine Computerschnittstelle benötigen. Ob man die Entwicklung seit den Gutachten  
6 in der Neuroprothetik und BCI Technologie als dramatisch, langsam oder schleppend  
7 beurteilt, ist mehr Einstellungssache als Faktum. Der kalifornische Erfinder und  
8 Unternehmer des Tesla Autos und anderer Technologien Elon Musk hat jedenfalls  
9 beschlossen und der Weltpresse mitgeteilt, dass er sehr viel Geld (Milliarden) in die  
10 BCI Entwicklung stecken wird, allerdings möchte er auch Gesunden Elektroden ins  
11 Gehirn einpflanzen, sodass wir auch im täglichen Leben „mit unsern Gedanken“ alleine  
12 ohne jede Bewegung oder ohne jedes Wort direkt mit unserem Gehirn unsere Umwelt  
13 steuern können. Ich möchte mich dazu nicht äussern, es zeigt aber, welche Bedeutung  
14 diese Technologien bereits auch bei Grossinvestoren erlangt haben (zu den ethischen,  
15 gesellschaftlichen Implikationen habe ich mich in einem Artikel in „Science“ (2017)  
16 geäußert und werde dies am Schluss eines Gutachtens erneut versuchen.

## 17 **2 Begriffsdefinitionen**

18 Unter einem Brain Computer Interface (BCI) oder BMI verstehen wir ein System, das  
19 Hirnaktivität eines Organismus ohne Benutzung des peripheren motorischen Systems in  
20 Signale für Computer, Schalter, Prothesen oder andere technische Systeme und  
21 Maschinen umwandelt oder transferiert. Wir unterscheiden invasive BCI/BMI von  
22 nicht-invasiven. Invasive BCIs benötigen einen chirurgischen Eingriff zum Transfer der  
23 Hirnaktivität auf ein peripheres Gerät, nicht-invasive BCIs benötigen keinen Eingriff in  
24 den Organismus. In Zukunft werden auch zunehmend semi-invasive oder minimal  
25 invasive BCIs zum Einsatz kommen, z.B. Elektroden, die unter die Kopfhaut geschoben  
26 werden („Sub-Q“ Elektroden).

27 Dieselbe Unterscheidung gilt für Hirnstimulation, invasiv ist Tiefe Hirnstimulation  
28 (DBS), epi- und subdurale Elektro- und Magnetstimulation. Nicht-invasiv ist

1 transkranielle Magnetstimulation (TMS), transkranielle Gleichstromstimulation (tDCS),  
2 transkranielle Wechselstromstimulation (TAS), Theta-Burststimulation; Optogenetische  
3 Stimulation ist bisher beim Menschen nicht anwendbar, dem invasiven Tierversuch  
4 vorbehalten, ist aber die z.Z. vielversprechendste Strategie zur spezifischen  
5 Beeinflussung und Steuerung der Hirntätigkeit.

6 Unter Neurofeedback versteht man die visuelle, oder akustische oder taktile  
7 Rückmeldung einer bestimmten Hirnaktivität an den Organismus mit Belohnung der  
8 gewünschten Hirnaktivität in eine bestimmte Richtung, z.B. mehr oder weniger Hirn-  
9 Aktivität in einer bestimmten Hirnregion. In den letzten Jahren gewinnt die  
10 Rückmeldung dynamischer Verbindungen zwischen Hirnarealen  
11 (Konnektivitätsfeedback) zunehmend an Bedeutung. Bisher wurden vor allem nicht-  
12 invasiv Komponenten des EEGs oder zerebrale Oxygenierung mit  
13 Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) und der BOLD Effekt des funktionellen  
14 Magnetresonanzenzsystems (fMRI) als Neurofeedbacksignale verwendet. Allerdings  
15 können von allen invasiv abgeleiteten Hirnsignalen ebenfalls Neurofeedback-Therapien  
16 durchgeführt werden, was aber bisher nicht systematisch versucht wurde.

17 Der Begriff Neuroprothese wird uneinheitlich gebraucht, meist versteht man darunter  
18 oft ein Extraskeletton (z.B. eine am Arm fixierte künstliche Hand), das von Hirnaktivität  
19 gesteuert wird. Wir haben eine derartige Neuroprothese für Schlaganfallpatienten ent-  
20 wickelt und geprüft (Ramos et al 2013). Allerdings werden auch an amputierten  
21 Gliedern und deren peripheren Nerven befestigte Prothesen als Neuroprothesen  
22 bezeichnet: die deutsche Firma Otto Bock ist Weltführer auf diesem Gebiet, ist aber an  
23 hirngesteuerten Prothesen bisher nicht interessiert, vermutlich weil man die  
24 ökonomischen Erwartungen zum jetzigen Zeitpunkt noch als zu riskant einstuft, eine  
25 Auffassung, die ich teile, die aber natürlich auch ein Hemmschuh für die deutschen  
26 industriellen Entwicklungen von BCIs werden könnte. Start-up Firmen in Israel und den  
27 USA und China drängen bereits auf den Markt, allerdings bisher ohne nennenswerten  
28 ökonomischen Erfolg. Allerdings hat der US Marktführer für implantierbare  
29 Medizingeräte „Medtronic“ begonnen, invasive BCIs bei Gelähmten zu testen  
30 (Vansteensel et al 2016).

1 Die Unterscheidung in „invasiv“ (also mit chirurgischem Eingriff) und “nicht-invasiv“  
2 ist irreführend, wird aber meist noch gebraucht, man sollte statt dessen von  
3 “implantiert“ oder „nicht-implantiert“ sprechen. Eine Implantation zur Erfassung  
4 verschiedener (meist elektrischer) Hirntätigkeit kann von einem Einstich in die  
5 Kopfhaut ohne chirurgische Intervention bis zur Einführung von Elektroden in die  
6 Tiefen des Gehirns (wie bei der tiefen Hirnstimulation, DBS bei Parkinson Erkrankung)  
7 in einem aufwendigen neurochirurgischen Eingriff erfolgen. Invasive BCI wurden vor  
8 allem in den USA entwickelt, nicht-invasive in Europa, beide Entwicklungen sind  
9 zumindest klinisch und damit ökonomisch wichtig, beide sollten massiv gefördert  
10 werden, wenn Europa und speziell Deutschland in der Entwicklung, Klinik und  
11 Industrie führend oder zumindest vergleichbar sein wollen.

12 Implantiert wird 1. unter die Kopfhaut (sogenannte Sub-Q BCI), 2. in oder direkt unter  
13 die Schädeldecke oberhalb der harten Hirnhaut („Dura Mater“, epidural bezeichnet), 3.  
14 unter die harte Hirnhaut (subdural), 4. in die Hirnrinde (kortikale Implantate) 5. in die  
15 Tiefe des Gehirns, subkortikale Implantate meist für tiefe Hirnstimulation (DBS, deep  
16 brain stimulation) oder 6. in Teile des sensorischen peripheren Nervensystems wie das  
17 “Cochlear Implant“ bei Gehörlosen oder Retinaimplantat bei Blinden. Auf diese  
18 peripheren Implantate gehe ich in diesem Gutachten nicht ein, da sie ein spezielles  
19 Fachwissen und Erfahrung verlangen, über das der Neurowissenschaftler und -Kliniker  
20 nicht verfügt, dafür sind vor allem Neuroophthalmologen und Neuroaudiologen  
21 qualifiziert.

### 22 **3 BCI und Gehirnstimulation bei gesunden** 23 **Personen**

24 Vor allem die US-Industrie hat eine Vielzahl von Gehirn-„Trainern“ und „Enhancern“  
25 auf den Markt gebracht, die wie das bereits oben erwähnte Emotiv Gerät auch  
26 finanziellen Erfolg hatten, obwohl letzteres keinerlei nachweisbare Effekte auf das  
27 Gehirn hat, sondern vermutlich nur als „technisches Placebo“ wirkt. Der Großteil der  
28 Forschung allerdings zu Gehirn-Computer-Interfaces wurde an gesunden Personen

1 durchgeführt und es existieren nur wenige Untersuchungen an klinischen Gruppen,  
2 obwohl Gehirn-Computer-Interfaces und Neuroprothesen primär für klinische Gruppen  
3 anwendbar sind. Der Grund dafür ist in der Tatsache zu suchen, dass sowohl die Geräte  
4 wie auch die Auswertungsalgorithmen für die Hirn-Computer-Interfaces von  
5 Ingenieuren entwickelt werden, die meist weder eine klinische Ausbildung noch  
6 klinische Erfahrung, noch Zugang zu klinischen Gruppen haben. Dadurch allerdings  
7 wurde die Entwicklung für den Markt und für die Klinik tauglichen Brain-Computer-  
8 Interfaces und auch Stimulationsgeräten verzögert. Immer neue Untersuchungen an  
9 Gesunden mit immer neuen Algorithmen und technischen Entwicklungen wurden  
10 vorgestellt, veröffentlicht und versucht zu verkaufen, ohne dass es bisher eine sinnvolle  
11 Anwendung bei Gesunden gibt, die einen nachweisbar anhaltenden und positiven Effekt  
12 auf Leistungsfähigkeit, Denken oder emotionale Verarbeitung hat. Eine sinnvolle  
13 markttaugliche und klinisch verwertbare Entwicklung von Gehirn-Computer Interfaces  
14 und auch Hirnstimulationsgeräten ist nur bei einer gleichberechtigten und intensiven  
15 Zusammenarbeit von physiologischen, ingenieurwissenschaftlichen und klinischen  
16 Disziplinen möglich. Diese existiert allerdings vor allem in Europa bisher nur in  
17 Ansätzen. Hier hat die USA und Länder wie Israel deutlich weniger Scheu vor dem  
18 interdisziplinären Austausch, der in diesen Ländern auch gleichberechtigt erfolgt,  
19 während in Deutschland z.B. Kliniker nicht nur über bessere finanzielle Ressourcen  
20 sondern vor allem auch über professionelle Privilegien verfügen, die sie ungern an  
21 Ingenieure oder Verhaltenswissenschaftler oder Grundlagenwissenschaftler abgeben  
22 wollen. Sowohl die medizinische wie auch die ingenieurwissenschaftliche Ausbildung  
23 verläuft völlig getrennt von den realen klinischen Problemen und erste Studiengänge in  
24 Medizintechnik sind zwar äußerst sinnvoll und begrüßenswert, die Absolventen haben  
25 in diesen Bereichen allerdings auch sowohl akademisch wie auch finanziell rechtlich  
26 einen schlechteren Stand als Mediziner. Solange die Medizin die Medizintechnik nicht  
27 als technische Hilfswissenschaft betrachtet und sie nicht gleichwertig mit der  
28 Klinischen Medizin fördert und entwickelt, ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit  
29 zur Entwicklung und Prüfung markttauglicher medizintechnischer Entwicklungen wie  
30 der Neuroprothesen und der BCIs schwierig.

1 Es liegen eine Reihe von Untersuchungen über den Einfluss von nicht-invasiver (nicht  
2 implantierter) elektrischer und magnetischer Hirnstimulation auf gesunde Probanden  
3 vor. Die bisherigen Gutachten haben dies ausgeführt. Seit dem Jahr 2014 sind zwar eine  
4 Vielzahl von neuen Untersuchungen erschienen, auch eine internationale Zeitschrift mit  
5 dem Titel „Neurostimulation“ erscheint regelmäßig, Effekte die zu relevanten  
6 Leistungssteigerungen oder Verhaltensverbesserungen bei Gesunden führen, sind auch  
7 in den letzten Jahren nicht ersichtlich. Zwar zeigte sich z.B. bei anodaler  
8 Gleichspannungsstimulation (tDCS mit schwachen, nicht spürbaren Gleichströmen von  
9 0,5-2 Milliampere), dass es zu vorübergehenden Verbesserungen bei Gedächtnis- und  
10 Aufmerksamkeitsaufgaben kommt, wenn man mit großflächigen Elektroden über 15-20  
11 Minuten das Gehirn anodal polarisiert, die Leistungsverbesserungen sind allerdings  
12 kurzfristig, schwach und in einem Fall aus unserm Laboratorium, in dem die Leistung  
13 in Gedächtnisaufgaben nach längerer Zeit untersucht wurden, sogar eher negativ  
14 (Dockery et al, 2009).

15 Erste bemerkenswerte Verbesserungen der Schlaftiefe und damit der Gedächtnisleistung  
16 am nächsten Tag wurden bei gesunden Personen von unserem Institut (Feld & Born,  
17 2015) nachgewiesen. Dabei wurde mit schwachen alternierenden Strömen von etwa 1  
18 Hz während des Tiefschlafstadiums in den ersten drei Schlafstunden eine Verbesserung  
19 des Tiefschlafs wie auch eine Verbesserung der Gedächtnisleistung des nächsten Tages  
20 erzielt. Ähnliche Schlafstimulationsgeräte sind bereits in den 50er und 60er Jahren in  
21 der damaligen Sowjetunion entwickelt und in der Bevölkerung weit verbreitet gewesen.  
22 Im Westen sind diese Untersuchungen allerdings nie rezipiert worden, da sie fast aus-  
23 schließlich in russischer Sprache erschienen sind. Die Beeinflussung des Schlafes und  
24 damit des Kurz- und Langzeitgedächtnisses ist allerdings eine der chancenreichsten  
25 Entwicklungen für Neurofeedback und Brain-Computer Interface Verfahren, die  
26 Europäische Gemeinschaft fördert bereits einige Projekte in dieser Richtung. Auf  
27 industrieller Ebene ist allerdings bisher auch aufgrund der mangelnden Faktenlage keine  
28 dauerhaft Erfolg versprechende technologische Entwicklung vorhanden. Angesichts der  
29 Bedeutung vor allem von Schlaf und Schlafstörung, besonders in höherem Alter und für  
30 das Gedächtnis und damit für die Entwicklung neurodegenerativer Störungen wie der  
31 Demenz halte ich eine Förderung von Brain-Computer Interfaces zur Verbesserung des

1 Gedächtnisses durch Beeinflussung der Schlafgüte für eine der zukunftsreichsten  
2 Entwicklungen der Brain-Computer-Interface Forschung und Klinik. Hier sollte in  
3 Deutschland mehr und massiv gefördert werden, bisher ist die Schlafbeeinflussung  
4 durch nicht-pharmakologische Methoden in Deutschland kaum gefördert. Dies auch vor  
5 allem deswegen, als die pharmakologische Beeinflussung des Schlafes und auch des  
6 Gedächtnisses bisher eher negative als positive Effekte erbrachte. Schlafmittel sind  
7 weder für Schlafgestörte noch für alte Personen indiziert, obwohl sie massenweise  
8 verschrieben und angewandt werden. Der einzig sinnvolle Einsatz von Pharmaka zur  
9 Verbesserung des Schlafes ist der Anästhesie vorbehalten. Hier ist also eine nicht-  
10 pharmakologische Entwicklung wie Neurofeedback und Brain-Computer Interfaces ein  
11 wichtiger Zugang, der bisher nicht ausreichend beschrritten wurde.

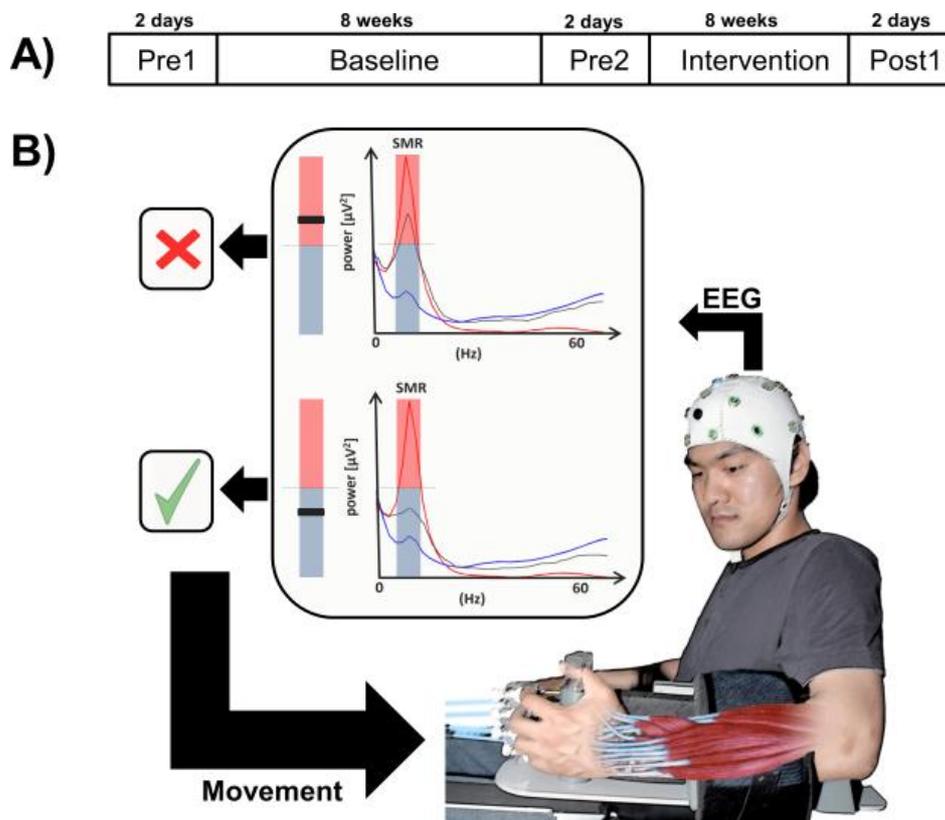
## 12 **4 Schlaganfall**

13 Hier haben sich seit der letzten Begutachtung, also etwa seit dem Jahr 2013 einige  
14 wesentliche und äußerst erfolgreiche Entwicklungen ergeben, welche die Zukunft der  
15 Rehabilitation von chronischem Schlaganfall und möglicherweise auch der Akutfolgen  
16 von Schlaganfall auf die Dauer entscheidend beeinflussen werden. Obwohl bisher in der  
17 Rehabilitationskliniken neurotechnologische Trainingsverfahren wie Brain-Computer  
18 Interfaces oder Neurofeedback nur in Einzelfällen eingesetzt werden, gehe ich davon  
19 aus, dass in naher Zukunft (im Laufe von etwa 10 Jahren) Brain-Computer Interface  
20 Rehabilitation zum entscheidenden Rehabilitationsschritt in der  
21 Schlaganfallrehabilitation wird.

22 Folgen von Schlaganfall verursachen die höchsten Rehabilitations- und Arbeitsausfall-  
23 kosten in unserem Gesundheitssystem. 50% der Überlebenden leiden unter permanenten  
24 Einschränkungen. Ca. ein Drittel erholt sich im ersten Jahr spontan, ein Drittel  
25 verbessert sich mit Standard Physiotherapie, ein Drittel zeigt auch nach Jahren keine  
26 wesentliche Besserung und weisen z.B. völlige Unbeweglichkeit der betroffenen Hand  
27 auf. Diese Gruppe wurde primär in den vorhandenen Brain Computer Interface Studien  
28 untersucht. Die beiden ersten Untersuchungen mit BCI stammen aus dem Institut des

1 Gutachters (Buch et al, 2008; Ramos et al, 2013; Buch et al, 2012). Ramos et al zeigten  
2 in einer kontrollierten klinischen Studie, dass 20 Sitzungen mit einem EEG-gesteuerten  
3 BCI, bei dem die Patienten lernten, mit „Denken“ (d.h. EEG Desynchronisation) ihre  
4 völlig gelähmte Hand, an der eine Prothese anfangs befestigt war, wieder zu öffnen und  
5 zu schliessen. Nach jeder BCI Sitzung erfolgte eine Sitzung Verhaltens-Physiotherapie,  
6 bei der die Patienten dieselben Bewegungen ohne BCI und ohne Prothese in der  
7 natürlichen Umgebung lernen mussten. Die Kontrollgruppe erhielt ein Schein-BCI, bei  
8 der die Bewegungen mit der Handprothese unbemerkt nicht vom Gehirn, also nicht von  
9 dem Willensimpuls der Person gesteuert wurden, sie erhielt aber dieselbe  
10 Physiotherapie wie die Experimentalgruppe. Die Ergebnisse zeigten, dass es erstmals  
11 gelungen war, auch bei völlig bewegungslosen Patienten substantielle Besserungen zu  
12 erreichen, die auch ein Jahr danach noch stabil waren. Abb. 1 zeigt das erste  
13 erfolgreiche BCI System für Schlaganfallpatienten ohne Restbewegung der Hand.

14



1

2 Abb. 1. BCI zur Rehabilitation von schwerem Chronischen Schlaganfall: Die Person denkt die

3 Bewegung der völlig gelähmten Hand, die gedachte Intention desynchronisiert das EEG über der

4 Hirnregion der Hand (d.h. die Frequenz erhöht sich schlagartig) und das an der Hand fixierte

5 Extraskeletton (Prothese) bewegt die Hand in die gedachte Richtung (aus Ramos et al 2013)

6

7 Studien mit ähnlichen Patienten und Versuchsaufbau in verschiedenen Ländern

8 erschienen, die wir in einer Metaanalyse mathematisch verglichen und ausgewertet

9 haben (Cervera et al, submitted) und die Ergebnisse der Ramos et al Studie klar

10 bestätigen: EEG-gesteuerte Behandlung mit BCI führt zu signifikant besseren

11 Ergebnissen bei schwerst Gelähmten als alle bisher verwendeten

12 Rehabilitationsmethoden. Die günstigen Effekte bleiben auch ein Jahr danach ohne

13 jedes BCI Training stabil. Die Ursache dafür ist die Tatsache, dass die Patienten wieder

14 erfahren, willentliche Kontrolle über ihre Handbewegung zu haben und in vielen Fällen

15 werden nach einigen Sitzungen die verantwortlichen Muskeln von Arm und Hand

16 wieder korrekt aktiviert. Auch die Kombination von BCI mit hirngesteuerter

17 funktionellen Elektrostimulation (FES) der Hand hat sich als effektiv erwiesen.

1   Einschränkend muss allerdings erwähnt werden, dass die Besserungen zwar klinisch  
2   und statistisch bedeutsam sind, aber eine weitgehende Wiederherstellung der  
3   Handbewegung nicht, oder nur in seltenen Fällen möglich ist. Z.Z. laufen ca. 20  
4   grössere angemeldete Studien weltweit, in der die optimale Kombination, Dauer und  
5   Auswahl der geeigneten Patienten erforscht wird.

6   Aus diesem Grund, der nur unzureichenden, wenngleich für Patienten höchst wichtigen  
7   Besserung, wird in Zukunft die Implantation der Elektroden zur Bewegungssteuerung  
8   zunehmend erfolgen. Der erste Patient wird noch Oktober 2017 in einer eigenen Studie  
9   des Teams des Gutachters in Spanien implantiert und eine weitere grosse Studie wurde  
10   am Wyss Center for Bio and Neuroengineering in Genf ebenfalls vom Gutachter 2017  
11   begonnen, wobei die ersten Implantationen erst Ende 2018 nach Abschluss aller nicht-  
12   invasiven Methoden erfolgen werden. In beiden Fällen werden die Nachfolgeelektroden  
13   des sogenannten Utha Device, welche in den „Brain Gate Trials“ verwendet wurden  
14   (Hochberg et al 2006, 2012) eingepflanzt. Dabei handelt sich um 100 Mikroelektroden  
15   auf einer ca. 5 mm grossen Spezialoberfläche eingelassen, welche in das Kortexgewebe  
16   der Handregion eingestochen werden. Die Hirnpotentiale von diesen Elektroden  
17   erlauben eine Ansteuerung praktisch aller Richtungsdimensionen von Fingern und  
18   Hand. Bisher sind diese Elektroden noch mit Drähten nach Aussen versehen, die  
19   Kabellosen werden z.Z. am Wyss Center in Genf und auch an anderen Stellen vor  
20   allem in USA entwickelt. Diese Entwicklungen befinden sich alle in fortgeschrittenen  
21   Stadien vor dem Abschluss. CE- oder FDA-Zulassungen liegen noch nicht vor,  
22   allerdings sind experimentelle Studien mit Sicherheitsauflagen möglich.

23   Das Rehabilitationskonzept nach Implantation ist einfach: die Patienten erlernen vorerst  
24   mit Hilfe ihrer Hirnaktivität ein Extraskeletton, also eine an der Hand und Arm  
25   befestigte und mit dem Gehirn verbundene Neuroprothese in allen Richtungen zu  
26   steuern, bis man spezifische Muskelimpulse in den angesteuerten Handmuskel  
27   registrieren kann. Dann wird die Steuerung zunehmend vom Gehirn auf die Muskel  
28   übertragen, sodass im Idealfall der Patient (in) nach ca. einem halben bis einem Jahr  
29   Training von den Hirnelektroden unabhängig wird und diese wieder explantiert werden  
30   können. Patienten, die diese Übertragung vom Gehirn auf die Muskel nicht erreichen,

1 müssten die Elektroden behalten. Bisher ist dies allerdings mit einem  
2 Unsicherheitsfaktor versehen, da die maximale störungsfreie Tragezeit nur an wenigen  
3 Menschen 5 Jahre betrug und längere Tragezeiten nur im Tierversuch sporadisch  
4 untersucht wurden. Angesichts dieser noch offenen Problem der kortikalen Implantation  
5 sind Äusserungen und Investitionen wie die von Elon Musk (s. oben) zum jetzigen  
6 Zeitpunkt als wenig realistisch einzustufen.

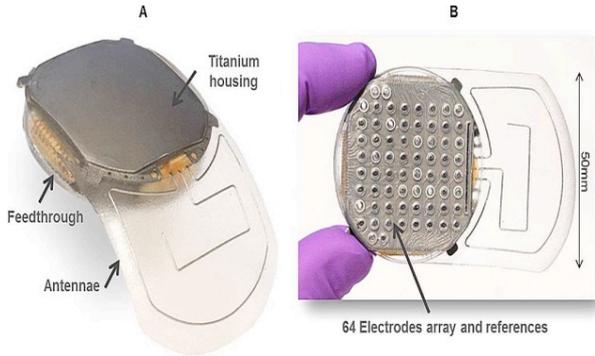
## 7 **5 Querschnittslähmungen**

8 Die Entwicklung von BCI für Gelähmte nach Durchtrennung des Rückenmarks verläuft  
9 schneller als beim Schlaganfall. Sowohl implantierte wie auch nicht-implantierte BCI  
10 Systeme sind in Entwicklung und werden z.Z. geprüft. Die Entwicklung verläuft  
11 allerdings soweit ich sehe völlig ausserhalb Deutschlands, vor allem in Japan (Murata et  
12 al, 2015), Schweiz (Capogrosso et al, 2016) und USA (Hochberg et al 2012). In  
13 Frankreich (Grenoble) hat ein Start-up Unternehmen (Clineat, CEA Grenoble) des  
14 Entwicklers der Tiefenstimulation bei Parkinson Luis Benabid ein drahtloses  
15 Elektrokotikogramm-Elektroden (ECoG) System entwickelt, das eine drahtlose  
16 Übertragung von der Hirnoberfläche erlaubt, ohne dass eine Verletzung oder Berührung  
17 von Hirngewebe erfolgt, womit die Infektionsgefahr substantiell reduziert wird (Abb.  
18 2).

19

Wimagine - Continued

Mestais et al., IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING, VOL. 23, NO. 1, JANUARY 2015

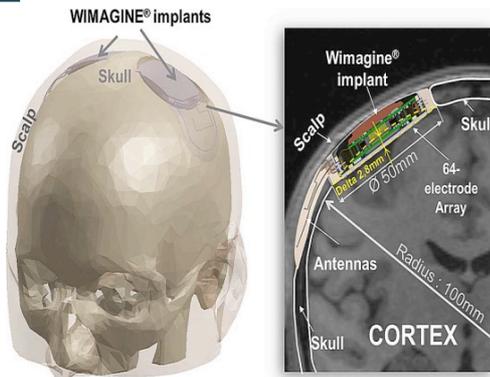


1

WYSS CENTER CONFIDENTIAL

Wimagine - Continued

Mestais et al., IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING, VOL. 23, NO. 1, JANUARY 2015

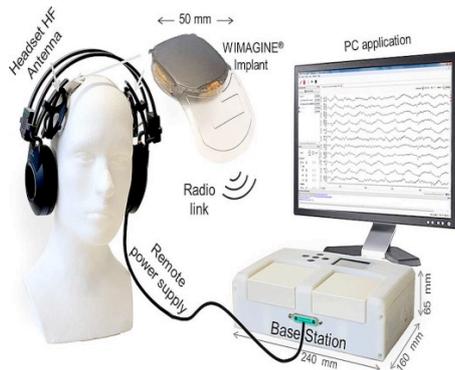


2

WYSS CENTER CONFIDENTIAL

Wimagine - Continued

Mestais et al., IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING, VOL. 23, NO. 1, JANUARY 2015



3

WYSS CENTER CONFIDENTIAL

4 Abb. 2. Die von der Firma Clinelec (Grenoble) entwickelte drahtlose Elektrokortikogram-Elektrode  
 5 (siehe Text), welche am Wyss Center for Bio- and Neuroengineering in Zukunft bei Gelähmten mit  
 6 Querschnittslähmungen und ALS verwendet wird

1

2 In den letzten 2 Monaten (Juli und September 2017) wurden zwei hoch querschnitts-  
3 gelähmte Patienten erfolgreich in Grenoble implantiert und der erste Patient lernt mit  
4 Hilfe eines Roboters über Hirnkommandos, die er an den Roboter weitergibt, stehen  
5 und gehen. Die Elektrode wurde von der französischen Aufsichtsbehörde als  
6 unbedenklich für 6 Monate zugelassen, ist patentiert, hat aber bisher keine EU-  
7 Zulassung, diese ist auf dem Weg.

8 In Japan wurde von Nishimura et al (Murata et al, 2015) ein BCI System entwickelt, wo  
9 von Muskeln am Oberkörper, oder vom EEG oder von invasiven EEG- und EMG  
10 (Elektromyogramm der Muskel) ein am Rücken über dem Rückenmark angebrachter  
11 Transkranieller Magnetstimulator (TMS) angeschaltet wird, der dann auf das zentrale  
12 Kommando hin, das Rückenmark so stimuliert, dass von dort geordnete  
13 Gangbewegungen gelernt und auf die Beinmuskel übertragen oder mit FES stimuliert  
14 werden. Die ersten Versuche an mehreren hoch Querschnittsgelähmten verliefen  
15 äusserst erfolgreich. Mit einer baldigen Kommerzialisierung dieser Neuroprothesen ist  
16 zu rechnen. Inwieweit die Firma Otto Bock diese Erkenntnisse aufgreift, ist mir nicht  
17 bekannt. Angesichts der abnehmenden Zahl von Querschnittsgelähmten könnte hier die  
18 mangelnde Gewinnaussicht eine negative Entscheidung determinieren.

## 19 **6 Neurofeedback**

20 Die klinische Forschung zum Neurofeedback hat zwar eine lange Geschichte seit den  
21 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts, kann aber nur wenige grosse repräsentative  
22 Studien aufweisen, die ihre Wirksamkeit im Vergleich zu andern Methoden und  
23 Placebo belegen. Obwohl auch hier in den USA vor allem gesunde Personen und auch  
24 psychisch Kranke das EEG gesteuerte Neurofeedback verwenden und Firmen wie die  
25 oben erwähnten Hersteller von Emotive Millionen verdienen, ist die Evidenz für  
26 Effektivität bisher dünn. Der Gutachter hat diese Methode in Deutschland und Europa  
27 über Jahrzehnte vorangetrieben, was seine kritische Aussage allerdings nicht wesentlich  
28 ändert.

1 Die beiden Indikationen, für die einigermaßen gesicherte, wenn auch bisher nicht an  
2 grossen Studien geprüfte Evidenz vorliegt, sind Aufmerksamkeitsstörungen (mit und  
3 ohne Hyperaktivität, ADHD) und schwere Epilepsien. In den letzten Jahren werden aber  
4 zunehmend positive Berichte in der Behandlung des chronischen Tinnitus berichtet  
5 (störende Ohrgeräusche ohne äussere Reizung).

6 Bei pharmakologisch und chirurgisch unbehandelbaren Epilepsien konnten sowohl an  
7 Einzelfällen wie auch in Gruppenstudien (Kotchoubey et al 2001) eindrucksvolle  
8 Verbesserungen nach langen Trainingszeiten von 20 bis 100 Stunden nachgewiesen  
9 werden. Die Patienten trainierten vor einem Bildschirm, ihre langsamen Hirnpotenziale  
10 (SCP) des EEGs in elektrisch positive Richtung zu beeinflussen, indem sie spielerisch  
11 einen Cursor oder einen Farbfleck am Bildschirm mit ihren Hirnpotenzialen  
12 beeinflussen lernten. Für elektisch positive Veränderungen werden sie unmittelbar vom  
13 Rechner belohnt. Positive Polarisation der langsamen Hirnpotenziale zeigt einen  
14 hemmenden Zustand des Kortexgewebes an. Für erfolgreiche Hirnkontrolle sind keine  
15 verbalen Instruktionen notwendig noch nützlich, sodass auch schwerst geistig oder  
16 emotional Beeinträchtigte (und Säugetiere) Hirnkontrolle erlernen können. Notwendig  
17 ist die Rückmeldung über das Hirnsignal und eine sofortige positive Verstärkung  
18 (Belohnung) am Bildschirm oder akustisch nach gelungener Kontrolle wie bei jeder  
19 Lernaufgabe.

20 Dieselbe Strategie wurde für Kinder und Erwachsene mit ADHD erfolgreich  
21 angewandt, allerdings mit weniger Sitzungen (meist 20) und Nachuntersuchungen  
22 zeigen Stabilität der Erfolge von 1-5 Jahren. Während bei unbehandelbaren Epilepsien  
23 Vergleichsgruppen nicht notwendig sind, da die Patienten ausbehandelt sind, ist bei der  
24 ADHD noch nicht klar, ob Neurofeedback gegenüber aktiven Placebobedingungen,  
25 gegenüber der stimulierenden Medikation (Ritalin) und gegenüber der  
26 Verhaltenstherapie bessere Effekte erzielt (siehe Übersichtsarbeiten von Birbaumer et  
27 al. 2013 in TICS). Da die Behandlung aber als Lernbehandlung nebenwirkungsfrei ist,  
28 kann ihre Anwendung in jedem Fall als bedenkenlos gelten. Sie wird in Deutschland  
29 von den Kassen allerdings nicht, sondern nur bei Deklaration als psychologische oder  
30 ärztliche Psychotherapie übernommen.

1 Ein in den letzten 10-12 Jahren mit der funktionellen Kernspintomographie (fMRT)  
2 entwickeltes Neurofeedbackverfahren betrifft die Rückmeldung (Neurofeedback) von  
3 lokalen Durchblutungsveränderungen des gesamten Gehirns im Kernspintomographen,  
4 für die sowohl Grundlagenergebnisse wie auch erste klinische Studien vorliegen. Auch  
5 hier hat das Laboratorium des Gutachters eine führende Rolle gespielt und  
6 entsprechende Übersichtsarbeiten (Birbaumer et al 2013 in TICS, Sitaram et al, 2017)  
7 fassen die Situation zusammen:

8 Menschen und Säugetiere sind in der Lage, von der Einzelzelle bis hin zu ganzen Hirn-  
9 systemen und Hirnverbindungen („Konnektivitätsneurofeedback“) die Tätigkeit der  
10 Hirnsysteme und ihre Verbindungen spezifisch durch Lernen (Rückmeldung und  
11 Belohnung) in alle möglichen Richtungen (mehr oder weniger Aktivität, verteilte versus  
12 lokale Aktivität, verbindende Aktivität) schon nach relativ kurzer Lernzeit von Minuten  
13 bis Stunden zu beeinflussen. Fast alle für Verhalten wichtigen Gehirnregionen zeichnen  
14 diese Eigenschaft aus, womit im Prinzip alle relevanten Verhaltensstörungen und  
15 psychiatrischen Störungen als Indikationen in Frage kommen. Selbst bei der schwersten  
16 Verhaltens- und Denkstörung, der chronischen Schizophrenie, wurden nach ca 10  
17 Sitzungen fMRT Neurofeedback positive Verhaltensänderungen (z.B. verringerte  
18 sprachliche Denkstörungen) berichtet, ohne dass es allerdings zu einer allgemeinen  
19 Verbesserung der Psychose gekommen wäre (Ruiz et al, 2013). Die EU hat mit dem  
20 BRAIN TRAIN Projekt eine Europa-Israel weite Plattform auf diesem Gebiet  
21 eingerichtet, in der der Gutachter Mitglied ist und die eine Studie über die  
22 kommerziellen Chancen diese Verfahrens in Auftrag gaben (s. Abb 3),

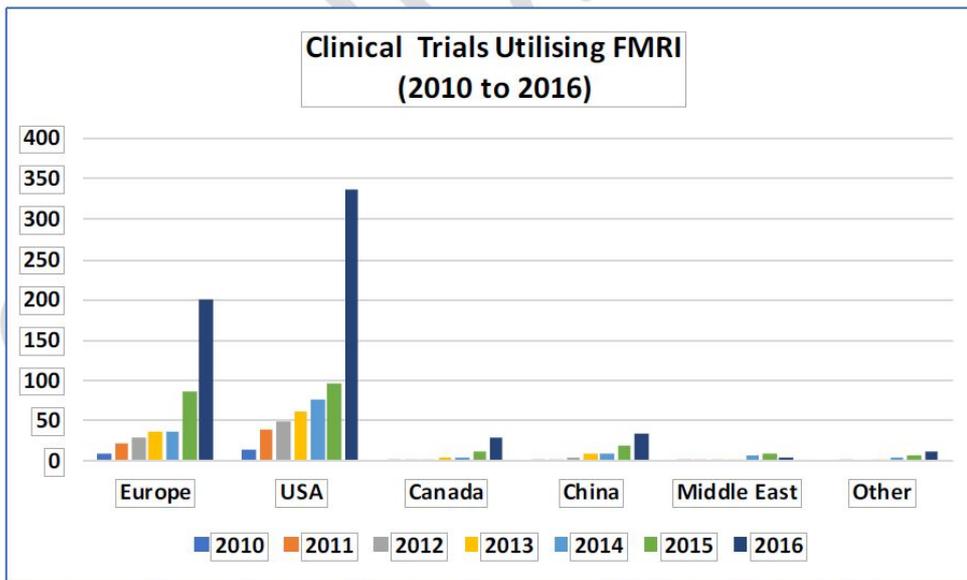


Figure 1: Industry Sponsored Interventional Clinical Trials (Datasource: Evolution Analysis of ClinicalTrials.Gov)

1

Of the diseases being studied in Clinical Trials, Psychotic disorders is the largest category.

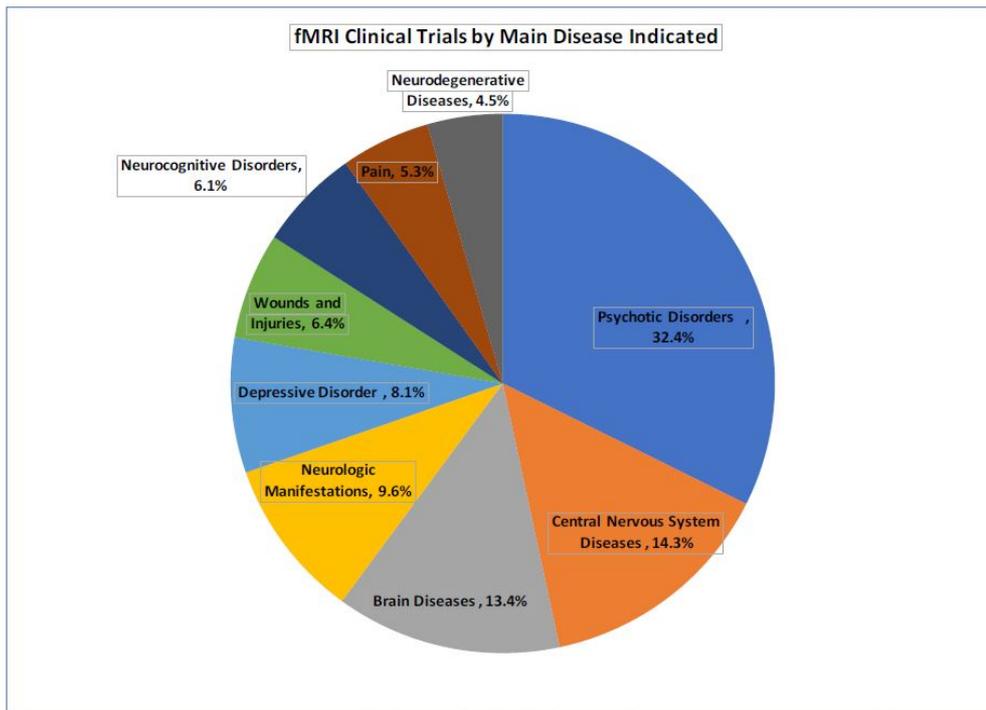


Figure 2: Industry Sponsored Interventional Clinical Trials (Datasource: Evolution Analysis of ClinicalTrials.Gov)

2

3 Abb. 3. BRAIN TRAIN EU Konsortium: Oben Anzahl der eingetragenen und abgeschlossenen von der  
 4 Industrie geförderten kontrollierten Klinischen Studien zum Neurofeedback mit fMRI in den letzten  
 5 Jahren in verschiedenen Regionen. Darunter die für diese Studien ausgewählten Erkrankungen nach  
 6 Anzahl (siehe Text)

1

2 in der für ausgewählte psychiatrisch-neurologische Störungen (vor allem für die  
3 Depressionen) eine positive ökonomische und klinische Entwicklung vorhergesagt  
4 wird. Im Rahmen dieses Projektes wurde auch von der israelischen Arbeitsgruppe um  
5 Talma Hendler ein Verfahren („EEG –Fingerprint“) entwickelt, das erlaubt, auch mit  
6 dem EEG- Neurofeedback tiefere Hirnschichten, die für Gefühls- und  
7 Motivationsstörungen relevant sind, zu trainieren. Angesichts der enorm hohen Kosten  
8 für fMRT und tiefe Hirnstimulation (DBS) wäre diese Methode natürlich eine  
9 brauchbare Alternative als Lern- und Trainingsmethode für emotionale und kognitive  
10 Störungen. Inwieweit sie wirksam ist, kann z.Z. nicht gesagt werden, die Studienlage ist  
11 klein und daher unsicher, die Hoffnungen gross.

12 Z.Z. läuft eine umfangreiche kontrollierte Studie zur Neurofeedback- und Verhaltens-  
13 therapie-Behandlung des chronischen Tinnitus unter der Leitung des Gutachters am  
14 Wyss Center for Bio and Neuroengineering in Genf und am Institut für Medizinische  
15 Psychologie und Verhaltensneurobiologie in Tuebingen. Dabei wird die Wirksamkeit  
16 von EEG –lokaler auditorischer Alpha Wellen-Neurofeedbacktherapie mit fMRT  
17 auditorischer Kortex Neurofeedbacktherapie und dem Standardverfahren Kognitive  
18 Verhaltenstherapie verglichen. Mit verlässlichen ersten Ergebnissen ist allerdings erst  
19 Ende 2018 zu rechnen, erste Vorergebnisse zeichnen aber ein günstiges Bild der EEG  
20 Alpha Neurofeedbacktherapie. Gleichzeitig wird ein tragbares, drahtloses EEG  
21 Neurofeedback System vom Gutachter am Wyss Institut und in Tuebingen und  
22 Freiburg entwickelt, das unter die Kopfhaut implantiert wird (Sub-Q-Elektrode der  
23 deutschen Firma CorTec, Freiburg) und mit einem Prozessor hinter dem Ohr 24  
24 Stunden EEG-Neurofeedback in allen relevanten sozialen und belastenden Situationen  
25 über ein angeschlossenes iPhone erlauben wird. Damit wird eines der Hauptprobleme  
26 der klinischen Neurofeedbacktherapie und BCI-Trainings gelöst, dass nämlich die  
27 Übertragung des Lern- und Therapieerfolgs von der Klinik oder Laboratorium auf die  
28 soziale und häusliche Realität oft schlecht gelingt und lange Trainingszeiten möglich  
29 sind, welche das teure MRT nicht erlauben. Mit ersten Anwendungsversuchen ist 2018  
30 zu rechnen.

1 Eine unter der Haut minimal invasive Elektrode wird allerdings auch bei vielen andern  
2 möglichen Anwendungen der Neurofeedback und Hirnstimulationstherapien eine  
3 wichtige Rolle spielen.

4 Angesichts der Kosten des fMRT werden z.Z. als billige Alternative  
5 Nahinfrarotspektroskopie (NIRS)-Neurofeedback und BCI geprüft und ein invasives  
6 System entwickelt (Zaidi et al, 2015). Über gebündeltes Laserlicht oder LEDs wird  
7 Licht durch Kopfhaut und Schädeldecke auf einzelne Kortexregionen projiziert und die  
8 Absorption des Lichtes gemessen: bei stärkerer Anreicherung mit Sauerstoff ändert sich  
9 die Absorption und Reflexion und kann auf Durchblutungsveränderungen geschlossen  
10 werden. Bei kognitiver und motorischer Aktivität der beleuchteten Hirnregionen steigt  
11 in der Regel als Folge die Sauerstoffanreicherung. Das Verfahren kostet z.Z. etwas  
12 mehr als EEG Geräte, verbilligt sich zunehmend, ist weniger artefaktanfällig, ungleich  
13 ökonomischer als das fMRT, völlig unbedenklich (Licht!), allerdings erreicht es bisher  
14 nur die oberste Kortexschichten, hat eine schlechte räumliche Auflösung von  
15 Millimetern bis Zentimetern und bisher liegt kein invasiv einsetzbares Gerät vor, auch  
16 hier arbeitet der Gutachter allerdings an einer derartigen Entwicklung, die aber noch  
17 Jahre benötigt, bis es zum Einsatz am Menschen verantwortbar ist.

18 In den Abschnitten zur assistierten Kommunikation dieses Gutachtens berichten wir  
19 aber über einen ersten gelungenen klinischen Einsatz von nicht-implantiertem NIRS.

20 Vor allem in Japan, wo auch die meisten Gerätehersteller sind, ist NIRS vor allem in der  
21 Psychiatrie ein weit verbreitetes diagnostisches Verfahren zur Diagnose  
22 psychologischer Erkrankungen, allerdings sind Zweifel an der Validität für diesen  
23 Zweck angebracht und auch von der Zeitschrift Nature mehrfach geäußert worden.

24 Neurofeedback wurde in zahlreichen Untersuchungen zu chronischen Schmerzen einge-  
25 setzt, vor allem Rücken-, Kopf- und Phantomschmerzen und Migräne. Bisher liegen  
26 keine klar positiven Effekte vor. Die wirksamste Behandlung muskulär bedingter  
27 Rückenschmerzen und Kopfschmerzen ist nach wie vor Biofeedback der Rücken- und  
28 Nackenmuskulatur mit Hilfe des Elektromyogramms (EMG) (Zusammenfassung siehe  
29 Flor and Turk, 2011). Die Schmerzbehandlung chronischer Schmerzen mit Neuro-  
30 therapeutischen Methoden stagniert seit Jahren, neurochirurgisch eingepflanzte

1 elektrische Dauer-Stimulation des motorischen Kortex konnte bei neuropathischen  
2 Schmerzen an Einzelfällen Erfolge erzielen und erfreut sich bei Neurochirurgen grosser  
3 Beliebtheit. Inwieweit es kontrollierten Studien standhalten würde, ist unklar. Die  
4 enorme Komplexität und Heterogenität chronischer Schmerzen hat sich aber bisher  
5 generell resistent gegenüber klinischer Forschung und –Anwendung gezeigt, nach wie  
6 vor sind die seit Jahrhunderten bewährten Therapien mit Opiaten bei extremen  
7 Schmerzen der beste Weg, bei allen Nebenwirkungen (Sucht, Toleranz, Obstipation etc)  
8 und die Methoden der Anästhesiologie, die aber nur begrenzt einsatzfähig sind. Die  
9 Therapie chronischer Schmerzen wird nach wie vor von Verfahren dominiert wie  
10 Akupunktur, Homöopathie, Hypnose, physikalische Therapien, verschiedenen  
11 Psychotherapien für die weder ein Wirkmechanismus noch ein Wirkungsnachweis  
12 existiert.

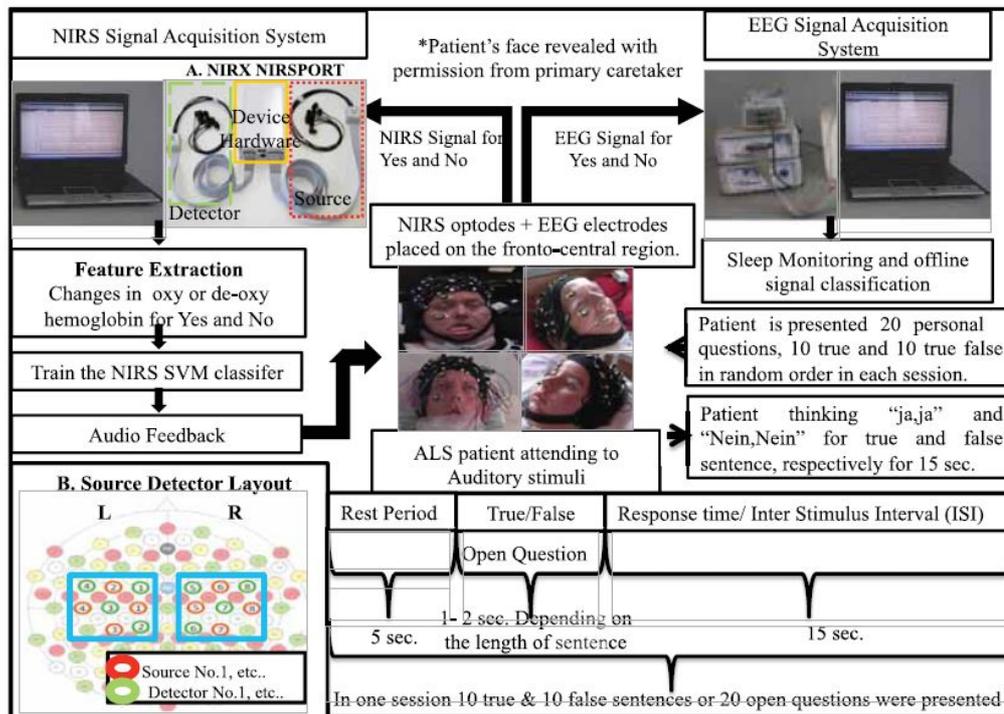
## 13 **7 Direkte Hirnkommunikation mit BCI**

14 Eine der bisher schwierigsten Probleme der Neurologie und Neuro-Rehabilitation und  
15 Palliativmedizin sind Dank der BCI-Forschung der letzten Jahre zumindest teilweise  
16 gelöst oder stehen kurz vor der Lösung: Die Kommunikation mit Menschen, mit denen  
17 keine Kommunikation mehr möglich ist. Dies betrifft vor allem die verschiedenen  
18 Locked-In Syndrome (LIS) wie sie bei einer Vielzahl von Krankheiten auftreten wie der  
19 Amyotrophen Lateralsklerose (ALS) und andern Motoneuronerkrankungen,  
20 Subkortikalen Schlaganfällen, Hirnschädigungen mit weitgehenden Lähmungen,  
21 neurodegenerativen Erkrankungen wie fortgeschrittenem Parkinson und Multipler  
22 Sklerose (MS), Autismus und Zuständen am Ende des Lebens. Praktisch alle  
23 verfügbaren Untersuchungen zu diesem Problem wurden an Patienten mit ALS  
24 durchgeführt, wobei besonders Menschen mit völliger Lähmung und intakten Denk-  
25 und Gefühlsfunktionen (CLIS, complete locked-in state) nur über ein BCI mit ihrem  
26 Gehirn kommunizieren müssen, da alle andern Kommunikationswege abgeschlossen  
27 sind. Bei intakten einzelnen Muskeln oder intakten Augenbewegungen kann mit  
28 assistierter Kommunikation unter Benutzung von Augen- und Muskelableitungen mit  
29 handelsüblichen Geräten (z.B. eye trackern) kommuniziert werden. Einschränkend muss

1 hier bereits betont werden, dass bisher bei Patienten mit CLIS nur Gehirngesteuerte Ja-  
2 nein Kommunikation möglich war. Z.Z laufen allerdings Versuche und  
3 Genehmigungsverfahren vor allem in Deutschland (unter Leitung des Gutachters), USA  
4 und Japan, bei denen eine BCI Kommunikation von Buchstaben und Worten durch  
5 Implantation der Elektroden in das Gehirn möglich werden sollen. Die ersten  
6 Ergebnisse dazu liegen 2018 vor.

7 Abb. 4 zeigt das Schema eines BCI-Systems wie es zur Hirnkommunikation mit CLIS  
8 Patienten verwendet wird (Chaudhary et al 2017). Dabei wird vom Patienten die Durch-  
9 blutung der Hirnareale im vorderen, frontalen Hirnteil links mit sogenannter Nahinfra-  
10 rotspektroskopie (NIRS, links auf Abb 4) und das EEG (rechts) nicht-invasiv (in  
11 Zukunft auch invasiv) aufgezeichnet und kontinuierlich mit Algorithmen der  
12 Künstlichen Intelligenz (KI) wie sie auch zur Spracherkennung verwendet werden,  
13 ausgewertet.

14



1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19

Abb. 4. fNIRS gesteuertes BCI zur Kommunikation völlig eingeschlossener Patienten mit ALS (CLIS): Der(die) Patient(in) hört die Fragen und muss innerhalb von 10-15 sec die Antwort „ja“ oder „nein“ denken. Der Rechner klassifiziert die Antwort der Hirndurchblutung (NIRS) und entscheidet, ob es ein Ja oder Nein war, nachdem er dies in Trainingssitzungen aus Fragen mit bekannter Antwort gelernt hat. Wenn der/die Patient 70% korrekt über einen Zeitraum von Tagen antwortet, werden offene Fragen gestellt („Mein Leben ist schön“, „mein Leben ist unerträglich“). Nach jeder gedachten Antwort teilt das System das Ergebnis mit („Deine Antwort wurde als „Ja“ erkannt“). Gleichzeitig wird das EEG (oben rechts) registriert, um Schlaf und Aufmerksamkeitsschwankungen zu erkennen. Wenn relevant, werden bei Nachlassen der Aufmerksamkeit die Fragen unterbrochen (aus Chaudhary et al 2017) (siehe Text).

Der/die Patient(in), welche häufig auch aufgrund der Augenmuskellähmung Probleme mit der visuellen Wahrnehmung haben, hören vorerst einfache Fragen, die er/sie „im Kopf“ (also mental) mit ja oder nein beantworten soll: z.B. „Berlin ist die Hauptstadt von Frankreich, Berlin ist die Hauptstadt von Deutschland“. Das System stellt fest, mit welcher Durchblutungsänderung (z.B. Anstieg der Oxygenierung bei ja-Denken, und Abfall bei nein-Denken) das Gehirn des Patienten antwortet und „trainiert“, bis es eine gedachte ja oder nein Antwort verlässlich zuordnen kann. Dann können auch

1 schwierigeren und offene Fragen gestellt werden, Das Team des Gutachters hat 2014 und  
2 2017 das erste Mal weltweit positive Ergebnisse mit CLIS Patienten, die an ALS litten,  
3 veröffentlicht (Gallegos-Ayala et al 2014; Chaudhary et al 2017) und die Ergebnisse der  
4 Weltliteratur zu dem Thema auch an anderen Patientengruppen zusammengefasst  
5 (Chaudhary et al 2016). Dabei konnte über Jahre mit völlig Gelähmten vor allem mit  
6 NIRS-BCI ja und nein Antworten kommuniziert werden. Buchstaben- und Wortauswahl  
7 ist zwar bei LIS Patienten mit EEG-BCI gelungen, aber nicht bei CLIS. Das System  
8 kann nach Schulung auch von Pflegepersonal und Familienmitgliedern betrieben  
9 werden. Ausser an ALS Patienten waren z.B. EEG-gesteuerte BCI Systeme bei  
10 Gelähmten nach subkortikalen Schlaganfällen erfolgreich. Bisher fehlen positive  
11 Berichte über längere Zeitspannen an Menschen mit Bewusstseinsstörungen nach  
12 Hirnschädigungen wie sogenannten Minimal Conscious State (MCS, minimaler  
13 Bewusstseinszustand) oder vegetativem Zustand (VS, heute als "nicht-responsiver  
14 Zustand" bezeichnet).

15 Da viele tausend solcher Menschen in Deutschland und weltweit existieren und in 30%  
16 der Fälle fehldiagnostiziert werden, wäre angesichts auch der enormen Pflegeprobleme  
17 und –kosten eine Kommunikation besonders wichtig, abgesehen von dem schwer einzu-  
18 schätzendem Leiden dieser Patienten. Allerdings wird die Lebensqualität bei solchen  
19 Erkrankungen und besonders bei LIS und CLIS von Aussenstehenden, Pflegepersonal,  
20 Familie und Ärzten als schlecht eingeschätzt, während die Lebensqualität von den  
21 betroffenen Patienten selbst als gut bis sehr gut beurteilt wird (Zusammenfassung siehe  
22 Chaudhary et al in press, Nature Rev.Neurol.). Angesichts der Tatsache, dass ca 90 bis  
23 95% unter meist ungeklärten Umständen versterben und aktive und passive Sterbehilfe  
24 sowie Euthanasie (weniger in Deutschland und Israel aus historischen Gründen)  
25 vermutlich die Regel ist, erscheint eine Versorgung solcher Menschen mit BCI  
26 besonders bedeutsam. Der Gutachter hat gemeinsam mit einer betroffenen  
27 Patientenfamilie in einem Rechtsstreit vor dem Hamburger Sozialgericht (Aktenzeichen  
28 S 8 KR 317/15) erwirkt, dass die Gerätekosten für das BCI (ca 30 000 bis 50 000 Eur)  
29 von den Kassen bei CLIS übernommen werden müssen.

30

1 der Tatsache, dass bisher bei schwerst oder völlig Gelähmten eine willentliche  
2 Kommunikation mit Auswahl von Worten aufgrund der Hirntätigkeit nicht möglich  
3 war, ist bei solchen Patienten zum jetzigen Zeitpunkt die chirurgische Implantation von  
4 Elektroden mit langer Lebensdauer und drahtlos indiziert. An Menschen mit teilweisen  
5 Lähmungen konnten in allen bisherigen invasiv gesteuerten BCI, vor allem mit  
6 Ableitungen direkt von den Nervenzellen des Kortex („Utha device“ Hochberg et al  
7 2006 und 2012, Collinger et al, 2013, Milekovic et al, in press) eine rasche und flüssige  
8 Hirnkommunikation erreicht werden. Ob dies allerdings bei völlig Gelähmten auch  
9 funktioniert, werden die nächsten Jahre zeigen. Immerhin haben diese Erfolge den  
10 Unternehmer Musk („Tesla“ Auto) veranlasst, Implantationen auch für Gesunde  
11 vorzubereiten. Inwieweit dies sinnvoll oder zulässig sein könnte, wird im nächsten  
12 Abschnitt erläutert.

## 13 **8 Ethische und gesellschaftspolitische Aspekte,** 14 **Willensfreiheit, Entscheidungsautonomie,** 15 **Mensch-Maschine-Verschmelzung**

16 Wir sind in einem Artikel in “Science,, (Clausen et al, 2017) kürzlich auf einige ethische  
17 Probleme der Neuroprothetik und BCI-Anwendung eingegangen und wollen hier noch  
18 einige zusätzliche Aspekte betonen.

19 Obwohl die Anwendung von BCI und zentralen Hirnprothesen am Anfang stehen,  
20 verläuft die Entwicklung sowohl technisch wie auch klinisch und ökonomisch so  
21 stürmisch, dass es durchaus angebracht ist, auf die o.g. Probleme einzugehen. Natürlich  
22 wird auch in diesem Bereich die Entwicklung von Technologie, ökonomischen  
23 Interessen und Entwicklungen der Mathematik (KI) und Physik getrieben und nicht von  
24 antizipierten gesellschaftlichen oder ethischen Konsequenzen, Nutzen oder Schaden,  
25 ähnlich wie auch in andern gesellschaftlich–technologischen Entwicklungen, man denke  
26 z.B. an Smartphones und viele anderen halbautonomen Systeme. Man kann trotzdem  
27 hoffen, dass vielleicht einige der jetzt schon sichtbaren negativen Konsequenzen dieser  
28 Technologien zumindest eingeschränkt und kontrolliert werden.

1 Wir sind schon im vorigen Abschnitt auf die vitalen Konsequenzen von BCI für Leben  
2 und Tod von gelähmten und schwerst eingeschränkten Patienten eingegangen: Die  
3 Anwendung von BCI zur direkten Hirnkommunikation stellt besonders die weit  
4 verbreitete und politisch in den westlichen Demokratien gesetzlich geförderte Praxis der  
5 Patientenverfügungen lange vor Ausbruch einer Erkrankung in Frage. Wir haben uns  
6 auch aus philosophisch-pragmatischen Gründen mehrfach gegen die beliebte Illusion  
7 der grenzenlosen Autonomie des modernen Menschen in Demokratien gewandt, in der  
8 jeder Bürger das „Recht“ haben soll, über sein Leben durch Ablehnung medizinischer  
9 Massnahmen zur Erhaltung des Lebens zu entscheiden, meist lange bevor er in die  
10 antizipierte Entscheidungssituation kommt. Der Grossteil gelähmter Patienten z.B. kann  
11 nicht antizipieren, dass auch nach künstlicher Beatmung und künstlicher Ernährung und  
12 bei völliger Lähmung mit teilweiser Einschränkung der Sehfähigkeit die Lebensqualität  
13 gut bis sehr gut ist, dies erscheint schwer verständlich und nicht antizipierbar, wir habe  
14 die Gründe dafür mehrfach publiziert und davor erforscht, (Chaudhary et al in press)  
15 ohne dass die „Begeisterung“ für die Patientenverfügung und damit für Herbeiführung  
16 des Todes in der kritischen Situation geschmälert wurde. Allerdings kann der gelähmte  
17 Patient dann, wenn er kein BCI zur Verfügung hat, nichts mehr gegen das  
18 herbeigeführte Sterben und Tod unternehmen! Ein kürzlich von einem Psychiater  
19 veröffentlichte Studie von 21.000 getöteten Patienten pro Jahr ist natürlich schwer zu  
20 überprüfen, dürfte aber von der Realität nicht weit entfernt sein  
21 (<http://www.zeit.de/2017/14/krankenhaeuser-tote-patienten-ursachen-karl-beine>).

22 Die Anwendung von BCIs bei kommunikationsgestörten Patienten, wird das Problem  
23 nicht lösen, aber kann zumindest mehr Transparenz durch Kommunikation in diese  
24 erschreckende Situation bringen.

25 Umgekehrt besteht bei Anwendung der Neuroprothetik und BCI durchaus die Gefahr  
26 der Einschränkung der Entscheidungsautonomie, Datensicherheit und Eingriffen in  
27 Privatsphäre und Wecken von unrealistischen Erwartungen bei einer neuen  
28 Technologie. Durch die direkte Verbindung des Gehirns mit Computer und Maschinen  
29 kann die Willenskontrolle und damit Verantwortlichkeit des Benutzers von BCI massiv  
30 eingeschränkt und im Extremfall auch suspendiert werden. Der Grossteil der

1 elektrischen und metabolischen Hirnvorgänge, die der BCI Steuerung zugrunde liegen  
2 und Verhalten und Denken steuern, sind der bewussten Kontrolle und dem Bewusstsein  
3 nicht zugänglich. Mit der raschen Entwicklung neuer Sensoren und maschinellen  
4 Intelligenz und KI wird aber „Gedankenlesen“ sehr rasch von einer futuristischen  
5 Angstvorstellung zur täglichen Realität werden. Dies bedeutet, dass wir bei der  
6 Verbindung unseres Gehirns mit einer Maschine oder Computer wesentliche Teile  
7 unserer Willenskontrolle an das BCI abgeben. Es sollte u.a. darauf gedrungen werden,  
8 dass BCIs in allen Fällen über ein „Stop“-Signal über einen Hirnschalter verfügen,  
9 indem die betroffene Person mit einer bewusst über eine Hirnreaktion herbei geführten  
10 willentlichen Reaktion, z.B. in dem sie lernt, ein bestimmtes Hirnpotenzial mit einer  
11 Vorstellung zu aktivieren, die Weiterleitung der Hirnantworten unterbrechen kann.

12 Die Hersteller von BCI-tauglichen Geräten muessten verpflichtet werden, nicht nur  
13 solche Stop-Signale vorzusehen, sondern das System auch vor Eingriffen von Aussen  
14 („Hacking“) zu schützen. Bisher kann man dagegen eine erschreckende  
15 Verantwortungslosigkeit mancher Hersteller feststellen, welche die Unkenntnisse der  
16 Nutzer und die Tatsache, dass die meisten Hirnprozesse nicht spürbar und daher  
17 Eingriffe vom Nutzer nicht wahrgenommen werden können und bisher der Gesetzgeber  
18 sich um das Problem nicht gekümmert hat, für ihre Profitinteressen nutzen. Wir haben  
19 einen besonders schweren Fall des österreichischen BCI Herstellers Guger  
20 dokumentiert, bei dem ein völlig untaugliches System in einem Open Access Forum für  
21 Gelähmte, Bewusstseinsgestörte und Locked-In Patienten angepriesen wird. Ähnliches  
22 lässt sich auch für das oben erwähnte kalifornische Emotive System sagen.  
23 Unbegrenzter Verkauf und Anbieten von BCI tauglichen Systemen sollte ähnlichen  
24 gesetzlichen Vorgaben unterliegen wie Arzneimittel, wenngleich das  
25 Missbrauchspotenzial bei BCI z.Z. noch vernachlässigbar, bei häufigem Gebrauch aber  
26 potentiell sogar grösser ist. Keiner dieser Hersteller wurde bisher gerichtlich belangt,  
27 was angesichts der Fülle der im Netz vorhandenen unseriösen und gefährlichen  
28 Angebote schwierig ist.

29 Keines der vorhandenen BCI Systeme ist ausreichend vor Eingriffen und unbefugtes  
30 Auslesen von Hirndaten gesichert, was angesichts der bisher nur seltenen von Patienten

1 und Forschern genutzten Systeme heute noch nicht akut ist, bei weit gestreuter Nutzung  
2 aber in Zukunft eine ausserordentliche Gefahr darstellt: man stelle sich einen gelähmten  
3 Politiker oder Militär oder Chirurgen etc vor, dessen Neuroprothese und dort  
4 übertragenen Hirnfunktionen von Aussen beeinflusst und verändert werden! Ein  
5 Medikament muss zumindest willentlich eingenommen werden oder die Einnahme  
6 erzwungen werden. Die Beeinflussung eines BCI z.B. über eine Bluetooth drahtlose  
7 Verbindung vom Gehirn zum Computer z.B. kann völlig unbemerkt erfolgen und kann  
8 die Willenshandlungen ohne Zutun des Bewusstseins manipulieren; wie Robert Musil  
9 das in seiner sarkastischen Feststellung über die Willensfreiheit im „Mann ohne  
10 Eigenschaften“ meinte: Die Willensfreiheit ist die Fähigkeit des Menschen freiwillig zu  
11 tun was er unfreiwillig will. Vermutlich gilt auch für die BCI-Forschung des  
12 Philosophen Günther Anders Feststellung, dass der „Mensch mehr herstellen als er sich  
13 vorstellen kann“.

14 Zum Problem der „Entgrenzung“ des „Ichs“ und des eigenen Körpers durch Neuropro-  
15 thesen ist zu sagen, dass unser Hirn die mit ihm verbundenen Exekutivorgane und -  
16 prothesen, dann als Teil seines Kontrollbereichs („Körper“) eingliedert, wenn die damit  
17 erzielten Effekte kontinuierlich und vorhersagbar zu einer assoziativen Verbindung  
18 zwischen beabsichtigter Handlung (Intention) und dem erwarteten Effekt, der  
19 erwarteten positiven Konsequenz führt. Wir konnten z.B. zeigen, dass bei Menschen mit  
20 Phantomschmerzen die Handprothese als eigene Hand wahrgenommen wird und die  
21 Schmerzen verschwinden, wenn die Prothese die im Hirn angestossenen Befehle korrekt  
22 umsetzt und das gewünschte Ziel (z.B. Glas greifen) sofort erreicht (Lotze et al, 2001).  
23 Es gilt bei diesen körperlichen Entgrenzungen auch das Hebbsche Assoziationsprinzip,  
24 das für fast alle Nervenzellen des Gehirns und das Gedächtnis gilt (Hebb, 1949).  
25 Ansonsten werden klar vom Körper abgehobene Neuroprothesen auch nicht anders  
26 „behandelt“ als häufig benutzte Geräte als das drahtlose Telefon („handy“).

## 27 *Literatur*

28 Birbaumer, N., Ruiz, S., Sitaram, R. (2013). Learned regulation of brain metabolism. Trends in Cognitive  
29 Sciences, TICS, 17, 6, 295-302.

- 1 Buch, E., Weber, C., Cohen, L.G., Braun, C., Dimyan, M., Ard, T., Mellinger, J., Caria, A., Soekadar, S.,  
2 Fourkas, A., Birbaumer, N. (2008). Think to move: a neuromagnetic brain-computer interface  
3 (BCI) system for chronic stroke. *Stroke*, 39, 910-917.
- 4 Buch, E.R., Shanechi, A.M., Fourkas, A.D., Weber, C., Birbaumer, N., Cohen, L.G. (2012).  
5 Parietofrontal integrity determines neural modulation associated with grasping imagery after  
6 stroke. *Brain*, 135, 596-614.
- 7 Capogrosso, M., Milekovic, T., Borton, D., Wagner, F., Moraud, E. M., Mignardot, J.-B., ... Courtine, G.  
8 (2016). A Brain–Spinal Interface Alleviating Gait Deficits after Spinal Cord Injury in Primates.  
9 *Nature*, 539(7628), 284–288. <http://doi.org/10.1038/nature20118>
- 10 Cervera, M.A., Soekadar, S.R., Ushiba, J., Millán, J., Liu, M., Birbaumer, N., Garipelli, G. (submitted).  
11 Brain-Computer Interfaces for Post-Stroke Motor Rehabilitation: A Meta-Analysis.
- 12 Chaudhary, U., Rana, A., Ohry, A., Birbaumer, N. (submitted). Why is Quality of Life Satisfactory in  
13 Severe Paralysis and Locked-in Syndrome? *Nature Rev Neurol*.
- 14 Chaudhary, U., Xia, B., Silvoni, S., Cohen, L.G., Birbaumer, N. (2017). Brain-Computer Interface-based  
15 Communication in the Completely Locked-in State. *PLOS BIOLOGY*, 15, 1, e1002593.
- 16 Chaudhary, U., Birbaumer, N., Ramos-Murguialday, A. (2016). Brain-Computer interface for  
17 communication and rehabilitation. *Nature Review Neurology*, 12, 9, 513-525.
- 18 Clausen, J., Fetz, E., Donoghue, J., Ushiba, J., Spörhase, U., Chandler, J., Birbaumer, N., Soekadar, S.R.  
19 (2017). Help, Hope and Hype: Ethical Dimensions of Neuroprosthetics. *Science*, 356, 6345, 1338-  
20 1339.
- 21 Collinger, J. L., Wodlinger, B., Downey, J. E., Wang, W., Tyler-Kabara, E. C., Weber, D. J., ...  
22 Schwartz, A. B. (2013). 7 degree-of-freedom neuroprosthetic control by an individual with  
23 tetraplegia. *Lancet*, 381(9866), 557–564. [http://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)61816-9](http://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61816-9)
- 24 Dockery, C., Hueckel-Weng, R., Birbaumer, N., Plewnia, C. (2009). Enhancement of planning ability by  
25 transcranial direct current stimulation. *Journal of Neuroscience*, 29, 2, 7271-7277
- 26 Feld, G.B., Born, J. (2015). Neuroscience. Exploiting sleep to modify bad attitudes. *Science*, 348, 6238,  
27 971-2
- 28 Flor, H., & Turk, D. C. (2011). Chronic pain. An integrated biobehavioral approach. Seattle, WA: IASP  
29 Press.
- 30 Gallegos-Ayala, G., Furdea, A., Takano, K., Ruf, C.A., Flor, H., Birbaumer, N. (2014). Brain  
31 communication in a completely locked-in patient using bedside near-infrared spectroscopy.  
32 *Neurology*, 82, 1-3.
- 33 Hettich, D.T., Bolinger, E., Matuz, T., Birbaumer, N., Rosenstiel, W., Spüler, M. (2016). EEG Responses  
34 to Auditory Stimuli for Automatic Affect Recognition. *Frontiers in Neuroscience*. June 2016, Vol.  
35 10, Article 244.
- 36 Hochberg, L.R., Bacher, D., Jarosiewicz, B., Masse, N.Y., Simeral, J.D., Vogel, J., Haddadin, S., Liu, J.,  
37 Cash, S.S., van der Smagt, P., Donoghue, J.P. (2012). Reach and grasp by people with tetraplegia  
38 using a neurally controlled robotic arm. *Nature*, 485 (7398), 372-5. doi: 10.1038/nature11076.
- 39 Hochberg, L.R., Serruya, M.D., Friehs, G.M., Mukand, J.A., Saleh, M., Caplan, A.H., Chen, D., Penn,  
40 R.D., Donoghue, J.P. (2006). Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with  
41 tetraplegia. *Nature*, 442(7099), 164-71. Das da
- 42 Kotchoubey, B., Strehl, U., Uhlmann C., Holzapfel, S., König, M., Fröscher, W., Blankenhorn, V.,  
43 Birbaumer, N. (2001). Modification of slow cortical potentials in patients with refractory epilepsy:  
44 a controlled outcome study. *Epilepsia*, 42, 3, 406-416.
- 45 Kotchoubey, B., Lang, S., Baales, R., Herb, E., Maurer, P., Mezger, G., Schmalohr, D., Bostanov, V.,  
46 Birbaumer, N. (2001) Brain potentials in human patients with extremely severe diffuse brain  
47 damage. *Neuroscience Letters*, 301, 37-40.

- 1 Milekovic, T., Sarma, A.A., Bacher, D., Simeral, J.D., Saab, J. et al (in press). Stable long-term BCI-  
2 enabled communication in ALS and locked-in syndrome using LFP signals. *J Neurophysiol*.
- 3 Lotze, M., Flor, F., Grodd, W., Larbig, W., Birbaumer, N. (2001). Phantom movements and pain: an  
4 fMRI study in upper limb amputees. *Brain*, 124, 2268-2277.
- 5 Murata, Y., Higo, N., Hayashi, T., Nishimura, Y., Sugiyama, Y., Oishi, T., Tsukada, H., Isa, T., Onoe, H.  
6 (2015). Temporal Plasticity involved in Recovery from Manual Dexterity Deficit after Motor  
7 Cortex Lesion in Macaque Monkeys. *J Neurosci*, 35(1), 84-95.
- 8 Ramos-Murguialday, A., Broetz, D., Rea, M., Läer, L., Yilmaz, Ö., Brasil, F., Liberati, G., Curado, M.,  
9 Garcia-Cossio, E., Vyziotis, A., Cho, W., Agostini, M., Soares, E., Soekadar, S., Caria, A. Cohen,  
10 L.G., Birbaumer, N. (2013). Brain-machine-interface in chronic stroke rehabilitation: a controlled  
11 study. *Annals of Neurology*, 74, 100-108.
- 12 Ruiz, S., Birbaumer, N., Sitaram, R. (2013). Abnormal neural connectivity in schizophrenia and fMRI-  
13 brain computer interface as a potential therapeutic approach. *Frontiers in Psychiatry*, 4: 17. doi:  
14 10.3389.
- 15 Ruiz, S., Birbaumer, N., Sitaram, R. (2016). Editorial: Learned brain self-regulation for emotional  
16 processing and attentional modulation: from theory to clinical applications. *Frontiers in Behavioral*  
17 *Neuroscience*, doi:10.3389, March 2016, Vol. 10, Art. 62.
- 18 Sitaram, R., Ros, T., Stoeckel, L., Haller, S., Scharnowski, F., Lewis-Peacock, J., Weiskopf, N., Blefari,  
19 M.L., Rana, M., Oblak, E., Birbaumer, N., Sulzer, J. (2017). Closed-loop Brain Training: The  
20 Science of Neurofeedback. *Nature Review Neuroscience*, 18, 86-100.
- 21 Vansteensel, M.J., Pels, E.G.M., Bleichner, M.G., Branco, M.P., Denison, T., Freudenburg, Z.V. et al  
22 (2016). Fully Implanted Brain-Computer Interface in a Locked-In Patient with ALS. *N Engl J*  
23 *Med*, 375 (21), 2060-2066.
- 24 Zaidi, A.D., Munk, M., Schmidt, A., Risueno-Segovia, C., Bernard, R., Fetz, E., Logothetis, N.,  
25 Birbaumer, N., Sitaram, R. (2015). Simultaneous epidural functional Near-Infrared Spectroscopy  
26 and cortical electrophysiology as a tool for studying local neuro-vascular coupling in primates.  
27 *NeuroImage*, 120, 394-399.
- 28

Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Unsere gemeinsame digitale Zukunft“  
Berlin: WBGU  
Verfügbar im Internet unter [www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/unsere-gemeinsame-digitale-zukunft#sektion-expertisen](http://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/unsere-gemeinsame-digitale-zukunft#sektion-expertisen)

Autoren: Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Niels Birbaumer  
Institut für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie der Universität Tübingen  
Titel: Technologien und Visionen der Mensch-Maschine-Entgrenzung  
Berlin, 2017

Die vorliegende Expertise wurde im Jahr 2017 in Auftrag gegeben und bearbeitet. Angesichts des Redaktionsschlusses am 12.04.2019 erfolgte die Einarbeitung der Expertise somit vor der im April 2019 bekannt gewordenen Untersuchung der Universität Tübingen. Die Untersuchungskommission hat nach Überprüfung wissenschaftliches Fehlverhalten bezüglich einer auch der Expertise zu Grunde liegenden Veröffentlichung in PLoS Biology „Brain-computer interface-based communication in the completely locked-in state“ (Chaudhary et al., 2017) festgestellt (<https://uni-tuebingen.de/universitaet/aktuelles-und-publikationen/pressemitteilungen/newsfullview-pressemitteilungen/article/untersuchungskommission-stellt-wissenschaftliches-fehlverhalten-durch-tuebingen-hirnforscher-fest/>).

Das WBGU-Gutachten bezieht sich jedoch im Wesentlichen auf die Einschätzungen des Forschungsstands und nicht die eigene Forschung von Prof. Dr. Birbaumer und Kollegen. Insofern geht der WBGU, vorbehaltlich der Ergebnisse weiterer Prüfungen, auch angesichts ähnlicher Einschätzungen anderer Fachautor\*innen zu betreffenden Themengebieten zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht davon aus, dass entsprechende inhaltliche Revisionen nötig sind.

#### **Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU)**

Geschäftsstelle  
Luisenstraße 46  
10117 Berlin

Telefon: (030) 26 39 48 0  
E-Mail: [wbgu@wbgu.de](mailto:wbgu@wbgu.de)  
Internet: [www.wbgu.de](http://www.wbgu.de)  
🐦@WBGU\_Council

Alle Gutachten können von der Internet-Webseite  
<https://www.wbgu.de/de/publikationen/alle-publikationen>  
heruntergeladen werden.