



BEYOND PERCEPTION

NEUERFINDUNG DER MINDMACHINE

Christopher Pietsch & Luis Grass

BEYOND PERCEPTION

NEUERFINDUNG DER MINDMACHINE

Bachelorarbeit zur Erlangung des
akademischen Grades *Bachelor of Arts*.

Christopher Pietsch & Luis Grass
Interfacedesign – FH Potsdam, 2014

INHALT

EINLEITUNG

05 – Abstract

06 – Über diese Arbeit

QUELLEN- VERZEICHNIS

90 – Literaturverzeichnis

96 – Bilderverzeichnis

THEORIE

Die Vermessung des Gehirns

10 – Mission Gehirn

12 – Neurotechnik und Brain Computer Interfaces

14 – Invasion der Elektroden

17 – Lichtschalter für Neuronen

Neurotechnik im Wandel

20 – Status und Neurohype

22 – Crowdsourcing durch DARPA

24 – Open Ephys / Open BCI

26 – Produkte und Werkzeuge

Interpretation des Bewusstseins

33 – EEG- Fenster ins Hirn

34 – Bedeutung der Frequenzbänder

37 – Die individuelle Alpha Frequenz

38 – Theta - Twilight State

Techniken der Hirnstimulation

42 – Neurofeedback

44 – Nicht-invasive Methoden

47 – Audiovisuelles Entrainment

Licht und Ton als Interface

50 – Evolution der Mindmachines

58 – Visuelle Stimulation

62 – Auditive Stimulation

PRAXIS

Neuerfindung der Mindmachine

66 – Maker Brain Machine

68 – EEG Brain Machine Experiment

70 – Brainstatesharing

Ausblick auf die praktische Arbeit

85 – Ausblick

86 – Resonanz

86 – Selbstregulation

87 – Adaption

ABSTRACT

In den letzten dreißig Jahren hat es ein explosionsartiges Wachstum in der Gehirn-Forschung gegeben, so dass heute mit den neuesten neuro-wissenschaftlichen Entdeckungen die Annäherung an existenzielle Themen möglich wird, die seit Jahrhunderten exklusiver Bereich der Humanwissenschaften waren. Man ist nun in der Lage, die zerebrale Anatomie abzubilden und mit einer Reihe von bildgebenden Verfahren zu lokalisieren. Diese Technologien ermöglichen es direkt zu beobachten, welche Hirnbereiche an einer Vielzahl von wahrnehmenden, exekutiven und kognitiven Aufgaben beteiligt sind. Mit dem wissenschaftlichen Fortschritt geht die Öffnung der Technologie im nicht wissenschaftlichen Bereich sowie die Entwicklung der Methoden und Anwendungen von Brain Computer Interfaces (BCI) einher. Günstige und für die breite Masse zugängliche EEG Geräte senken die Hemmschwelle und vereinfachen den kreativen Umgang mit dem Auslesen von Gehirnwellen.

Auf diese Entwicklung aufbauend, wird in der folgenden Arbeit dargestellt, wie erprobte Stimulationstechniken genutzt werden können um einen Kommunikationskanal für die Selbstexploration zu öffnen. Hierfür wird mit Hilfe eines portablen EEG Headsets die eigene Hirnaktivität als Quelle zur Veränderung einer audiovisuellen Stimulation genutzt. Somit kann das passive Konsumieren von Mindmachines in ein interaktives Erlebnis transformiert werden.

ÜBER DIESE ARBEIT

Seitdem wir uns 2011 im Kurs „Messing with our Minds“ an der FH Potsdam unter der Leitung von Willy Sengewald mit der Visualisierung und Manipulation von Gehirnwellen durch audiovisuelle Stimulation beschäftigten, haben wir unser Projekt „Brainstatesharing“ kontinuierlich weiterentwickelt, auf Festivals aufgebaut und dabei wichtige Erfahrungen gesammelt.

Der Titel „Beyond Perception“ ist die logische Konsequenz aus unserer Projektentwicklung und bezieht sich nun auf den individuellen Wahrnehmungsprozess der entstehenden inneren Bilder, die bei der Anwendung unserer Mindmachines mit geschlossenen Augen gemacht werden. Die erzeugte Perzeption ist nicht nur das subjektive Ergebnis des Wahrnehmungsvorgangs, vielmehr liegen ihr neurophysiologische Prozesse zugrunde. Die damit verbundenen unbewussten und emotionalen Vorgänge wollen wir genauer untersuchen und verstehen. Die wissenschaftliche Auseinandersetzung soll uns dabei helfen, Faktoren für die Verfeinerung der audiovisuellen Stimulation zu definieren und in Experimenten

zu evaluieren. Wir wollen das passive Konsumieren von Mindmachines in ein interaktives Erlebnis transformieren. In Verbindung mit einem portablen EEG Headset kann die eigene Hirnaktivität als Quelle zur Veränderung der Stimualtion dienen.

Daneben ist es für unsere Neuentwicklung der Mindmachine essentiell herauszufinden, wie Gehirnwellen in eine audiovisuelle Stimulation übersetzt werden können. Um diesen Fragen auf den Grund zu gehen werden wir in unserer Arbeit zunächst einen Einblick in den aktuellen Wettlauf um die Entschlüsselung des Gehirns geben und ein Gefühl für den rasanten Fortschritt der Technologie in Neurowissenschaften, Neurotechnik und BCI vermitteln. Wir werden die Trends der Neurotechnik beleuchten und ihren kulturellen Wandel zur Öffnung der Technologien aufzeigen.

Um zu verstehen, wie wir Hirnaktivität messen können und welche Frequenzbänder für unser Anliegen besonders geeignet sind, werden EEG-Grundlagen erklärt. Im Anschluss geben wir einen Überblick über die unterschiedlichen Techniken der Hirnstimulation mit Schwerpunkt auf audiovisuelle Stimulation, die die Grundlagen und Funktionsweise der Mindmachine erläutern. Darüber hinaus wird im Hinblick auf die Neuerfindung der Mindmachine, deren Entstehungsgeschichte aufgezeigt und visuelle, sowie auditive Stimulation geschichtlich betrachtet.

Nachfolgend wird im praktischen Teil der Arbeit unser gemeinsamer Prozess vom ersten Prototypen, über die Installation bei der Langen Nacht der Wissenschaften, sowie die Feldstudien und Erfahrungen auf Festivals in den folgenden drei Jahren beschrieben. Abschliessend wird ein Ausblick auf unsere vorstellbare praktische Arbeit gegeben, in dem Ansätze und Ideen beschrieben werden, wie wir durch die Implementierung neuer Hardware die Funktionsweise der Mindmachine neu entwickeln und mit der Durchführung verschiedener Experimente neue Erkenntnisse erlangen können.

Für uns als Interface Designer ist dieses Thema besonders spannend, weil Brain-Computer Interfaces (BCIs) eine Vielzahl von interdisziplinären Bereichen berührt. In unserer Ausgestaltung soll ein neues BCI durch erfahrbar gemacht werden. Mit Hilfe dieser Arbeit wollen wir im kreativen Umgang mit Technologie einen Kommunikationskanal zum eigenen Gehirn gestalten, der den Zugang zur Selbstexploration öffnet.

DIE VER- MESSUNG DES GEHIRNS

Wie organisieren sich Milliarden Neuronen zu einem funktionierenden Ganzen? Neurowissenschaftler versuchen, mit Hightech-Werkzeugen aus z.B. Nanotechnik, Optik und Genetik die Vorgänge im Gehirn zu messen, um zum einen hochaufgelöste Karten des Gehirns zu erstellen und zum anderen einzelne Zellen abzuhorchen oder so zu manipulieren, dass sie ihre Funktion preisgeben. Im folgenden Kapitel wird ein Einblick in die Forschung und die für unsere Arbeit relevanten Fortschritte gewährt.



Abb. 1
Axone und Dendriten in
einer kortikalen Spalte, die
modulare Untereinheit des
Neokortex von Säugetieren.

MISSION GEHIRN

Seit ca. 30 Jahren arbeiten Wissenschaftler daran, eine direkte Verbindung zwischen dem Gehirn und einem Computer herzustellen, um einen Kommunikationskanal zu öffnen, mit dem auf nicht muskuläre Art und Weise Informationen mit der Außenwelt ausgetauscht werden können, bisher mit nur mäßigem Erfolg.¹

Neuen Schwung erhielt das Forschungsgebiet der Neurotechnik durch ein milliardenschweres Förderprogramm der EU (Human Brain Project²), der USA (BRAIN³) und China (Brainetome⁴) im Jahr 2013. „Die Entschlüsselung des Gehirns ist die große intellektuelle Herausforderung des 21. Jahrhunderts!“⁵, so beschreibt Bill Newsome, Neurobiologe an der Stanford University School Medicine, das zukunfts-trächtige Gebiet. Das Ziel dieser Großprojekte ist es, das gesamte Netzwerk des menschlichen Hirns zu kartieren, um sämtliche Hirnvorgänge in Großrechnern zu simulieren. Da bislang die exakte Simulation eines einzigen Neurons scheiterte, wird der hohe finanzielle Aufwand von manchen Forschern kritisiert und der Erfolg infrage gestellt. Jedoch hat der technologische Fortschritt den Neurowissenschaftlern im Laufe der Jahre immer neue Hightech-Werkzeuge beschert⁶, mit dem das Gehirn in einem nie da gewesenen Detailgrad vermessen und stimuliert werden kann. Die Aussage Konrad Kordings von der Northwestern University in Chicago: „In einer

halben Minute produziert das menschliche Gehirn etwa genau so viel Daten wie das Weltraumteleskop Hubble in seiner gesamten Lebenszeit“⁷ zeigt, dass das menschliche Gehirn eine innere Komplexität besitzt, die dem des Universums gleich kommt, und dass dessen Entschlüsselung unglaublicher Anstrengung bedarf.

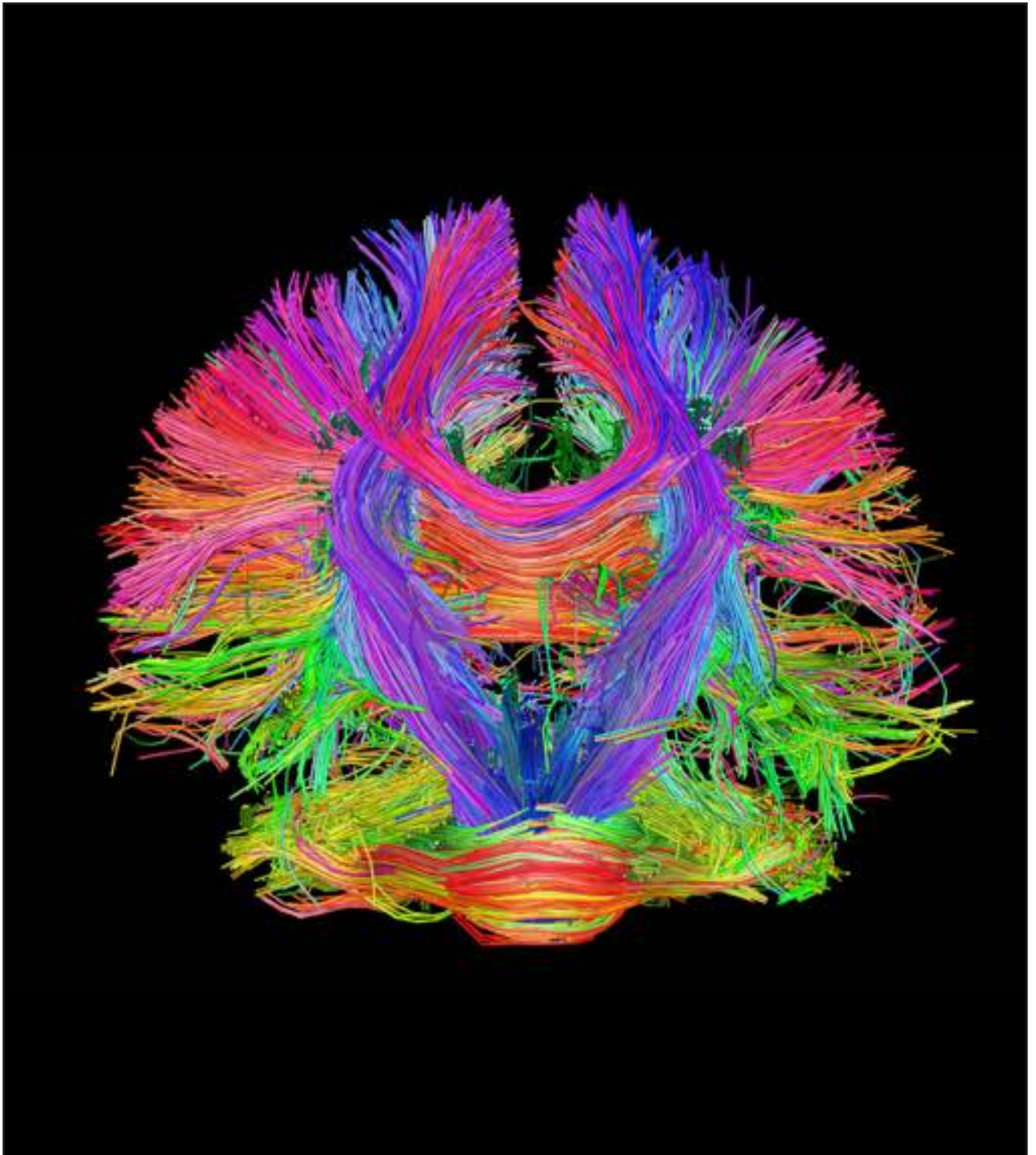


Abb. 2
Eine Karte der Verbindungen
in einem menschlichen
Gehirn

NEUROTECHNIK UND BRAIN COMPUTER INTERFACES

Der technologische Fortschritt hat den Neurowissenschaftlern im Laufe der Jahre immer neue High-tech-Werkzeuge beschert, mit dem das Gehirn in einem nie da gewesenen Detailgrad vermessen und stimuliert werden kann. Nur wenige Entwicklungen verlassen Labore und Forschung, um in Form von Anwendungen für die breite Masse zugänglich zu werden. Das wohl bekannteste ist das Brain Computer Interface (BCI), das die Verbindung zwischen Gehirn und Computer beschreibt und damit eine Anwendung der Neurotechnik darstellt. Dabei wird die Steuerung eines Computers mit der Kraft der Gedanken z.B. als Assistenzsystem im Auto, bei diversen Spielanwendungen oder zur Steuerung einer Prothese mit Gehirnströmen verwendet.

Bei der Neurotechnik werden Methoden und Ansätze aus den Neurowissenschaften, der Neurologie, Neurochirurgie, Elektrotechnik, Signalverarbeitung, Automatisierungstechnik, Informatik sowie Nanotechnik benutzt, um die Funktion des Nervensystems zu erforschen.⁸ BCIs messen und interpretieren die elektrische oder hämodynamische, d.h. die Bewegung des Blutes betreffende, Aktivität des Gehirns. Die elektrische Aktivität ist durch die nicht invasive Elektroenzephalografie (EEG), die ab Seite 33 genauer dargestellt wird, oder durch implantierte Elektroden messbar. Die hämodynamische Aktivität ist durch bildgebende Verfahren wie die funktionelle

Magnetresonanztomographie (fMRT) oder die Nahinfrarotspektroskopie messbar.⁹ Die meisten BCIs benutzen EEGs als Input, weil es tragbar und günstig im Betrieb ist. Die Öffnung der wissenschaftlichen Ergebnisse, Methoden und Anwendungen für die nicht wissenschaftliche Welt bescherte der Mensch-Maschine-Schnittstelle enorme Aufmerksamkeit. Das mobile EEG Emotiv Eloc aus dem Jahre 2008 läutete eine neue Zeitrechnung der BCIs auf dem Konsumgütermarkt ein. Es war das erste der breiten Masse zugängliche EEG. Zwar kommt es bei weitem nicht an die Genauigkeit klinischer Geräte heran¹⁰, jedoch ist es durch seinen relativ geringen Preis und seine einfache Bedienbarkeit für einen breiten Anwenderkreis nutzbar. Mittlerweile gibt es 14 verschiedene BCIs auf dem Verbrauchermarkt zu kaufen - alle mit EEG-Technologie.



Abb. 3
Durch Gehirnwellen gesteuerte Prothese.



Abb. 4
Bei dem Projekt „Brain Driver“ der Forschergruppe Autonomos, kann ein Auto durch die Kraft der Gedanken gelenkt werden.

INVASION DER ELEKTRODEN

Um die neuronale Aktivität von kognitiven und emotionalen Vorgängen zu untersuchen, werden seit geraumer Zeit Hirnaufnahmen auf nicht invasive Weise gemacht. Allerdings stoßen diese Werkzeuge an ihre Grenzen und die unzureichende Genauigkeit und Auflösung abhörbarer Neuronen veranlasst die Forscher zu neuartigen invasiven Methoden. Das so genannte „Direct Brain Recording“, bei dem Elektroden direkt ins Gehirn gelegt und deren Aktivität relativ störungsfrei und in Echtzeit aufgezeichnet werden, stellt zur Zeit das am schnellsten wachsende Gebiet der Neurowissenschaften dar. Die limitierenden Faktoren des EEG werden beim Direct Brain Recording umgangen, da die Elektroden direkten Kontakt mit Neuronen haben. Die Anwendung am Menschen ist jedoch nur temporär im Rahmen der Behandlung von Epilepsie zugelassen. Die Zeit, in denen die Elektroden im Hirn des Patienten liegen, um das Areal zu lokalisieren, von dem die Epilepsie ausgeht, nutzen Wissenschaftler zur Entschlüsselung der Funktionsweise des Hirns.

In Amerika wird dieses Gebiet von der Regierung Obama im Rahmen der BRAIN Initiative aktiv gefördert. Erst kürzlich ging eine 90 Millionen Investition der Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) an 2 Universitäten, um die Entwicklung von Gehirnimplantaten zur Gedächtnismanipulation voranzutreiben. Ziel ist es, neue Behandlungsmethoden z. B. zur Traumabewältigung zu entwickeln.

In einer Studie mit Anwendung dieser Technik von der University of California, San Francisco konnten z. B. 12 Areale im Gehirn lokalisiert werden, die dazu genutzt werden, um Sinn aus Wörtern und Sätzen zu bilden.¹¹

In einem anderem Experiment an der University of California, Los Angeles wurden die Elektroden nicht

nur passiv als Input, sondern auch aktiv als Output benutzt. Dabei wurde ein Bereich in der Nähe des Hippocampus durch elektrische Potentiale stimuliert, um eine erhöhte Erinnerungsleistung zu erzielen.¹²

Diese Art der Elektrodenmessung bringt allerdings noch erhebliche Schwierigkeiten mit sich, da selbst die haarfeinen Kabel das Gewebe verletzen können und vom Körper nach einer Weile abgestoßen werden. Jedoch macht die Herstellung solcher Elektroden große Fortschritte und die Anzahl der Neuronen, die sich abhören lassen, verdoppelt sich seit den 1950er Jahren alle sieben Jahre. Hunderte Neuronen können mittlerweile gleichzeitig ins Visier genommen werden und mit Hilfe der Nanotechnologie gibt es schon die ersten kabellosen, miniaturisierten Sonden. Ein Prototyp dieser Technologie ist die ein Zentimeter lange und hauchdünne „Neuroprobe“ von der Forschungsorganisation Imec.¹³

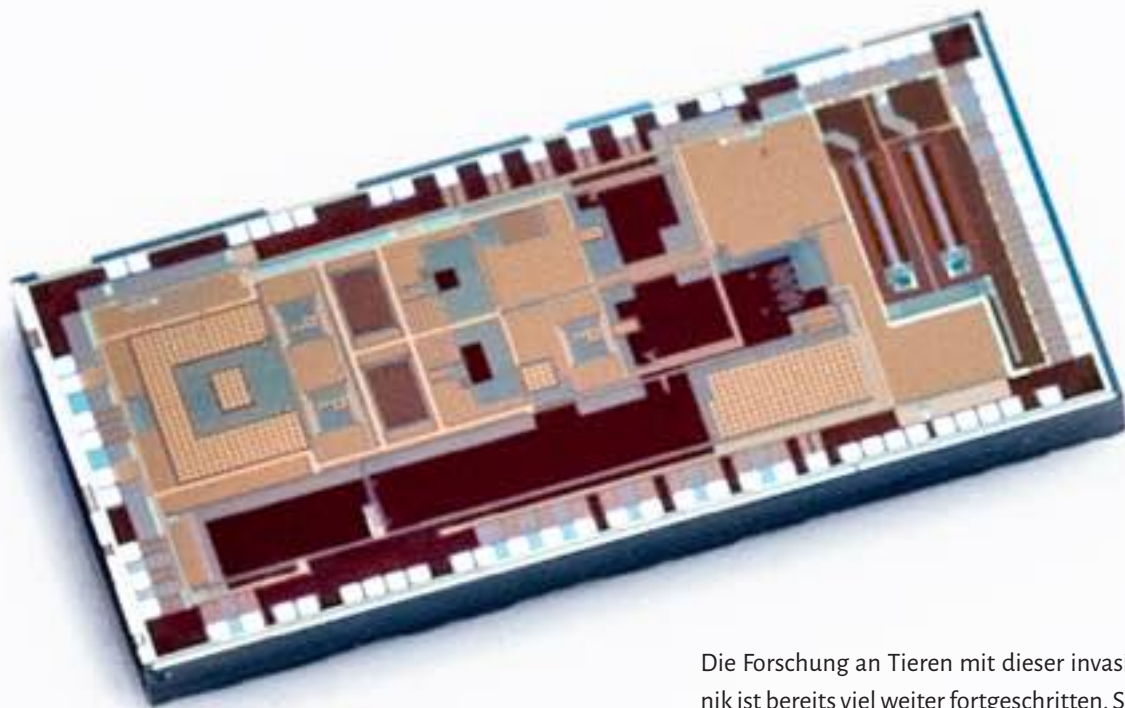


Abb. 5
Neuroprobe, ein implantier-
barer Low-Power-Einzelka-
nal-Elektrokardiographie
(EKG) Chip

Die Forschung an Tieren mit dieser invasiven Technik ist bereits viel weiter fortgeschritten. So zeigt die Arbeit von Miguel Nicolelis an der Duke University in Durham an einem Affen, dass dieser nach einer Reihe von Experimenten einen Roboterarm alleine durch die Kraft seiner Gedanken präzise steuern konnte.¹⁴

Auch wenn diese Technik sehr genaue Daten aus dem Gehirn liefert, sind wir noch weit davon entfernt, „die geheime Sprache des Gehirns zu sprechen“, wie es Dr. Anthony Ritaccio von der Albany Medical Center in New York ausdrückt.¹⁵



Abb. 6
Maus mit implantierten
Lichtleiter zur Stimulation
von genetisch veränderten
Neuronen

LICHTSCHALTER FÜR NEURONEN

Um ein tieferes Verständnis von dem zu erlangen, was das Gehirn wirklich tut, wurde die Hypothese aufgestellt, dass das Licht als Steuerungsinstrument bei der Stimulierung der Schaltung des Gehirns dienen könnte.

Diese Methode wird Optogenetik genannt. Das Gebiet ist ein Mix aus optischen Technologien und Genetik und wird momentan offiziell nur bei Tieren eingesetzt. Sie erlaubt es Forschern, mit extremer Präzision die Aktivität von Nervenzellen zu kontrollieren.¹⁶ Dabei werden gezielt Neuronen durch Licht an- oder ausgeschaltet.¹⁷ Den Neuronen wurden zuvor durch Gentherapie bestimmte lichtempfindliche Proteine eingebaut, die bei Stimulation mit blauem Licht die Zelle dazu veranlassen, ein Aktionspotential aufzubauen. Um die Aktivität eines Neuron zu unterdrücken, wird das Ionen-Pumpen-Protein Halorhodopsin in das Neuron eingeschleust, welches durch grünes Licht aktiviert wird.¹⁸ Die genetisch veränderten Gehirnzellen sind aber noch zu mehr fähig: Es ist auch möglich die Neuronen so zu modifizieren, dass sie Licht bei Aktivität emittieren. Dadurch können Prozesse im Hirn sichtbar gemacht werden.¹⁹

Optogenetik wurde von der Fachzeitschrift Nature zur „Methode des Jahres 2010“ gekürt und von der Fachzeitschrift Science als „Breakthroughs of the Decade“²⁰ bezeichnet. Das Gebiet hat viele Anwendungsmöglichkeiten, zum Beispiel um den Tremor bei Parkinson zu mildern oder um bislang undenkbar detaillierte Einblicke in die Arbeitsweise des Nervensystems und des Gehirns zu bekommen. Auch die Gentherapie zur Wiederherstellung der Sehleistung bei Blinden ist denkbar und wurde bereits bei Ratten erfolgreich erprobt.²¹ Während Pharmazeutika dazu neigen, das gesamte Hirn zu fluten und eine direkte Stimulierung mittels Elektroden

bisher auch noch benachbarte Neuronen erfasst, schafft es die Optogenetik in einem ultrapräzisen Verfahren lediglich, jene Neuronen oder spezifische Gehirnteile zu erreichen, die zu behandeln wären, sei es aufgrund einer Erkrankung oder zur kognitiven Stimulierung.

Einerseits versprechen diese Methoden der Neurotechnik neue Erkenntnisse über die Arbeitsweise des Gehirns, andererseits ist die Genmanipulation von Gehirnzellen ausserhalb der wissenschaftlichen Community unvorstellbar und wirft eine Reihe von ethischen Fragen auf. Noch werden die Versuche auf Nervenzellen von Fruchtfliegen, Mäusen und Fischen beschränkt, einige Ärzte gehen allerdings davon aus, dass in drei bis zehn Jahren erste Experimente an menschlichen Neuronen durchgeführt werden können. Solche extremen Entwicklungen sind ein gutes Beispiel für die Bereitwilligkeit zur schnellen Evolution von Technologie im Bereich der Neurowissenschaften, aber auch ein Zeichen für die Ungleichmäßigkeit in der Forschung. Auch wenn wir ähnliche Prinzipien wie die Stimulation durch Licht benutzen, ist Pionierarbeit eine Frage der Definition und die Lücke zwischen neurowissenschaftlichen DIY-Experimenten und aktueller Forschung groß. Eins ist sicher, die Wege und Mittel, die zur Entschlüsselung des Gehirns nötig sind, werden in alle Richtungen ausgereizt und getestet.

NEURO- TECHNIK IM WANDEL

Lange Zeit gab es größtenteils proprietäre Soft- und Hardware in der Neurotechnik, nur bezahlbar für gut situierte Forschungsinstitute. Doch die Anzahl der Open Source Hard- und Software-Projekte wächst im Bereich der Neurowissenschaften seit wenigen Jahren schneller als je zuvor. Durch die Öffnung der wissenschaftlichen Ergebnisse, Methoden, Anwendungen und die sinkenden Kosten der Technologie wird der Zugang auch für andere Disziplinen erleichtert und die Forschung am Gehirn beschleunigt. Wir gehen hier auf die für uns relevanten Entwicklungen und Beispiele ein.

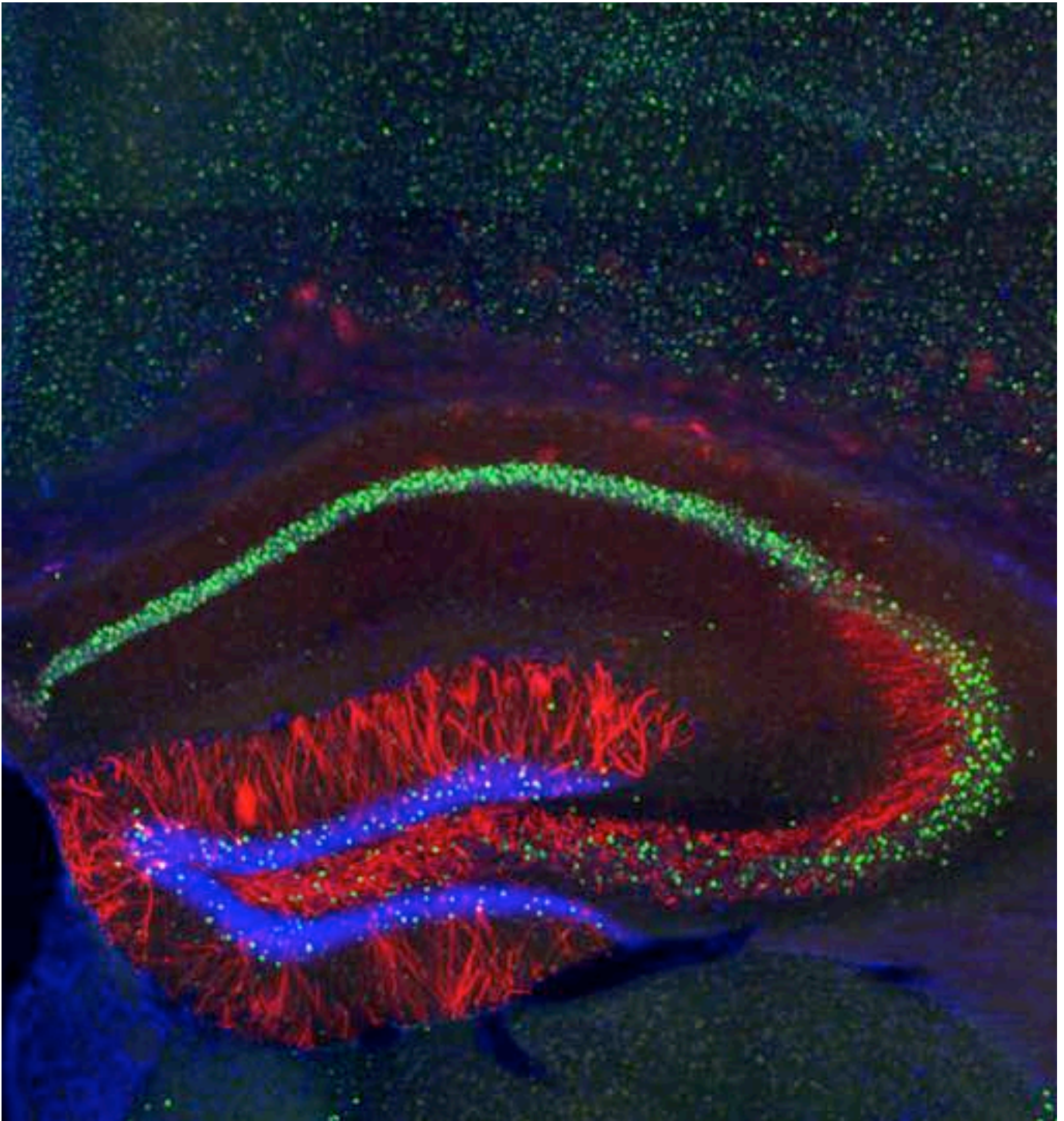


Abb. 7
MIT Neurowissenschaftler identifizierten die Zellen im Hippocampus (rot hervorgehoben), in denen die Gedächtnisspuren einer Maus gespeichert sind.

STATUS UND NEUROHYPE

Brain Computer Interfaces stoßen immer weiter in den Konsumgütermarkt vor. Produkte wie das Emotiv Epoc, das Interaxon Muse oder das Open BCI²² ermöglichen einem breiten Publikum den Zugang zu dieser Technologie, die bisher nur Spezialisten vorenthalten war. Die aktuellen Anwendungen der Produkte beschränken sich auf einfache Neurofeedback-Programme oder Visualisierungen der gemessenen Daten. Das hängt zum einen damit zusammen, dass die Genauigkeit der verwendeten EEG-Technologie nicht vergleichbar mit der medizinischer Geräte ist, und zum anderen, dass der aktuelle Stand der Forschung noch sehr experimentell ist und bereits genauere Methoden wie das Direct Brain Recording existieren.

Das renommierte Gartner Institut, das jährlich eine Einschätzung zu den Phasen der öffentlichen Aufmerksamkeit neuer Technologien herausgibt, ordnet die BCIs einem „Embryonic Level“ zu. Begründet wird dies durch die noch geringe Anzahl an Gehirnmustern, die verlässlich unterschieden werden.²³ Auch innerhalb der Wissenschaft werden die Erwartungen und Ergebnisse kontrovers diskutiert, wodurch sich inzwischen der Begriff „Neurocepticism“ herausgebildet hat.²⁴

Andere Bereiche wie die Kunst oder das Maker-Movement explorieren das zuvor unbekannte und exklusive Feld der BCI spielerisch kreativ und schaffen so Aufmerksamkeit und Akzeptanz für die Technologie.

Mit EEG-Sensoren ausgestattete Spielzeuge bieten Programmierschnittstellen an und motivieren zur Veränderung oder Weiterentwicklung. Der lockere Umgang in der Exploration schafft eine befruchtende Rückkopplung zwischen wissenschaftlicher Forschung und praktischer Anwendung. In dieser Phase zwischen Experiment, Nutzung und Gestaltung dient Interface/Interactiondesign als Schnittstelle, um neue Impulse zu geben und Neues zu erschaffen.

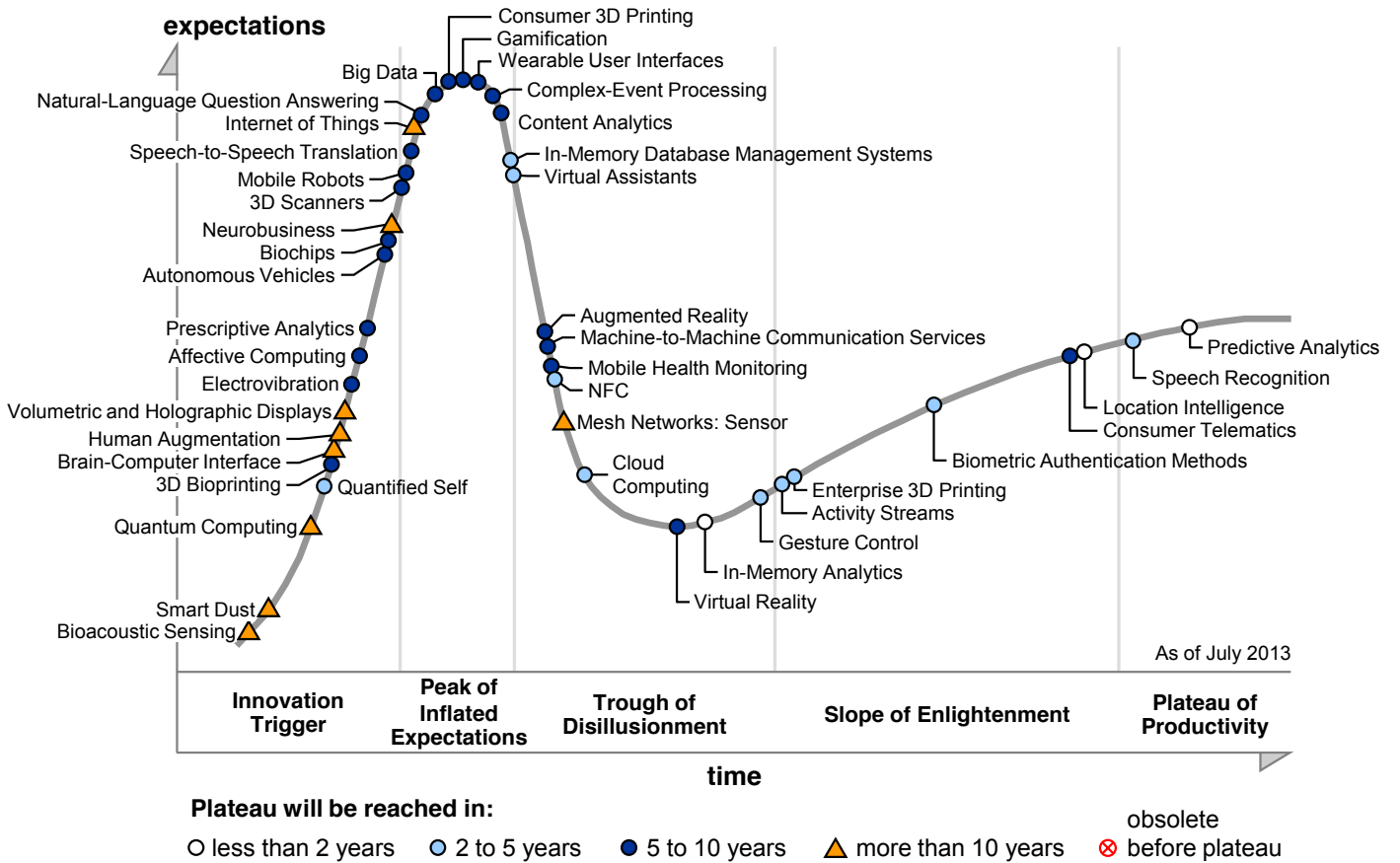


Abb. 8
Der „Hype Cycle for Emerging Technologies“ vom Gartner Institut, gibt BCI mehr als 10 Jahre, bis es produktiv zum Einsatz kommt.

Abb. 9
Der Star Wars Science Force Trainer lässt einen Ball, durch die Kraft der Gedanken nach oben oder unten bewegen.

CROWDSOURCING DURCH DARPA

Die DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) ist eng verwoben mit dem Gebiet der BCIs seit dessen Erfindung. Sie ist die Behörde des Verteidigungsministeriums der Vereinigten Staaten, die Forschungs-Projekte für die Streitkräfte durchführt und finanziert. DARPA's Mission ist es, technologische Überraschung für die Vereinigten Staaten zu verhindern und technologische Überraschung für seine Widersacher zu erschaffen²⁵. Der Begriff Brain-Computer Interface erschien erstmals 1973 in der wissenschaftlichen Literatur²⁶ nachdem die DARPA Forschung auf diesem Gebiet an der University of California Los Angeles (UCLA) finanzierte.

Seitdem investiert die Behörde in die Erforschung der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Eines ihrer Ziele ist es, die Kosten für portable EEGs zu senken und ihre Ergonomie zu verbessern, um den Zugang für zivile und militärische Zwecke zu revolutionieren: „If neural monitoring were cheap and open, we'd start to see more science experiments, art projects, mind-controlled video games, and even serious research using brain-waves“²⁷.

Abb. 10

Das CTzWS ist ein Bedrohungs-Detektionssystem für Soldaten.



Abb. 11

Ein Soldat mit EEG-Headset sitzt vor einem Computer Bildschirm und markiert potentielle Gefahrenquellen.



Weiterhin heißt es in Ihrem Antrag auf Finanzierung zur Forschung und Innovation sinngemäß, dass durch öffentlich zugängliche EEG-Technologie, Geräte und Apps der Bereich der kognitiven Neurowissenschaften in der Lage sein werde, die Vorteile des Crowdsourcing zu nutzen, um komplexe Probleme lösen zu können.²⁸ Herausforderungen, die eine Gruppe an Neurowissenschaftlern nicht beantworten kann, wären kollektiv in der Gemeinschaft lösbar²⁹. So ist es nicht verwunderlich, dass das crowd-sourced OpenBCI (ein OpenSource EEG Projekt) anfänglich von der DARPA finanziert wurde.³⁰

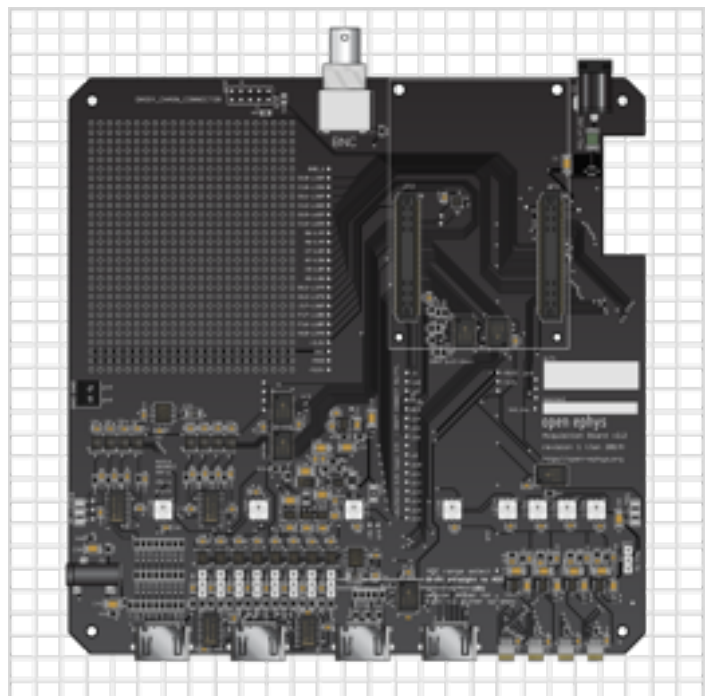
Gründe für die Erforschung der BCIs aus der Sicht der DARPA sind vielfältig. Sie könnten genutzt werden, um die Ausbildung von Soldaten zu verbessern, post-traumatische Belastungsstörung zu behandeln, Auswirkungen von Folter zu untersuchen oder die Überwachungstechnik zu verbessern. Im Gebiet der Überwachungstechnik wird die Forschung an den BCIs bereits erfolgreich angewendet. Das Cognitive Technology Threat Warning System (CT2WS) ist ein System, bei dem das Gehirn eines Menschen (Operator) als Filter benutzt wird, um Gefahren für Soldaten zu erkennen. Es werden 10 Bilder pro Sekunde einer Überwachungskamera (z.B. aus einer Drohne) dem Operator gezeigt. Dessen Gehirn wird über ein EEG nach der P300 Welle überwacht. Die P300 Welle ist eine Wellenform, die ca. 300 ms nach einem auslösenden Reiz auftritt. Selbst bei diesen kurzen Betrachtungszeiten kann das menschliche Gehirn Bewegung und Formen wahrnehmen und so unbewusst Gefahren erkennen. Wird eine P300 Welle erkannt, so wird das entsprechende Bild markiert und tiefgehend auf potentielle Gefahren analysiert. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist es, dass kontext- und betreiberspezifische Bedrohungen erkannt werden. Mit diesem System ist es möglich, die Fehlalarmrate bei der Militärüberwachung auf ein Minimum zu reduzieren.³¹

OPEN EPHYS

Auch auf dem Hoheitsgebiet der Neurowissenschaftler tut sich etwas in Sachen Open Source Hardware. Das Projekt „Open Ephys“³² (Open Source Electrophysiology) der zwei Gründer Joshua Siegle und Jakob Voigts vom Wilson Lab an des Massachusetts Institute of Technology (MIT) richtet sich nicht wie das Open BCI an Techniker und Spieleentwickler, sondern speziell an die Neurowissenschaftliche Forschung im Universitätskontext und befasst sich mit der elektro-chemischen Signalübertragung im Nervensystem. Mit dem Open Ephys werden die beiden Techniken des Direct Brain Recordings und der Optogenetik in einer Open Source Plattform verbunden: spezielle Elektroden (Tetroden) hören Neuronen ab, deren Aktivität durch optogenetische Stimulation simultan manipuliert werden können. Der Antrieb zu diesem Projekt stammte von der vergeblichen Suche der beiden Doktoranden nach einem bezahlbaren und modularen System, das zu Ihren Zweck, der Erforschung des Mäusegehirns, genaue Daten liefert. „Neuroscience is currently dominated by closed-source commercial hardware, which is often expensive and difficult to modify.“³³ erklärt Josh Siegle. Aus diesem Grund entschieden sich die beiden, ihr eigenes System zu konstruieren: „Neuroscience tends to have a pretty hacker-oriented culture. A lot of people have a very specific idea of how an experiment needs to be done, so they build their own tools.“

Dank einer Spende von Texas Instruments wurden bereits über 150 Open Ephys Plattformen an Forschungsinstitute rund um die Welt geschickt. Die Hoffnung der Gründer ist es, Neurowissenschaftler zu ermutigen, ihre Arbeit der Open Source Community zu öffnen, damit am Ende gemeinsam mehr Zeit für das eigentliche Forschen übrig bleibt.³⁴

Abb. 12
eine Abbildung des zusammengebaute Open Ephys Boards



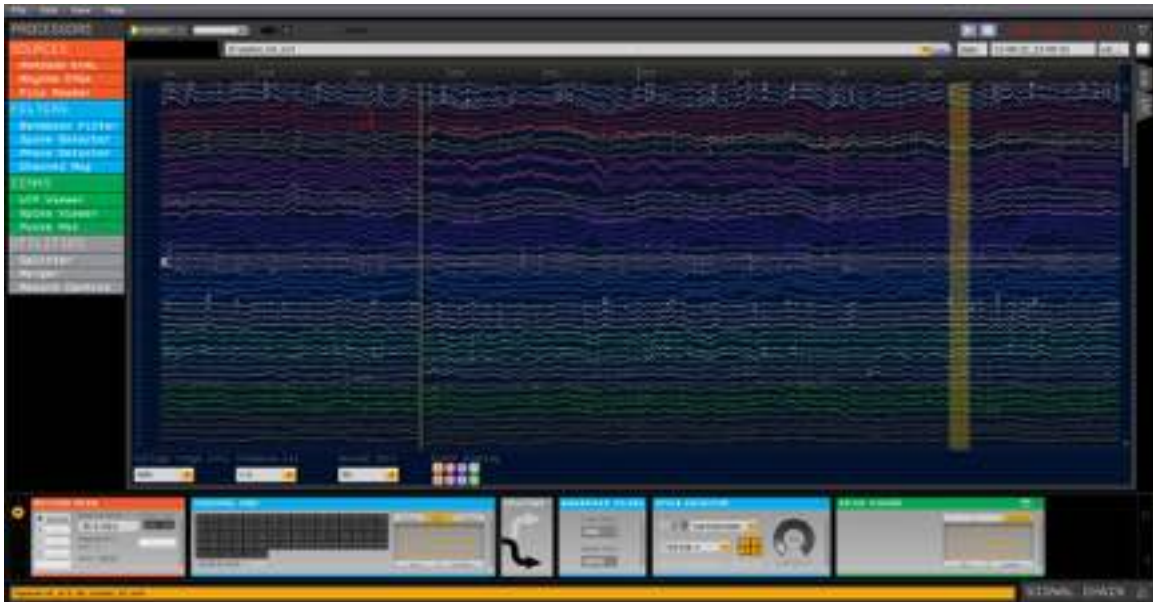


Abb. 13
Screenshot der Open Ephys GUI, die neurale Daten in Echtzeit aufnehmen, analysieren und visualisieren kann

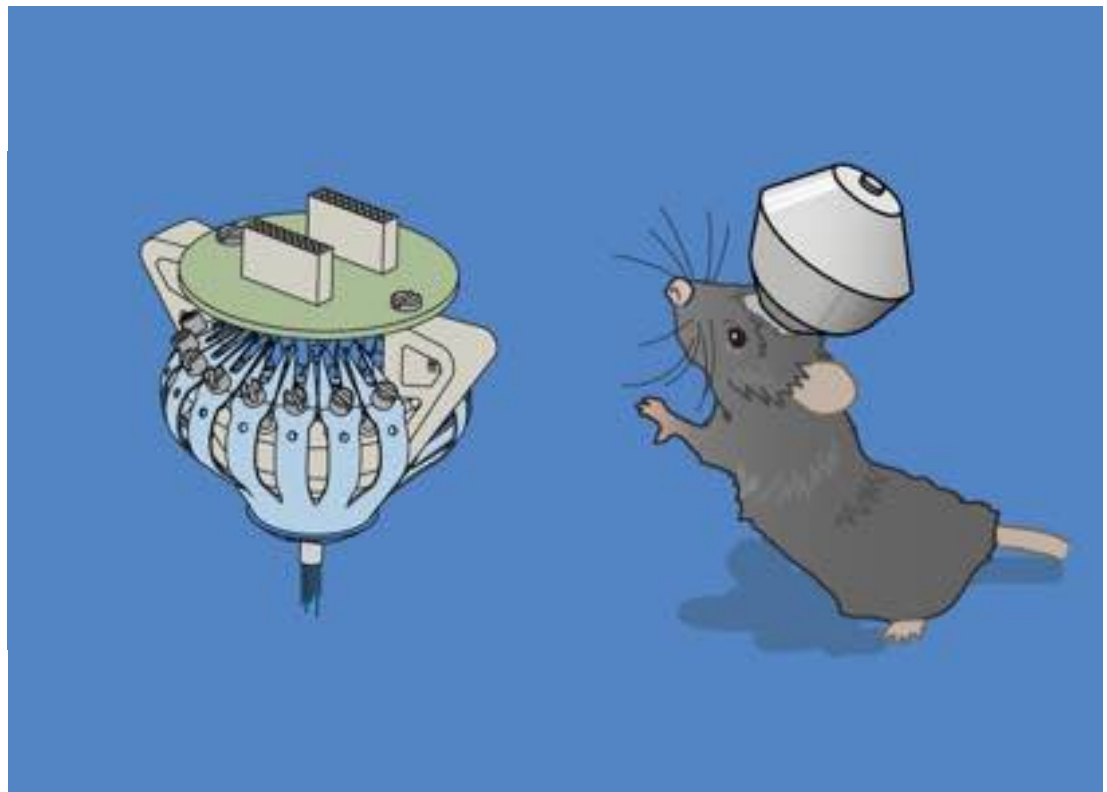


Abb. 14
Das Flexdrive ist ein Implantat zur extrazellulären Elektrophysiologie von Mäusen, welches die individuelle Positionierung von bis zu 16 Mikrodrahtelektroden oder Elektrodenbündel zulässt.

PRODUKTE UND WERKZEUGE

In den letzten Jahren haben diverse Hersteller vereinfachte EEG-Technologien genutzt, um günstige BCIs herzustellen. Die Technik findet vor allem in Spielzeug und Gaming-Equipment Anwendung.

Die Firma NeuroSky nimmt dabei eine zentrale Rolle ein. Sie wurde 2009 im Silicon Valley gegründet und hat nach eigenen Angaben die EEG-Technologie von Grund auf neuentwickelt, um verbraucherfreundliche Anwendungen zu schaffen: „The core technology behind NeuroSky devices has been built from the ground up. This has allowed NeuroSky to inexpensively produce a chip that filters out the ambient waves present in most uncontrolled conditions and effectively measures neural activity in virtually any condition with 96% the accuracy of similarly configured research grade EEGs.“³⁵ Eine weitere Besonderheit der NeuroSky Technologie ist, dass die Elektroden keine Kontaktflüssigkeit wie beim herkömmlichen EEG-Elektroden benötigen. Dies ermöglicht ein viel größeres Anwendungsbereich, da das Benutzen von Trockenelektroden die zeitaufwändige Vorbereitungsphase von EEGs auf ein Minimum reduziert.

Die Qualität der EEG Signale der NeuroSky Technologie sollen mit denen eines klinischen EEGs vergleichbar sein: „Raw EEG signals with dry electrodes of NeuroSky system were compared to those with wet electrodes with Biopac system. FFTs were performed to compare signal characteristics of the EEGs, especially power spectrums. Results show that EEG signals of NeuroSky system are compatible to those of Biopac system.“³⁶

Abb.15
NeuroSky ThinkGear ASIC
Modul(AM), Vorderansicht

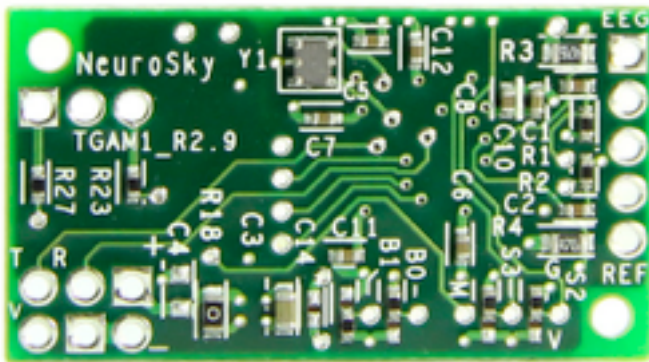
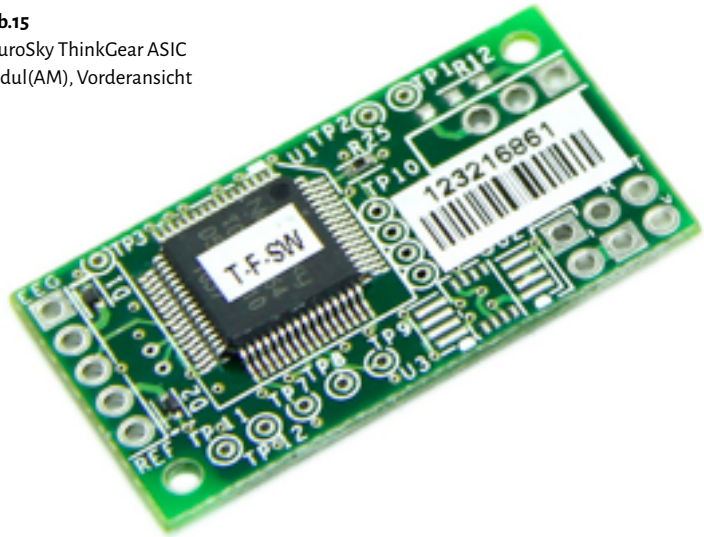


Abb.16
NeuroSky ThinkGear ASIC
Modul(AM), Rückansicht

NeuroSky ist vorrangig Hersteller für kostengünstige Verbraucher-EEG-Technologie (ThinkGear AM³⁷), die in Produkten anderer Firmen Verwendung findet. Beispiele sind die Spielzeuge Mindflex von Mattel und der Star Wars Force Trainer von Uncle Milton oder die EEG-Headsets wie das hauseigene MindWave oder das Muse von InteraXon. Das MindWave und das Muse richten sich unter anderem an Entwickler und werden mit entsprechender Dokumentation und Programmierschnittstelle (API) ausgeliefert. Sie bedienen die Quantified-Self-Bewegung: „The Quantified Self ist ein Netzwerk aus Anwendern und Anbietern von Methoden sowie Hard- und Softwarelösungen, mit deren Hilfe sie z.B. umwelt- und personenbezogene Daten aufzeichnen, analysieren und auswerten. Ein zentrales Ziel stellt dabei der Erkenntnisgewinn u.a. zu persönlichen, gesundheitlichen und sportlichen, aber auch gewohnheitsspezifischen Fragestellungen dar.“³⁸

Durch die offene Schnittstelle zu den EEG-Daten des Muse wird neben der offiziellen App zum Entspannungstraining und zur Auswertung ein Kanal zur kreativen Exploration zur Verfügung gestellt. Das Muse EEG-Stirnband stellt aus diesem Grund mit einer EEG-Abtastrate von bis zu 500Hz, 7 Trockenelektroden, einer schnellen und intuitiven Einrichtungphase, guter Portabilität und einer sehr guten Entwicklerschnittstelle das optimale Werkzeug für unser Vorhaben dar.

Emotiv EPOC Headset



Abb. 17
Emotiv EPOC Headset

Das von Emotiv veröffentlichte Gerät ist das EPOC-Headset. Das EPOC-Headset ist ein Multi-Kanal-Funksystem BCI. Dieses Headset ist mit 14 Nass-Kontaktwiderstandselektroden zur Messung von EEG, Elektroofokulogramm (EOG) und Gesichtselektromyogramm (EMG) ausgestattet. Darüber hinaus hat das EPOC-Headset auch ein 2-Achsen-Gyroskop für die Messung der Kopfdrehung. Der Einsatz von 2,4 GHz Wireless-Konnektivität bietet breite Zugänglichkeit für Geräte wie PCs, Laptops und Smartphones. Das EPOC-Headset wird zusammen mit einer Software geliefert, die eine Reihe von integrierten Signalverarbeitungsalgorithmen zur Interpretation von EEG-Signalen enthält. Die integrierten Algorithmen erkennen bewusste Absichten des Benutzers, emotionale Zustände und Mimik, basierend auf den gemessenen EEG-, Elektromyogramm- (EMG) und Elektroofokulogramm- (EOG) Signalen. Durch diese Software kann der Nutzer mit verschiedenen Anwendungen wie zum Beispiel Spielen, Virtual Reality oder Gehirnwellen Monitoring interagieren. Diese Anwendungen können von der Emotiv Webseite heruntergeladen werden.

NeuroSky Mindwave und MindBand



Abb. 18
NeuroSky Mindwave und MindBand

Das Neurosky Mindwave und MindBand werden mit einem eigenen WLAN-BCI-System ausgeliefert. Beide Headsets nutzen das ThinkGear „Application-Specific Integrated Circuit“ (ASIC)-Modul. Dieses Modul wurde von NeuroSky entwickelt und mit eigenem entwickelten Signalerfassungskomponenten ausgestattet. Diese Geräte haben meistens die Form eines Headsets oder Stirnbands. Verschiedene Anwendungen wie Media-Player, Visualisierung des kognitiven Zustands und Arcade-Spiele für PC und mobile Geräte können damit gesteuert werden.

NeuroSky MindSet



Abb. 19
NeuroSky MindSet

Das NeuroSky MindSet ist ein drahtloses Headset, das mit einem EEG-Sensor ausgestattet ist. Das Headset mit Kopfhörer und Mikrofon hat eine einzige Trockenkontaktelektrode zur Messung von EEG-Signalen auf der Stirn. Zusammen mit der Fähigkeit der Roh-EEG-Aufzeichnung hat das MindSet einen patentierten Algorithmus, eSense genannt. Dieser Algorithmus interpretiert die mentalen Zustände wie Aufmerksamkeit und Meditation. Diese Übersetzungen werden durch Analyse der Leistungspegel in bestimmten Frequenzbändern, wie z.B. Alpha-, Beta- und Theta-Rhythmen ermittelt. Diese ermittelten Werte werden für Steuerbefehle in Anwendungen eingesetzt.

Interaxon Muse



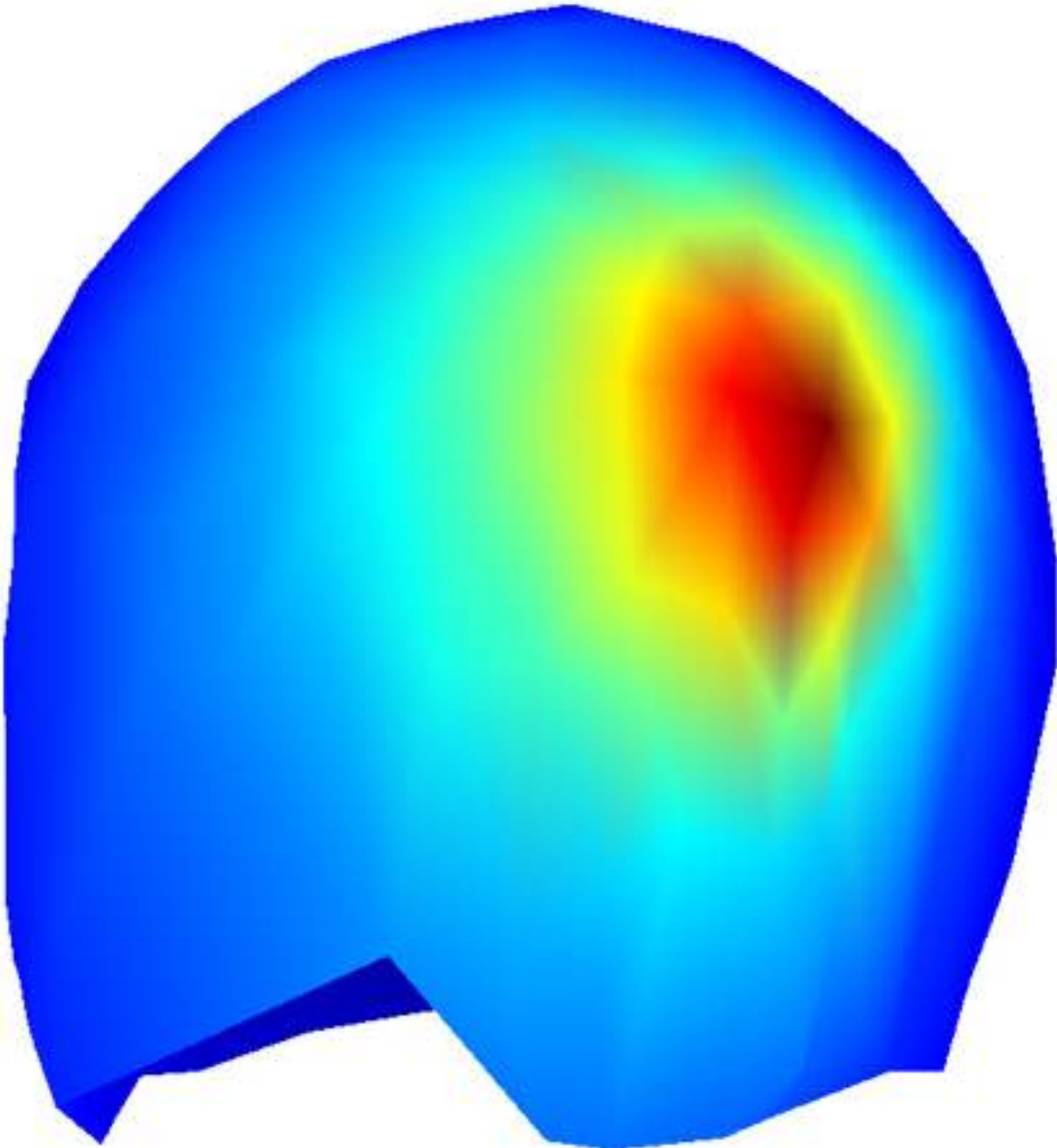
Abb. 20
Interaxon Muse, Brain Sensing Headband

Muse ist ein schlankes Stirnband, ausgestattet mit sieben Trockenelektroden. Die ergonomische Passform sowie die elastischen Elektroden an den Ohren sorgen für einen sehr guten Halt. Muse ist mit iOS (iPhone, iPad, iTouch) und Android kompatibel. Für Entwickler gibt es eine überdurchschnittlich gute SDK, die mit Mac oder PC-Betriebssystemen kompatibel ist. Eine hohe Akkulaufzeit von 5 Stunden ermöglicht einen kontinuierlichen Einsatz. Die Muse Calm App ist bis jetzt die einzige Anwendung, allerdings ist durch die einfache Handhabung in naher Zukunft mit weiteren Anwendungen zu rechnen.

INTERPRE- TATION DES BEWUSST- SEINS

Um die Sprache des Gehirns sowie den Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Gemütszuständen und Hirnströmen zu verstehen, bedarf es einer Einführung in die Elektroenzephalogie. Nachfolgend werden die wichtigsten Grundlagen und Methoden für “Beyond Perception” beschrieben.

Abb. 21
Topographische Darstellung
der Potentiale an der Kopf-
haut, gemessen von einem
EEG.



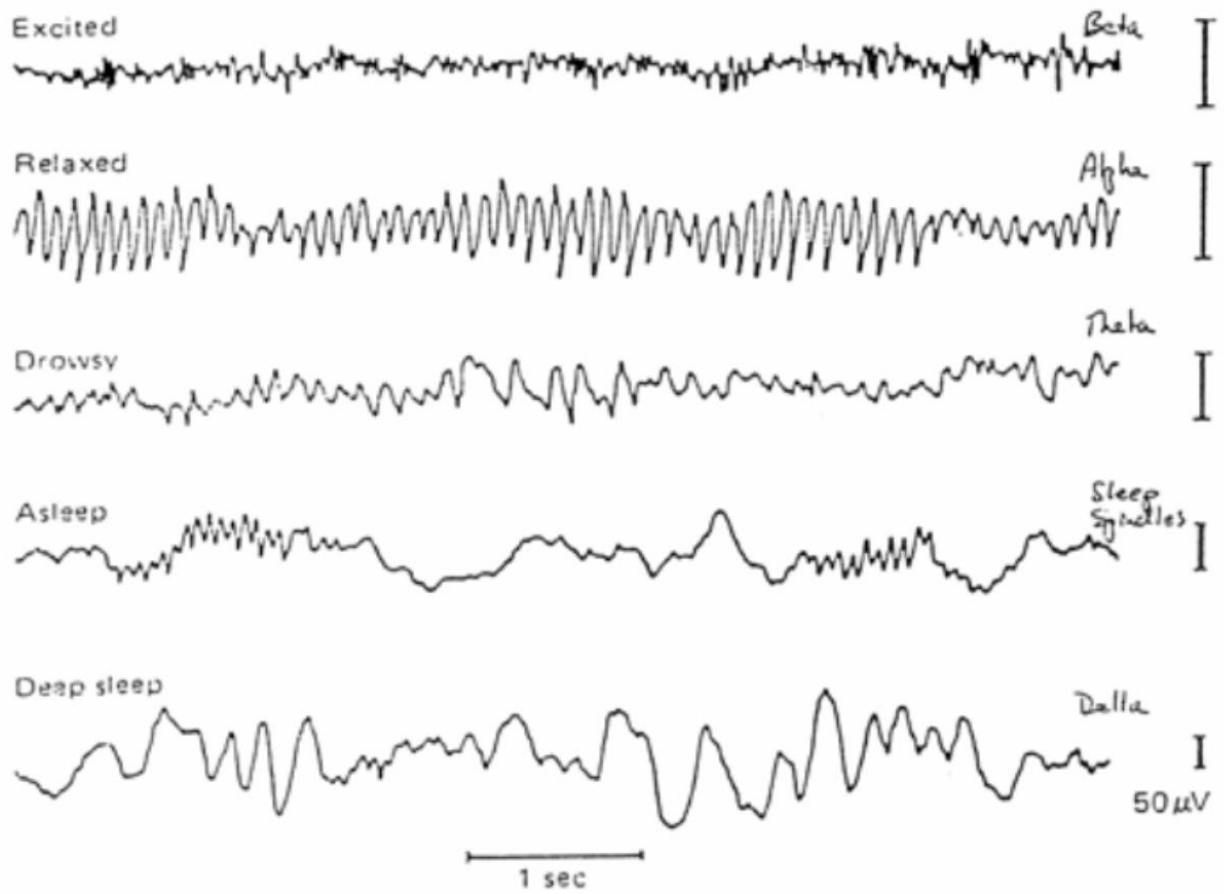


Abb. 22
 Charakterisierung der
 EEG-Frequenzbänder.

EEG - FENSTER INS GEHIRN

Die Elektroenzephalografie (EEG) stellt eine Methode zur Messung und Sichtbarmachung von elektrischen Potentialen der Hirnrinde dar, die von der Kopfhaut abgeleitet werden. Mitunter wird sie vereinfachend als „Fenster ins Hirn“ bezeichnet, weil man auf einfache Art und Weise dem Gehirn „beim Arbeiten zusehen kann“³⁹. Dabei werden 20 bis 256 Elektroden auf der Kopfoberfläche platziert, die die summierte elektrische Aktivität des darunterliegenden Gewebes messen. Diese Signale werden durch ein System von Verstärkern, Filtern und Visualisierungen dem Menschen interpretierbar gemacht.⁴⁰

Das EEG bzw. die Methode, Hirnströme am Menschen zu messen, wurde 1924 von dem Wiener Neurologe und Psychiater Hans Berger entwickelt.⁴¹ Dessen Motivation zur Beschäftigung mit Hirnströmen stammte von einem prägenden Erlebnis, bei dem er seiner Meinung nach „spontane Gedankenübertragung“ erlebte.⁴² Später wurde das EEG dann als diagnostisches Mittel eingesetzt, um Funktionsstörungen und Krankheiten zu erkennen, die das Gehirn betreffen. Besonders die Erforschung von Epilepsie wurde erst durch das EEG möglich: Es konnte sichtbar gemacht werden, wie die für Epilepsie typischen Wellenmuster sich im Hirn ausbreiten und von Areal zu Areal ausbreiten.⁴³ Die meisten EEG-Signale kommen von den äußeren Schichten des Gehirns (Großhirnrinde). Die dort liegenden Neuronen erzeugen elektrische Signale, die sich in einer Größenordnung von 10 bis 100 Millisekunden ändern und zwischen 5 bis 100 μV stark sind. Das EEG ist die einzige verfügbare Technologie, die diese schnellen Änderungen messen kann.

Im Gegensatz zur guten zeitlichen Auflösung hat das EEG eine relativ schlechte räumliche Auflösung. Bildgebende Verfahren wie die Computertomographie (CT), Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und die Magnetresonanztomographie (MRT) bieten dagegen eine gute räumliche, jedoch eine schlechte zeitliche Auflösung. Da die Elektroden des EEG an der Kopfoberfläche liegen, zeichnet jede Elektrode die elektrische Aktivität des darunter liegenden Gewebegebietes auf, jedoch nicht einen klar definierten Bereich von Neuronen. Mit mathematischen Modellen kann diese Ungenauigkeit wieder herausgerechnet werden, das Ergebnis ist jedoch nur eine genauere Schätzung.⁴⁴ Die elektrischen Potentiale des betreffenden Gewebes werden von 10 Millionen bis zu 1 Milliarde Neuronen erzeugt. Erst wenn 2-3 cm^2 Neuronen in der Hirnrinde im gleichen Takt feuern und damit ein genügend starkes Signal produzieren, wird diese Frequenz mit dem EEG messbar.

BEDEUTUNG DER FREQUENZBÄNDER

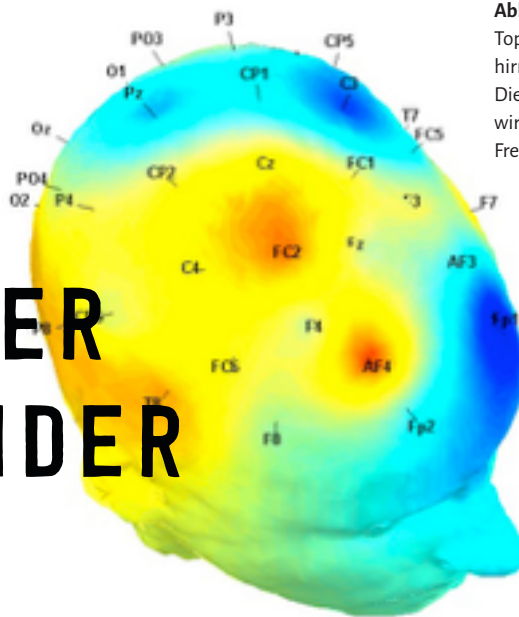


Abb. 23
Topographische- oder Gehirn-Karte der EEG-Aktivität. Die Leistung des EEG-Signals wird in einem bestimmten Frequenzband angezeigt.

Gehirnwellen lassen sich in bestimmte Frequenz- und Amplituden-Gruppen einordnen, welche als Erregungszustände des Gehirns mit dem EEG analysiert und daraus im Verlauf abgeleitet als Bewusstseinszustände interpretiert werden können. Dazu werden die Frequenzverteilungskurve und die Unterschiede zwischen verschiedenen Elektrodenpunkten in Betracht gezogen. Eine allgemeingültige Unterteilung findet man jedoch nicht, da die Einteilung der Frequenzbänder und deren Grenzen historisch bedingt ist und sich nicht durchgehend mit den Grenzen decken, die auf Grund modernerer Untersuchungen als sinnvoll gelten.⁴⁵

Während starker Konzentration oder während der Verarbeitung von Sinneswahrnehmung erzeugt das Gehirn Gamma-Wellen. Als Gamma-Wellen werden die EEG-Signale mit einer Frequenz über 30Hz bezeichnet. Ein alarmierter und fokussierter Mensch zeigt normalerweise in erster Linie Beta-Wellen. Beta-Wellen haben relativ kleine Amplituden (weniger als 10 μV) und ihre Frequenz bewegt sich zwischen 14 bis 30 Hz. Wenn die Erregung im Hirn nachlässt und sich einem Zustand der Entspannung nähert, kann man Stöße von Alpha-Wellen (8-13 Hz) verzeichnen. Diese haben eine höhere Amplitude als die Beta-Wellen

(150 μV oder mehr) und weisen damit die stärksten Amplituden in der Spektralanalyse auf, auch Powerspektrum genannt. Nähert sich das Gehirn einem schläfrigen Zustand, sind Theta-Wellen zu verzeichnen. Diese sind durch kleine Amplituden (5-20 μV) und einer noch kleineren Frequenz von 4-7 Hz charakterisiert. In traumlosen Tiefschlafphasen erzeugt das Gehirn Delta-Wellen, welche eine sehr niedrige Frequenz von 0.1 bis 4 Hz aufweisen.

Diese EEG-Bänder müssen nicht unbedingt getrennt auftreten, sondern können auch gemeinsam zur gleichen Zeit an der Elektrode gemessen werden. Meistens ist eine dominante Frequenz mit anderen Frequenzen vermischt.⁴⁶

Aus den vom EEG gemessenen Gehirnwellen ist es nicht möglich Gedanken zu lesen, sondern lediglich einen allgemeinen Zustand herauszudeuten. Da bestimmte Gedanken mit charakteristischen Mustern einhergehen, kann man Computer lernen lassen, aus diesen Mustern Rückschlüsse auf unsere Gedanken zu ziehen. Gedanken zu lesen ist dabei jedoch ausgeschlossen. Zum Beispiel ist die erfolgreiche Benutzung einer Gehirn-Computer-Schnittstelle abhängig von einer Trainingsphase, bei der die Person dem Computer vor-denkt, welche Absichten zu welchen Gehirn-Mustern führen.

Frequenzband		Frequenz	Zustand	Mögliche Effekte
Delta		0,5 – <4 Hz	Tiefschlaf, Trance	
Theta	Niedrig (Theta 1)	4 – 6,5 Hz	Hypnagogisches Bewusstsein (Einschlafen), Hypnose, Wachträumen	
	Hoch (Theta 2)	6,5 – <8 Hz	Tiefe Entspannung, Meditation, Hypnose, Wachträumen	Erhöhte Erinnerungs- und Lernfähigkeit, Konzentration, Kreativität
Alpha		8 – 13 Hz	Leichte Entspannung, Super Learning (Unterbewusstes Lernen), nach innen gerichtete Aufmerksamkeit, geschlossene Augen	Erhöhte Erinnerungs- und Lernfähigkeit
Beta	Niedrig	>13 – 15 Hz	Entspannte, nach außen gerichtete Aufmerksamkeit	Gute Aufnahmefähigkeit und Aufmerksamkeit
	Mittel	15 – 21 Hz	Hellwach, normale bis erhöhte nach außen gerichtete Aufmerksamkeit und Konzentration	Gute Intelligenzleistung
	Hoch	21 – 38 Hz	Hektik, Stress, Angst oder Überaktivierung	Sprunghafte Gedankenführung
Gamma		38 – 70 Hz	Anspruchsvolle Tätigkeiten mit hohem Informationsfluss	Transformation oder neuronale Reorganisation

Abb. 38
EEG-Frequenzbänder mit zugehörigen möglichen Effekten

Zudem ist es bisher nur gelungen, verschiedene Arten von Gedanken zu erkennen, nicht aber deren genauen Inhalt. Es ist zwar zu erkennen, ob der Benutzer des BCIs gerade an ein Musikstück oder an eine Bewegung denkt – nicht aber, welches Musikstück er im Geiste hört oder wie die vorgestellte Bewegung aussieht. Dennoch kann dies zur Kommunikation verwendet werden, indem sich der Benutzer und der Computer auf eine gemeinsame Zuordnung von Gedanken und Absichten festlegt.⁴⁷

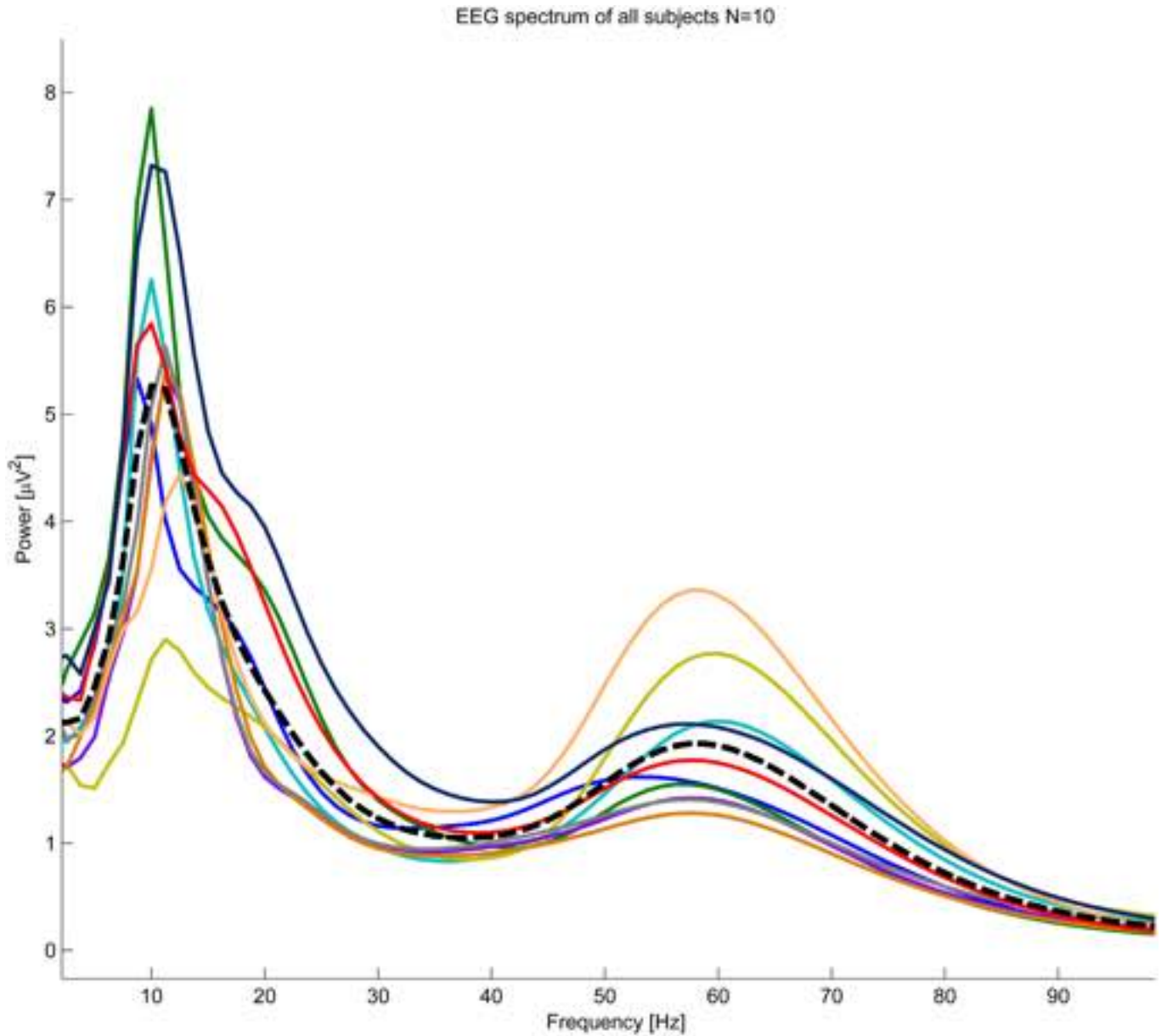


Abb. 24
 Individuelles EEG Power Spektrum von 10 Personen: Obwohl die stärkste Frequenz innerhalb des konventionellen Alpha-Band liegt, gibt es erhebliche interindividuelle Variabilität in der Alpha-Strärke und Frequenzspitzen.

Frequenzband	Individualisiertes Band
Delta	IAF-8 bis IAF-6 Hz
Theta	IAF-6 bis IAF-4 Hz
Alpha 1	IAF-4 bis IAF-2 Hz
Alpha 2	IAF-2 bis IAF Hz
Alpha 3	IAF bis IAF+2 Hz

Abb. 43
 Formel für die Berechnung der Frequenzbänder anhand der IAF.

DIE INDIVIDUELLE ALPHA-FREQUENZ

Jeder Mensch hat andere Vorlieben und jedes Gehirn tickt in einem eigenen Rhythmus. Durch das EEG hat man die Möglichkeit zu lesen, in welchen Frequenzen das jeweilige Hirn am liebsten arbeitet. Aufgrund dieser individuellen Unterschiede in der Ausdehnung von Frequenzbändern, gibt es Modelle, die darauf ausgelegt sind, persönliche Frequenzen zu bestimmen. Am einfachsten zu berechnen ist die Alpha-Frequenz, die dominierende Frequenz im Gehirn, die allgemein mit der Abwesenheit von kognitiver Leistung und Entspannung in Verbindung gebracht wird.

Bei geschlossenen Augen ist die regelmäßige Alpha-Frequenz am Hinterkopf gut im EEG zu erkennen. Werden die Augen geöffnet, verschwindet die Frequenz. Dieses Phänomen nennt sich Berger-Effekt bzw. Alpha-Blockade.⁴⁸

Eine starke Alpha Aktivität wird mit hoher Intelligenz in Zusammenhang gebracht: „We found a strong positive correlation between intelligence and alpha power.“⁴⁹

Das Besondere am Alpha-Rhythmus ist, dass er sich in seiner Amplitude und Frequenz von Mensch zu Mensch stark unterscheidet. Man spricht auch von der individuellen Alpha-Frequenz (IAF).⁵⁰ Hinzu kommt, dass sich die individuelle Alpha-Frequenz im Laufe des Lebens verändert. Ab der Pubertät nimmt die Frequenz stetig ab. Mit 20 Jahren liegt sie bei etwa 11 Hz, bis sie bei einem 90-Jährigen bei etwa 7 Hz liegen kann. Daraus lässt sich eine allgemeine Formel aufstellen:

Alpha-Peak-Frequenz (APF) = $11.95 - 0.053 \times \text{Alter}$ ⁵¹

Es gibt verschiedene Methoden, die individuelle Alpha-Frequenz im EEG festzustellen. Eine weit verbreitete Methode ist, die stärkste Frequenz des EEGs im Alpha-Band bei geschlossenen Augen zu identifizieren.⁵² Diese Methode ist relativ einfach und damit bei nicht klinischen EEGs anwendbar.

Nach Ermittlung der IAF ist es dann möglich, die benachbarten Frequenzbänder, insbesondere das Theta-Band, dementsprechend anzupassen. Die IAF wird dabei als Ankerpunkt genutzt: „Da jedoch auch in altershomogenen Probandengruppen interindividuelle Unterschiede in ähnlichem Ausmaß (etwa 2 Hz) zu erwarten sind, ist eine individuelle Adjustierung der Frequenzbänder, unter Berücksichtigung der individuell dominanten Alpha-Frequenz (IAF) jedes einzelnen Probanden angebracht“⁵³

Die Möglichkeit, mit einem EEG die IAF zu berechnen, hat enorme Bedeutung für unser Vorhaben, eine individualisierte Mindmachine zu konstruieren. Das EEG stellt damit ein Sensor (Output) des Gehirns dar, der als Input für die Stimulation durch die Mindmachine benutzt wird. Die Mindmachine kann damit auf die Zustände des Gehirns reagieren und sich dementsprechend anpassen. Eine klassische Rückkopplung entsteht, bei dem ein dynamisches System zwischen Mensch und Maschine Erregungszustände des Gehirns beeinflusst. Durch die IAF können ebenso die anregenden Frequenzen der anderen Frequenzbänder berechnet werden und der Effekt der Stimulation erhöht werden. Die Berechnung z.B. des Theta-Bandes anhand der IAF verhält sich folgendermaßen⁵⁴: IAF-6 bis IAF-4 Hz.

THETA- TWILIGHT STATE

Der Übergang von Alphawellen zu Thetawellen wird als Twilight State bezeichnet, weil sich in dieser Phase sogenannte Phantasieren induzieren lassen. Die mit dem EEG messbare Theta-Frequenz bewegt sich zwischen 4 und 8Hz. Sie ist die dominante Frequenz bei Kleinkindern und entsteht im Erwachsenenalter bei Schläfrigkeit und leichten Schlafphasen: „Theta Power decreases from early childhood to adulthood and increases during the late part of the lifespan. During the hypnagogic state (i.e. the transition from waking to sleeping) when the ability to respond to external stimuli decreases, theta power increases“⁵⁵. Ein Mensch im hypnagogischen Zustand kann visuelle, auditive und taktile Pseudohalluzinationen erleben. „Die nach außen gerichtete Aufmerksamkeit ist herabgesetzt, das abstrakte Denken aber nicht völlig abgeschaltet. Die Gedanken reihen sich lockerer und ungezielter aneinander, mehr analog als logisch verknüpft.“⁵⁶ Wenig überraschend ist die Verbindung zwischen Rapid Eye Movement-Schlaf (REM) und erhöhter Theta-Aktivität⁵⁷: „Bei dem Aufwecken aus dem REM-Stadium berichten die Versuchspersonen sehr häufig Träume (gekennzeichnet durch bizzaren, unrealistischen Inhalt), während nach dem Wecken aus anderen Schlafstadien eher realitätsnahe Gedanken berichtet werden.“⁵⁸ Dieser „unlogische“ Denkkzustand fördert die Eigenschaft der Kreativität. „There is little doubt that

the hypnagogic-like state of consciousness has been a productive source of creative ideas.“⁵⁹

In einer EEG-Studie zur Auswirkung von Meditation auf die EEG-Bänder konnte nachgewiesen werden, dass sowohl die Intensität von Theta- als auch von Alpha-Wellen während der Meditation anstieg.⁶⁰ Bei der Meditation soll sich der Geist durch Achtsamkeits- oder Konzentrationsübungen beruhigen und sammeln. „We found theta to be associated with a deeply internalised state and with a quieting of the body, emotions, and thoughts, thus allowing usually ‘unheard of things’ to come to consciousness in the form of hypnagogic imagery“⁶¹

Theta-Wellen spielen auch eine zentrale Rolle dafür, wie das Gehirn Informationen aufnimmt, speichert und wieder abrufen: „Wenn Neuronen, die an der Gedächtnisbildung beteiligt sind, im Takt der Theta-Wellen Signale aussenden, bleiben die gespeicherten Erinnerungen besser haften.“⁶² Dieser Prozess tritt während der sogenannten Theta-Synchronisation auf. Dabei werden die Alpha-Wellen von stärkeren Theta-Wellen ersetzt. Aus diesem Grund wird das Theta 2-Band, welches direkt neben dem Alpha-Band liegt, mit dem „Enkodieren von neuer Information sowie mit dem episodischen Gedächtnis in Verbindung gebracht.“⁶³



Abb. 26
"Landschaft mit dem Traum
Jakobs", Willmann, M. (1691)

Die Theta-Aktivität, die dem präfrontalen Cortex (Areal an der Stirnseite des Gehirns) entstammen, werden sowohl mit dem dem Arbeitsgedächtnis⁶⁴, der Fehlerverarbeitung⁶⁵, der Aufmerksamkeit⁶⁶ und dem episodischen Gedächtnis⁶⁷ (Teil des Langzeitgedächtnis) in Verbindung gebracht. Steigt die Anstrengung des Arbeitsgedächtnisses, steigt auch die Aktivität von Theta-Wellen im präfrontalen Cortex. Gegensätzlich verhält es sich bei Stress: Stress vermindert die Leistung des Arbeitsgedächtnisses sowie die Aktivität von Theta-Wellen.⁶⁸

TECHNIKEN DER HIRN- STIMULATION

Gehirnwellen lassen sich nicht nur auf verschiedenste Weise messen, sondern auch durch nicht-invasive Techniken beeinflussen. Dabei werden Teile des Gehirns elektrisch, magnetisch oder optisch stimuliert. Die Verfahren unterscheiden sich in ihrer Technik, Genauigkeit und Effizienz. Nachfolgend wird eine kurze Übersicht über die gängigen Methoden gegeben.

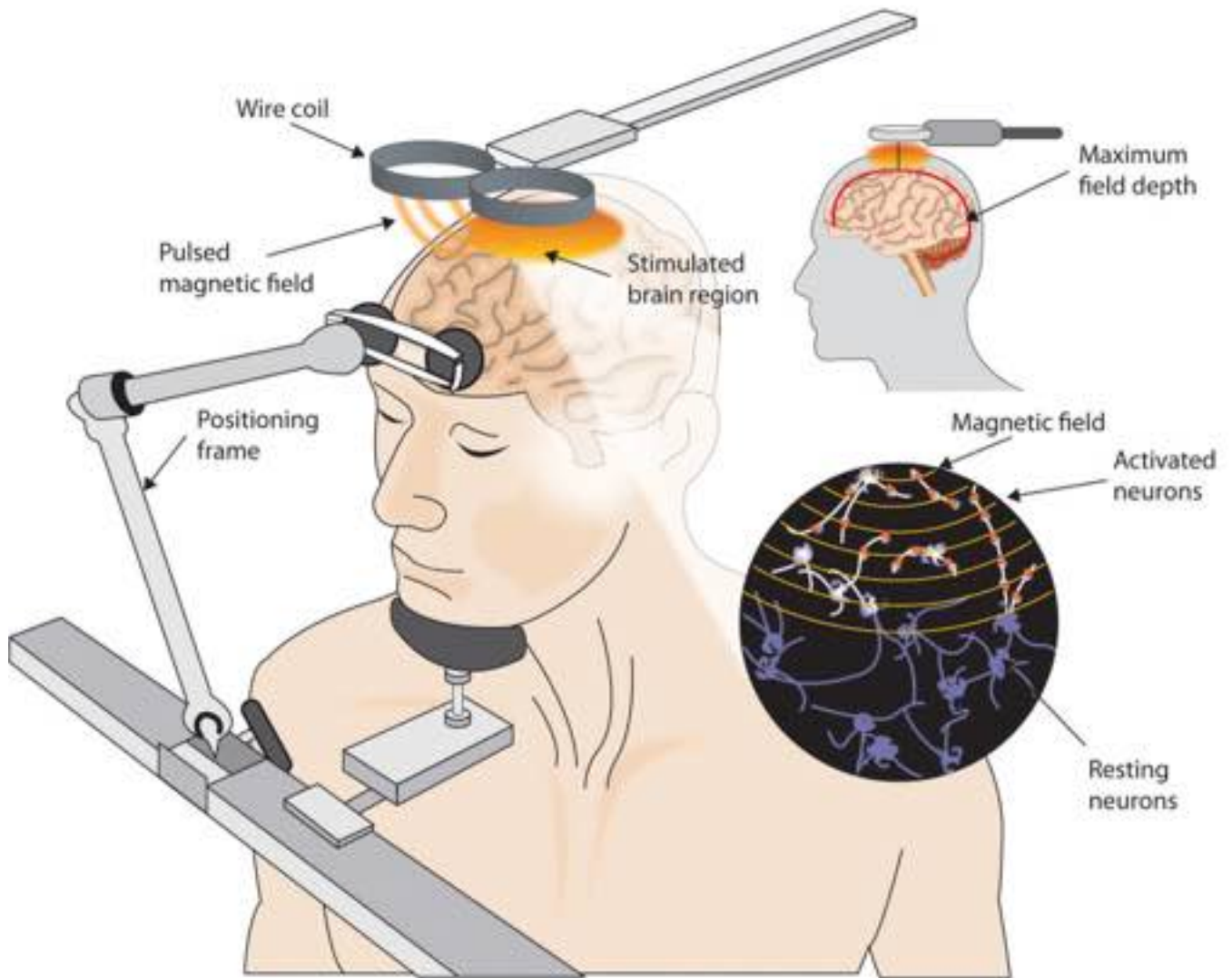


Abb. 27

Diese Abbildung zeigt die Funktionsweise der nicht-invasiven Transkraniellen Magnetstimulation bei der eine awird, um das Gehirn elektrisch zu stimulieren.



Abb. 28
Neurofeedback zur
Behandlung von ADHS
kann bewirken dass
keine Medikamente
benötigt werden oder
bestehende Medikation
reduziert werden.

NEUROFEEDBACK

Das so genannte Neurofeedback ist eine computergestützte Trainingsmethode: Es werden EEG-Frequenzen in Echtzeit analysiert, in ihre Frequenzanteile zerlegt und nach Filterung an den Benutzer zurückgegeben. Die vordefinierten Parameter der Gehirnaktivität werden durch auditive oder visuelle Reize gespiegelt und so wahrnehmbar gemacht. Dadurch ist es möglich die Gehirnaktivität selbst besser zu regulieren um Fehlregulationen auszugleichen. Aus diesem Grund wird Neurofeedback häufig zur Therapie von ADS, ADHS, Autismus, Depression, Zwangsstörungen, Tics, Epilepsie und auch Migräne eingesetzt.

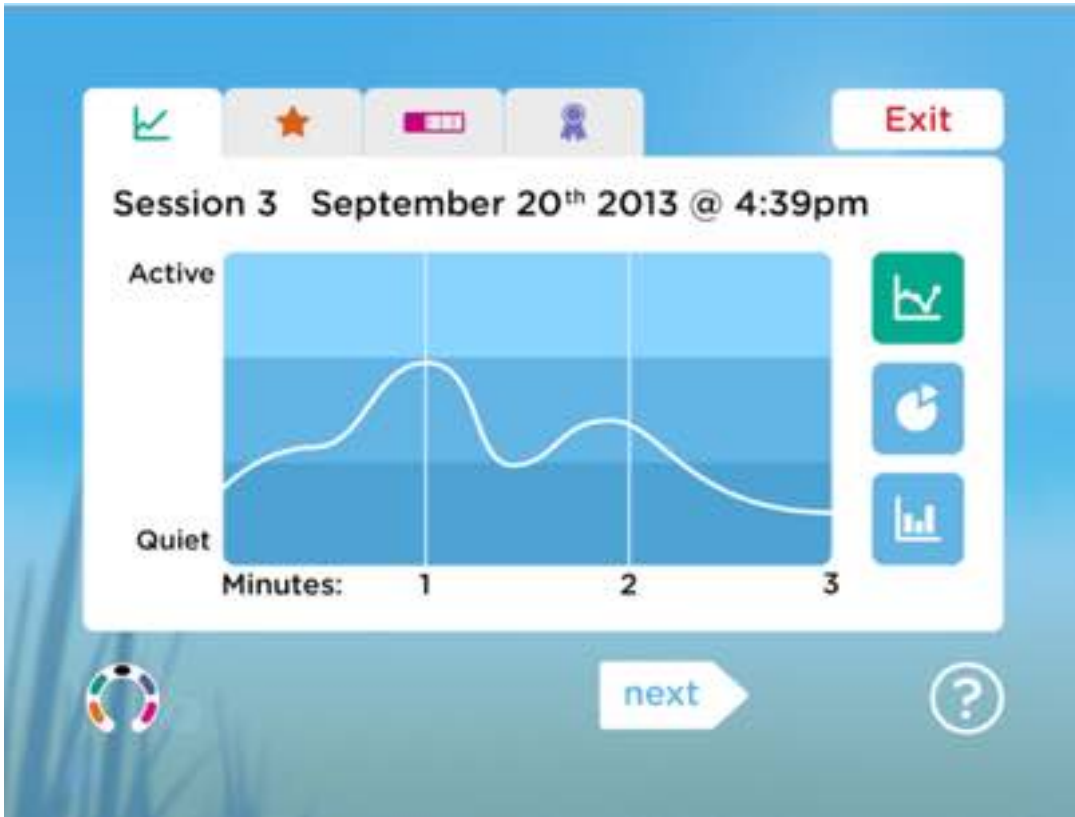


Abb. 29
Screenshot der Muse Calm App. Hier wird der Verlauf der Hirnaktivität einer Session gegeben.

Abb. 30
Screenshot der Muse Calm App. Countdown zur Neurofeedback Funktion, bei der man durch Entspannung z.B. Wolken aufklären lassen kann.



NICHT-INVASIVE METHODEN

tDCS

Transkranielle Gleichstromstimulation

Bei der tDCS wird über Elektroden an der Kopfhaut ein schwacher elektrischer Strom angelegt, der die elektrische Ladung auf der Membran der Nervenzellen in dem darunter liegendem Gewebe verändert. Die Erregbarkeit der Nervenzellen wird auf dieser Weise wahlweise verstärkt oder gedämpft. Mit dieser Technik können gezielt Frequenzbereiche im Hirn beeinflusst werden. Anwendungen finden sich in der Behandlung von Schmerzen oder Depressionen und in der Leistungssteigerung.

TMS

Transkranielle Magnetstimulation

Die TMS wird zur neurologischen Diagnostik eingesetzt, weil mit ihr punktgenau Bereiche im Hirn stimuliert oder gehemmt werden können. Dabei werden starke Magnetfelder erzeugt, die sich in einem gezielten Bereich im Hirn auf einmal entladen.

TMS findet Anwendung in der Behandlung von neurologischen Erkrankungen wie bei Tinnitus, Apoplexie, bei Epilepsie oder bei Parkinson-Krankheit und Depression.

AVE **Audio-Visual Entrainment**

AVE basiert auf blinkenden Lichtern und gepulsten Tönen, die verwendet werden, um das Gehirn in verschiedene Stadien der Gehirnwellenaktivität zu führen. AVE wird in Form von Mindmachines z.B. zur Therapie von ADHS, Demenz, Depression und Migräne eingesetzt. Im nächsten Abschnitt wird diese Methode gesondert vertieft und im Detail erläutert.

CES **Craniale Elektrostimulation**

Die CES ist ein Behandlungsverfahren, bei dem über zwei Elektroden über den Ohrmuscheln oder der Kopfhaut geringer elektrischer Wechselstrom ($<1\text{mA}$) zugeführt wird. Die Stromstärken werden nicht wahrgenommen und dienen zur Beeinflussung der Neurotransmitterkonzentrationen im Hirn. CES wird als Therapieform unter anderem bei Drogenentzug, Schlafstörungen, Depressionen oder chronischen Schmerzzuständen eingesetzt, ist allerdings wegen der uneinheitlichen Studienlage umstritten.

EKT **Elektrokrampftherapie**

Bei der EKT werden Elektroden unilateral über der nicht dominanten Gehirnhälfte platziert und mit 600mA starken Strom beladen. Kurze Stromimpulse lösen unter Kurznarkose und Muskelrelaxation einen epileptischen Anfall aus. Die Stimulation soll eine Ausschüttung von Neurotransmittern und Neurohormonen bewirken und wird seit den 1930er Jahren zur Behandlung schwerer psychischer Erkrankungen wie manischer Depression und Schizophrenie eingesetzt.

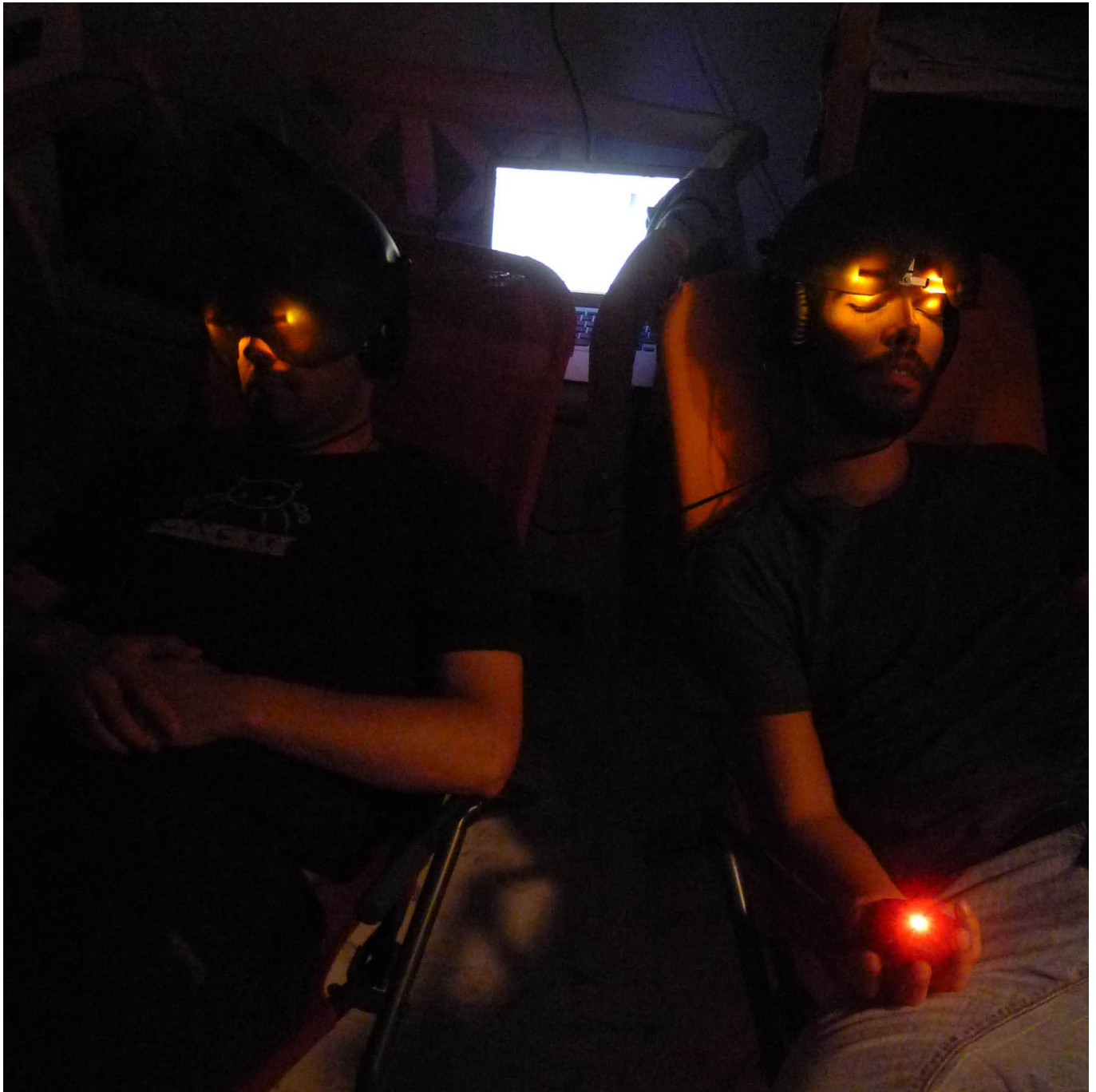


Abb. 31
Audio-visuelles Entrainment
mit Mindmachines.

AUDIO-VISUELLES ENTRAINMENT

Audio-visuelles Entrainment (AVE), ist ein Teilbereich des Brainwave Entrainments und verwendet blinkendes Licht und gepulsten Ton, um das Gehirn in verschiedene Stadien der Gehirnwellenaktivität zu führen. Dieser Prozess der Annäherung der vorherrschenden Hirnwellenfrequenz an die von außen zugeführte Frequenz wird Entrainment genannt⁶⁹. Entrainment ist ein Prinzip der Physik und bedeutet Synchronisation von zwei oder mehr rhythmischen Zyklen / Systemen.

Alle unsere Sinne, außer dem Geruchssinn, greifen auf die Großhirnrinde über den Thalamus zu. Da der Thalamus stark mit der Hirnrinde verbunden ist, können sich sensorische Stimulationen auf die kortikale Aktivität und somit den bewusstseinsnahen Bereich leicht auswirken. Um Hirnaktivität zu beeinflussen, muss die sensorische Stimulation im Frequenzbereich von etwa 0,5 bis 25 Hertz (Hz) liegen. Sowohl Druck als auch visuelle und auditive Stimulation sind für die Einwirkung auf die Gehirnwellenaktivität geeignet. Allerdings muss ein großer Bereich der Haut stimuliert werden, um Hirnströme zu beeinflussen, daher bleibt die auditive und visuelle Stimulation als das wirksamste und einfachste Mittel zur Beeinflussung von Hirnaktivität. Die direkte Übertragung der Impulse wird von den Netzhautzellen der Augen und Cilien in der Cochlea im Ohr übermittelt. Die Nervenbahnen aus den Augen und Ohren tragen die hervorgerufenen elektrischen Potenziale in den Thalamus. Von dort wird die mitgeführte elektrische Aktivität „verstärkt“, und in andere Bereichen des limbischen

Hirnkortex über die kortikale Thalamus-Schleife verteilt. AVE kann eine Vielzahl von Formen annehmen und unterschiedliche, subjektive sowie klinische Effekte erzeugen. Die einfachste Form der Stimulation ist (wie bereits beschrieben) eine komponierte Abfolge vom gepulsten Licht und Ton. Eine andere Variante ist eine repetitive Stimulation bei einer bestimmten Frequenz für eine bestimmte Zeitperiode, die die Stimulationsfrequenz innerhalb des EEGs reflektiert. Dies wird als „Open-Loop“ Stimulation bezeichnet. „Closed-Loop“ AVE würde die visuelle und auditive Stimulation in Reaktion auf das eigene EEG anpassen.⁷⁰ Eine simultan aufnehmende und stimulierende Kombination ermöglicht es, den Kreis zu schließen um ein angepasstes Signal an das Hirn zu senden, basierend auf der Vorgabe des gleichen Hirns. Bei den klinischen AVE-Geräten wird angenommen, dass sie EEG-Aktivität verändern, Halluzinationen induzieren, zur limbischen Stabilisierung beitragen, die Produktion von Neurotransmittern verbessern und die Hirndurchblutung anregt.⁷¹ AVE-Geräte werden auch Mindmachines genannt.

LICHT UND TON ALS INTERFACE

Der Fokus unserer Arbeit liegt auf der Modulation von Licht- und Klangwellen als Werkzeug für die Stimulation gewünschter Bewusstseinszustände. Um zu verstehen, inwieweit die Modulation und Frequenz unterschiedliche Effekte hervorrufen, ist es ein Grundverständnis der Physiologie und Fähigkeiten unserer Sinne erforderlich.

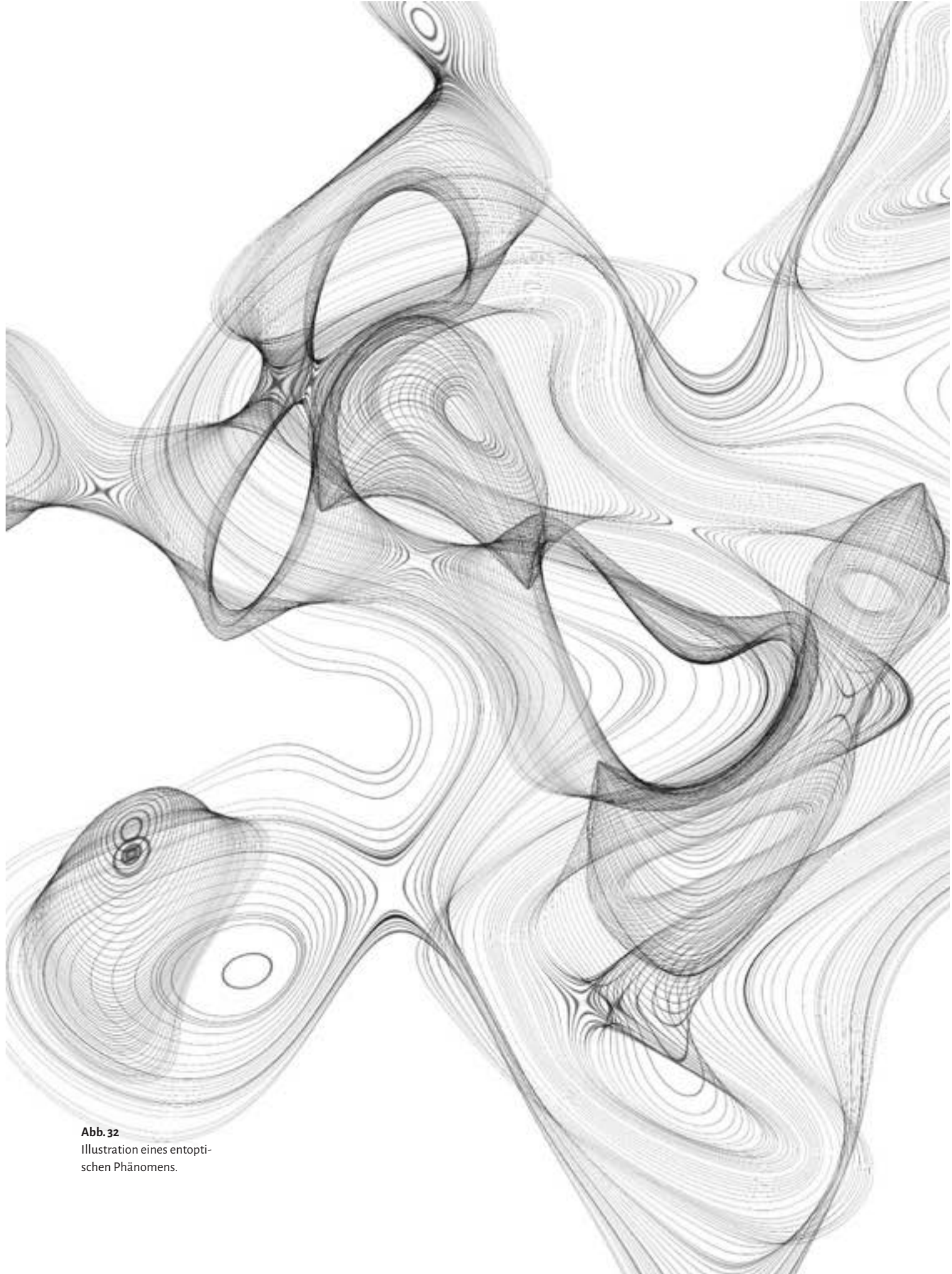


Abb. 32
Illustration eines entoptischen Phänomens.

EVOLUTION DER MINDMACHINES

Eine Mindmachine besteht aus einem Kopfhörer und einer mit LEDs besetzten Brille. Die Brille stimuliert visuell durch ein Flackern in einem einstellbaren Bereich von 1 bis ungefähr 30 Hz, während dazu Töne in passender Frequenz über die Kopfhörer ausgegeben werden. Aktuell erhältliche Systeme bieten meist integrierte Programme für verschiedenste Anwendungsbereiche an. Die meisten Kompositionen müssen extra hinzugekauft werden und beinhalten Programme zur Förderung von Entspannung, Konzentration, Gedächtnisleistung, Kreativität, Imagination, Meditation, Trance, Schlaf und ähnliches. Einige Hersteller bieten die Möglichkeit, eigene Programme zu erstellen, oder die Verwendung zusammen mit Biofeedbacksystemen. „Biofeedback ist ein Therapieverfahren, das darauf basiert, nicht bewusst wahrnehmbare Körpersignale zu messen, zu verstärken und danach als wahrnehmbare Reize (visuell, akustisch) an das Bewusstsein zurückzuspielen.“⁷² Eine spezielle Form eines Biofeedbacksystem ist das bereits erwähnte Neurofeedback. Im folgenden Abschnitt werden die wichtigen technologischen Entwicklungen für Mindmachines in der historischen Reihenfolge genannt, beschrieben und erläutert.

1956

Brainwave Synchronizer

In Folge von Beobachtungen, wie US-Militärradarbetreiber oft in Trance fielen, tat sich der Hypnotiseur und Geburtshelfer William Kroger mit Sidney Schneider von der Schneider Instrument Company zusammen. Sie produzierten den weltweit ersten elektronischen klinischen Fotostimulator.

Das Produkt war ein einfaches, aber funktionierendes Laborgerät zur photischen Stimulation. Der Brainwave Synchronizer verwendet eine große Xenon Glühbirne, ähnlich den modernen Stroboskopen oder Blitzvorrichtungen von Kameras. Die Glühbirne war vor einem silbernen Reflektor angebracht und über einen entsprechenden Drehregler konnte man die gewünschte Blitzfrequenz einstellen.



Abb. 33
Brainwave Synchronizer
Model MD-5

THE BRAIN WAVE SYNCHRONIZER

Thirty years of research have been put into this amazing unit. WHAT THIS UNIT DOES FOR YOU:

- Lessen Resistance
- Increase Suggestibility
- Reduce Induction Time to seconds
- Deepen Hypnosis to the level you select.
- Used for Altered States of Consciousness instantly.
- Induces Healing States. Programs Mind states & MUCH MORE!!

HOW IT WORKS:

The principle of photic stimulation has been known since 1934, but it wasn't until the work of Sidney Schneider on Radar Systems in World War II that its relation to hypnosis was discovered. Schneider noticed the effect that mathematical timed and shaped light pulses had on the Radar operators and applied this theory to develop the Brain Wave Synchronizer. The goal was to produce the rate of the natural brain rhythm. When the pattern of the light is tuned to the subject's own frequency, response to hypnotic induction is rapid, easy and effective! Because of its automatic functions, The Synchronizer gives the beginner the same advantage as the professional hypnotist! The uses are unlimited! Other machines cost hundreds more and give much less results. This is the "STATE OF THE ART" model for the serious researcher or trance inducer. Why waste hours getting to "higher States" of consciousness. **DO IT ALMOST INSTANTLY AND GET TO STATES MUCH DEEPER THAN YOU COULD WITHOUT THIS DEVICE.**

- Single frequency control covers the four major brain ranges
- 30 minute electronic timer
- Wired remote control will Start, Stop, Tune and Time, up to 10 feet.
- Can be used for individual or group induction.
- Safe and very easy to use. No attachment to subject.
- No moving parts - ALL Photo-Electronic.
- Range - 1-30 pulses per second in 4 ranges: Delta, Theta, Alpha, Beta. Comes with complete instructions and one year factory service warranty.
- Audio tape instructions available for \$10.00 extra.

Member Price \$480.00 & \$18.00 S&H Non-Member Price \$498.00 & \$18.00 S&H

Abb. 34
Werbung für den Brainwave Synchronizer als Werkzeug zur Förderung der Entspannung.

1960

Dreamachine

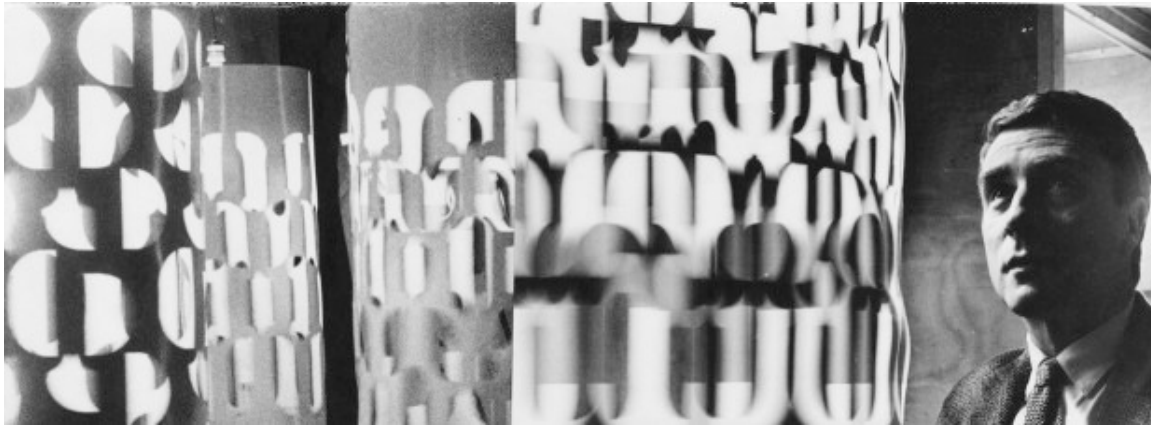


Abb. 35
Fotografie von Brion Gysin vor mehreren Dreamachines.

In den frühen 1960er Jahren erfand der Künstler Brion Gysin zusammen mit Ian Sommerville eine Art Stroboskop-Machine, im Volksmund als „Dreamachine“ bekannt. Brion Gysin hatte während einer Busfahrt nach Marseille eine Art Halluzination, die durch das Lichterspiel der untergehenden Sonne auf einer Allee mit Bäumen hervorgerufen wurde. Er notierte über das Erlebnis in seinem Tagebuch:

|| *Had a transcendental storm of colour visions today in the bus going to Marseilles. We ran through a long avenue of trees and I closed my eyes against the setting sun. An overwhelming flood of intensely bright colors exploded behind my eyelids: a multidimensional kaleidoscope whirling out through space. I was swept out of time. I was out in a world of infinite number. The vision stopped abruptly as we left the trees. Was that a vision? What happened to me?* ||

Sein Anliegen war es, ein Stroboskop für den privaten Gebrauch herzustellen. Gysin überredete einen seiner Freunde, Ian Sommerville (1940-1976), einen Prototyp zu konstruieren. Sommerville, der ursprünglich ein Mathematiker war, kam mit einem

einfachen, aber effektiven Cut-up Design. Er baute einen Kartonzylinder mit Löchern in regelmäßigem Abstand, der auf einem 78 rpm Plattenspieler mit einer zentral platzierten Glühbirne gestellt wurde. Wenn der Plattenteller sich zu drehen beginnt, wird das Licht mit einer regulären Frequenz von 8-12 Hz unterbrochen. Sie nannten es die Traummaschine, die für Marketing-Ziele in Dreamachine abgeändert werden würde. Die ersten Beatniks ließen nicht lang auf sich warten, um vor der Maschine zu sitzen und ihre Erfahrung miteinander zu teilen. 1961 wurde die Dreamachine als „Verfahren und Gerät zur Erzeugung künstlerischer Empfindungen“ patentiert.

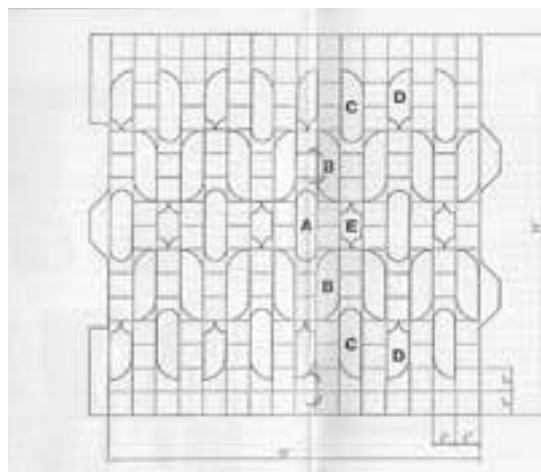


Abb. 36
Schablone des Cut-up Modells von Ian Sommerville.



Abb. 37
I.S.I.S. Brille und Modul
zur Ansteuerung.

1968

I.S.I.S. - Integrating Stimulating Intensity Stroboscope

I.S.I.S. ist das erste batteriebetriebene Licht-Klangsystem zur audiovisuellen Stimulation, welches für die Öffentlichkeit gedacht war. Das Gerät konnte Licht- und Klangimpulse mit verschiedenen Stimulationsfrequenzen erzeugen. Der I.S.I.S. hatte ein Drehregler, über welchen der Benutzer entweder Beta-, Alpha-, Theta- oder Delta- Frequenzen für die Stimulation auswählen konnte. Synchron mit dem Licht gepulst, konnte Pink Noise über Kopfhörer gehört und über einen Lautstärkeregler eingestellt werden. I.S.I.S. wurde als Hilfsmittel zur Entspannung verkauft.



Abb. 38
I.S.I.S. Brille von innen,
erinnert an eine umgebaute
Schweißerbrille.



Abb. 39
Synchro Energizer im Einsatz
in der Natur am Meer.

1982

Synchro Energizer

Die Lichtbrille des Synchro Energizer's war eine umgebaute Brille, in welcher sich anstatt der Gläser vor jedem Auge ein auswechselbarer Ring mit jeweils vier reaktionsschnellen Glühbirnen befand. Die Klangimpulse wurden dabei ebenfalls über Stereokopfhörer übertragen.



Abb. 40
Nahaufnahme des Synchro
Energizer mit Kopfhörern.



Abb. 41
D.A.V.I.D. 1 - von Dave
Siever entwickelt.

1984

Digital Audio Visual Integration Device (D.A.V.I.D. 1)

Das D.A.V.I.D. 1 ist das erste qualitativ hochwertige, klinische System für audiovisuelles Brainwave-Entrainment. Der DAVID₁ wurde im universitären Kontext entwickelt als Mittel, um Studenten das Lampenfieber vor Bühnenauftritten zu nehmen. Die Lichtimpulse erfolgten über reaktionsschnelle Glühbirnen, die in eine Ski-Brille montiert wurden. Vier unterschiedliche Varianten von Klangimpulsen und weißem Rauschen konnten erzeugt werden. Ebenso wurde ein Mikrophon und ein Stereo-Mixer miteingebaut. Es wurden 150 Geräte produziert.



1986

DZIDRA Glass

Das DZIDRA Glass ist eine Brille mit pulsierenden LCD-Brillengläsern aus den 80er Jahren. Sie soll Entspannung fördern, Muskelverspannungen verringern und wurde zur Linderung von muskular bedingten Kopfschmerzen (Spannungskopfschmerzen) eingesetzt. Die Flüssigkeitskristalle in den Brillengläsern werden durch elektrische Spannung polarisiert und dadurch lichtundurchlässig gemacht. Bei Abwesenheit der Spannung schalten die Gläser auf lichtdurchlässig. So lässt sich eine pulsierende Stimulation des durchfallenden Lichtes auf die Augen erreichen. Da die LCD-Technologie in den 80er Jahren noch nicht so weit entwickelt war, waren lediglich Hell-Dunkel Schaltungen von 1-3Hz möglich. Diese langsamen Oszillationen gleichen in der Frequenz denen der langsamen Delta-Wellen. Glen Solomon, ein US Air Force Doktor, untersuchte die Brille in der Studie „Slow Wave Photic Stimulation in the Treatment of Headache - a Preliminary Report“ und kam zu dem Schluss, dass sie tatsächlich Entspannung fördert und somit eine effiziente Behandlungsmethode bei Spannungskopfschmerz darstellt: „We conclude that in this preliminary report, slow wave photic stimulation appears to

be effective in the treatment of acute and chronic muscle-contraction type headache.“⁷³.

Eine Brille mit LCD-Gläsern stellt eine weitere Methode zur visuellen Stimulation dar: Anstatt Licht aktiv in einer gepulsten Frequenz zu erzeugen, wird hier mit der Unterdrückung des Umgebungslichts gearbeitet. Dieses Phänomen kommt der Technik zur Erzeugung von Pseudo-Halluzinationen nach Purkinje sehr nahe. Da man inzwischen über die nötige Geschwindigkeit zur Erzeugung von Hell-Dunkel Schaltung von bis zu 400 HZ in der LCD-Technologie verfügt, eröffnen sich ganz neue Möglichkeiten einer Mindmachine mit LCD-Brille zur visuellen Stimulation. Als Lichtquelle können unbegrenzt viele Kombinationen aus natürlichem und elektrisch erzeugtem Licht erprobt werden. Des Weiteren ist eine Stimulierung bei geöffneten Augen unter Alltagsbedingungen möglich und eine Mindmachine „getarnt“ in unauffälligen Brillengläsern könnte die Akzeptanz der Technologie begünstigen.

Aktuelle Systeme

Die heute erhältlichen Systeme bieten integrierte Programmen für die verschiedensten Anwendungsbereiche wie die Förderung von Entspannung, Konzentration, Auffassungsgabe, Gedächtnisleistung, Vitalität, Wohlbefinden, Kreativität, Imagination, Meditation, Trance, Schlaf. Diverse weitere Features, wie zum Beispiel die Möglichkeit der Erstellung eigener Programme, die interaktive Verwendung zusammen mit Biofeedbacksystemen oder den Einsatz externer Stimulationsprogramme, die als Download bereitstehen, sind bei den teureren Geräten enthalten. Physiologisch fundierte und seriösere AVS-Systeme kosten ungefähr 500€ und bieten optional erhältliche Session Editor Software an, welche in einem ähnlichen Preissegment liegt. Möchte man also wissenschaftlich getestete Geräte benutzen, ist der Preis eine große Hürde, die man ohne gesammelte Erfahrung nicht so einfach in Kauf nimmt.

Mind Alive David Alert Pro



Abb. 43
David Alert Pro mit CES-Funktion
für 570 €.

Psio Psio Eyes



Abb. 44
kabellose Psio Eyes mit mehrfar-
biger Brille für 370 €.

Neurotronics Laxman



Abb. 45
Laxman Light and Sound
Machine mit den patentierten
„All-Color Ganzfeld Open-Eye
Goggles“.

VISUELLE STIMULATION

Beim Blick mit geschlossenen Augen in intensives, flackerndes Licht, beginnt man dynamisch wirbelnde geometrische Muster mit leuchtenden Farben zu sehen. Man weiß, dass sie bei geöffneten Augen verschwinden, und doch ist Ihre Erscheinung so real wie jede andere Wahrnehmung. Die visuellen Eindrücke sind Kern der Erfahrung bei der Benutzung von Mindmachines und für jede Person ein schwer zu beschreibendes Erlebnis. Einige berichten von unterschiedlich komplexen Mustern, andere erzählen von traumähnlichen Zuständen. Um zu verstehen, wie sie entstehen, ist ein Blick auf die Physiologie des Nervensystems und die Anwendung in der Forschung hilfreich. Im folgenden Teil wird ein Überblick der geschichtlichen Entwicklung gegeben.

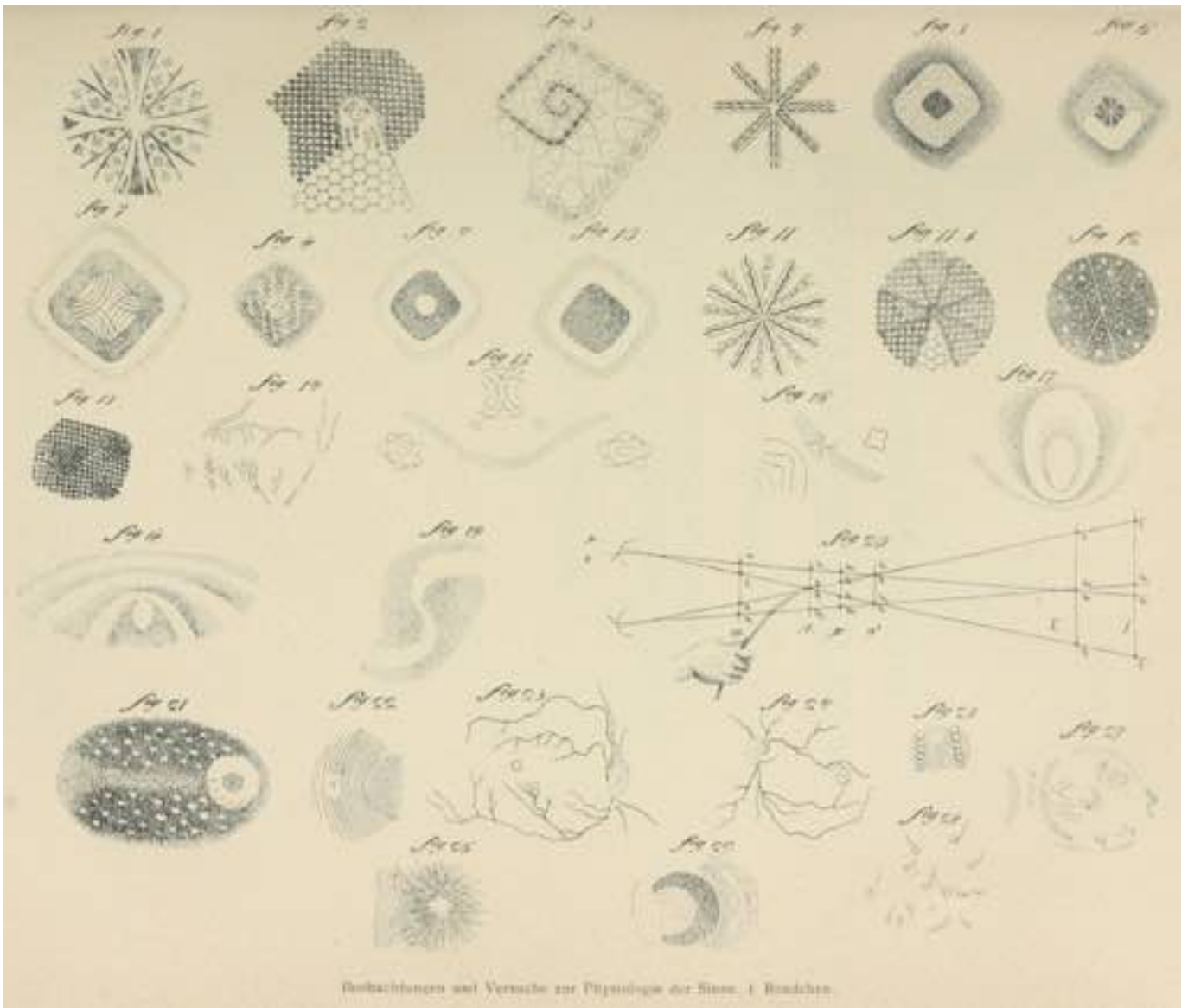
Durch Flackern induzierte Halluzinationen sind seit dem frühen 19. Jahrhundert Gegenstand der Forschung. Wissenschaftliche Untersuchungen des Phänomens haben ihre biologische Herkunft aufgefunden gemacht, sowie mathematische/dynamische Modelle der visuellen Musterbildung und-Erkennung entwickelt, um sie mit anderen Arten von Halluzinationen, z. B. bedingt durch Epilepsie oder Drogenkonsum zu vergleichen.

Einer der ersten offiziellen Berichte wurde 1819 von Purkinje zusammengefasst, der die verschiedenen Muster wie Kreuze, Sterne und Spiralen wahrgenommen hatte, als er mit der Hand zwischen seinen Augen und einem Gaslicht winkte⁷⁴. Durch die phänomenale Erfahrung fasziniert, experimentierte Purkinje mit dem Verfahren und ermutigte die Probanden, die erfahrenen Wahrnehmungen zu zeichnen. Er identifizierte zwei Hauptkategorien

von Mustern: Grundmuster, bestehend aus geometrischen Formen (Rechtecke, Kreise, Sechsecke) in Schachbrett- oder Waben-Arrangements und Sekundärmuster⁷⁵.

Sein Zeitgenosse Brewster, ein Physiker aus Schottland, erzeugt ähnliche Bilder, als er an nebeneinander gleichmäßig verteilten vertikalen Geländern entlang lief und dabei den Blick auf die dahinter liegende Sonne gerichtet hatte. Das dadurch erzeugte Schachbrettmuster verglich Brewster mit dem „leuchtendsten Schottenstoff“⁷⁶. Weitere Untersuchungen wurden von Helmholtz in seiner physiologischen Optik gemacht, er prägte auch den Begriff „Schattenmuster“⁷⁷.

Das Phänomen wurde bis zur Erfindung des EEG von Berger in den 1920er Jahren weitgehend vergessen. Die Auswirkungen von Blitzlicht auf das Gehirn wurden plötzlich von Interesse, als sie in verändernde Muster elektrischer Aktivität übersetzt werden konnten. Mit einem Autoscheinwerfer, der durch ein sich drehendes Rad mit Speichen scheint, zeigten Adrian und Matthews im Jahr 1934, dass durch Flackern (Frequenzen im 8-12 Hz Alpha-Bereich und höher) „ein koordinierter Beat“ auf den Alpha-Rhythmus einer Versuchsperson auferlegt werden kann, die vor der Lampe mit geschlossenen Augen sitzt⁷⁸. Eine Einschränkung der Methode war jedoch, dass um die Frequenz des Flackerns zu erhöhen, sich das Rad schneller drehen musste, wodurch die Dauer der Blitze verkürzt wurde. Das Problem der unbeständigen Lichtblitze wurde durch die Verwendung des ersten elektronischen Stroboskops kurz nach dem Zweiten Weltkrieg überwunden. Danach

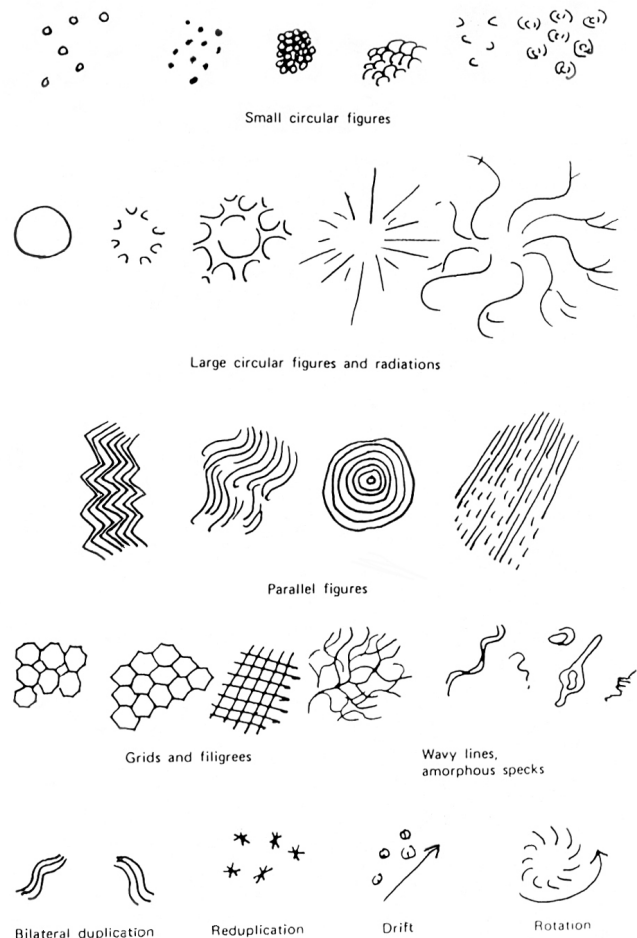


Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. I. Bandchen.

wurden die visuellen Halluzinationen im Labor genauer untersucht. In seinem Buch „The Living Brain“, schrieb der Neurophysiologe und Roboterforscher William Grey Walter über „wirbelnde Spiralen, Whirlpools ([und] Explosionen (...) beim Testen eines Geräts zur Behandlung von Epilepsie stolperten wir über einer dieser natürlichen Paradoxien, die das sicherste Zeichen einer verborgenen Wahrheit ist“⁷⁹.

Abb. 51
Zeichnungen von Purkyne zu Beobachtungen und Versuchen der Physiologie der Sinne.

Abb. 47
Heinrich Klüver's
Formkonstanten



Im Psychologischen Laboratorium in Cambridge (Großbritannien) unternahm Smythies Anfang der 1960er Jahre mehrere groß angelegte Studien. Um die Muster wissenschaftlich zu untersuchen, ging er ähnlich vor wie Purkinje zuvor, nur mit moderner Technologie. Er wertete die Beschreibungen der Probanden aus und ordnete die geometrischen Muster in unterschiedliche Gruppen ein. Die wiederkehrenden geometrischen Figuren sind auch als „Formkonstanten“ bekannt und können mit anderen Mitteln, wie psychedelischen Drogen, Schlaf (hypnagoge Halluzinationen) oder durch Nahtoderfahrungen hervorgerufen werden⁸⁰.

Smythies⁸¹ legt mehrere Erklärungen für die Halluzinationen vor. In seiner ersten Hypothese geht er davon aus, dass die Muster retinale Strukturen, wie Gefäße oder pigmentierte Zellen darstellen. Seine zweite Hypothese basiert auf der Idee von Walter, dass die Alpha-Wellen einen visuellen Scan-Mechanismus repräsentieren und die Halluzinationen durch Interferenz zwischen Flimmern und Scan-Mechanismus⁸² verursacht werden. Die Formen der Bilder könnten verschiedene Scan-Raster darstellen, zum Beispiel das Scannen mit parallelen oder strahlenförmigen Linien (Abb. 48). In seiner dritten Hypothese beschreibt er, dass die Bilder durch spontane Aktivität von kortikalen Neuronen kommen, die keine Ahnung von dem Reiz, dem sie ausgesetzt sind, haben und „ihre eigenen Hypothesen“ erstellen. Seine vierte Hypothese ist, dass die Bilder durch Anregung bestimmter Schaltungen zwischen der Netzhaut und kortikalen Neuronen (gemusterte Aktivität) verursacht werden.

Ffytche erarbeitete 2008 aufgrund der letzteren Hypothese die Annahme, dass die Bilder eine Verschiebung der thalamokortikalen Aktivität darstellen.⁸³ Während dieser Verschiebung werden Aktionspotentiale unterschiedlicher Art weitergeleitet, zum einen Zustände, die bei Wachheit aktiv sind, und zum anderen Zustände, die vorwiegend im Tiefschlaf stattfinden. Durch die spontanen Salven verschiedener Aktionspotenziale kann Eingabe und Ausgabe teilweise dissoziiert werden, was halluzinationsbezogene Aktivität zur Folge hat. Zentral für Ffytches Idee ist, dass Halluzinationen nicht durch veränderte Aktivität in bestimmten Hirnbereichen hervorgerufen werden, sondern durch veränderte

Konnektivität zwischen verschiedenen Bereichen verursacht werden. Die Studien von Ffytche haben gezeigt, dass das Stroboskop durch Änderungen der neuronalen Aktivität von Thalamus zum Kortex ein geeignetes und zuverlässiges Werkzeug für die Induktion von visuellen Bildern ist.

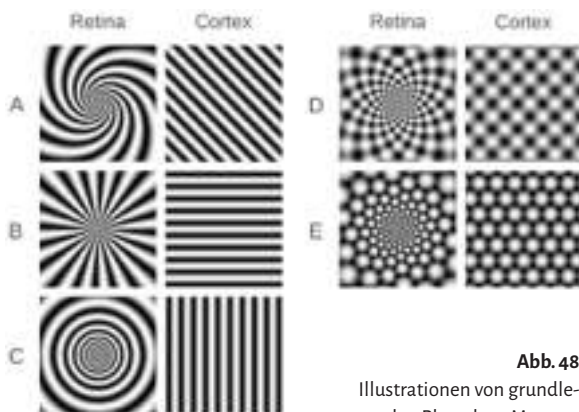


Abb. 48
Illustrationen von grundlegenden Phosphen-Mustern und ihre Transformation zu kortikalen Koordinaten.

Eine weitere Studie von Michael Rule, Matthe Stoofregen und Bard Ermentrout 2011 demonstriert, dass die geometrischen Formen der Muster eng mit der Frequenz des Flackerns zusammenhängen⁸⁴. Mit modernen Berechnungsmethoden werden mathematische Modelle erstellt, anhand dessen man die Erzeugung der Muster beschreiben kann, die nachfolgend abgebildet sind.

Die Abbildung 49 zeigt ein Zwei-Parameter-Phasendiagramm. Jedes kleine Quadrat ist eine Simulation eines Netzwerks mit einer vertikal dargestellten Amplitude und mit der Zeit auf der Horizontalen. Wie bei einer Raumdimension, gibt es zwei Inseln der Musterbildung. Bei kurzen Abständen (Hochfrequenz), sind die meisten der Muster streifenförmigen (einschließlich labyrinthischer Muster), während bei langen Abständen (Niederfrequenz), die Muster von Sechsecken dominiert werden.

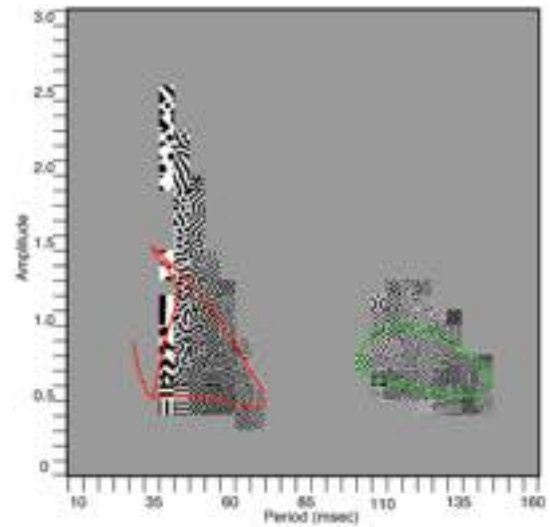


Abb. 49
Die Veränderungen der Muster werden über Zeit und Amplitude in entsprechenden Abständen gezeigt.

Das so genannte „Flackerphänomen« galt in den frühen Tagen der Wissenschaft vor allem als Kuriosität und wurde in den 1960er Jahren durch die Dreamachine zum Kultobjekt. Heutzutage wird flackerndes Licht verwendet, um die komplexen Mechanismen zu modellieren, denen die meisten visuellen Halluzinationen zugrunde liegen. Ebenso erläutern neue wissenschaftliche Erkenntnisse, inwiefern eine vergleichsweise simple Technologie die Hirnaktivität verändern kann und welche Parameter dabei eine Rolle spielen. Spannend für unsere Arbeit ist, wie sich Bewusstseinszustände in der Formsprache der Bilder widerspiegeln und dass wir durch AVE bestimmte Muster und damit verbundene Effekte gezielt hervorrufen können. Die Komplexität der subjektiven Erfahrung wird dadurch in keinster Weise abgedeckt, aber eine ungefähre Einschätzung der visuellen Wahrnehmungen wird dadurch ersichtlich und für eine Evaluation besser nutzbar.

AUDITIVE STIMULATION

Während die einen Wissenschaftler das Feld der visuellen Stimulation ergründeten, befassten sich andere mit der Erforschung der auditiven Stimulation. Zunächst beschränkte sich die auditive Stimulation lediglich auf rhythmische Klangimpulse, fand durch den einfachen Gebrauch mit vorhandener Technik und die eingängige Wirkung weite Verbreitung als Entspannungstechnik. Experimente bestätigten, dass das Gehirn dabei mit erhöhter Gehirnwellenaktivität auf die entsprechende Frequenz reagiert und beide Gehirnhälften in einen Zustand größerer hemisphärischer Kohärenz (Gleichschaltung) gebracht wurden.

Der Biophysiker Dr. Gerald Oster entdeckte 1973, dass sich die Gehirnwellenaktivität auch beeinflussen lässt, indem man beide Ohren getrennt mit Tönen verschiedener Frequenz beschallt⁸⁵. Kombiniert man zwei auf unterschiedliche Frequenzen eingestellte Oszillatoren und schickt ihre Signale durch einen oder auch zwei getrennte Lautsprecher (so dass sie sich erst in der Luft vermischen), dann erzeugen sie eine sehr regelmäßige Interferenzschwingung, die man sowohl mit beiden, aber auch mit einem Ohr wahrnehmen kann. Diese Signale nannte er monaurale Beats. Ein ganz anderes Phänomen jedoch entsteht, wenn man Stereokopfhörer benutzt und die Signale den beiden Ohren getrennt zuführt. Auch dann nimmt man unter bestimmten Umstän-

den rhythmische Schwingungen wahr, die sich allerdings deutlich von den monauralen unterscheiden. Diese Signale nannte er binaurale Beats.

Allerdings liegen die meisten Frequenzen, die die elektrischen Impulse in unserem Hirn erzeugen, unterhalb der Wahrnehmungsgrenze unseres Hörsinns. Mit Hilfe von binauralen Beats können nun aber diese Frequenzen gezielt direkt im Hirn erzeugt werden, wobei nicht die Schwebungsfrequenz entscheidend ist, sondern die Frequenz, mit der diese pulsiert bzw. oszilliert. Dabei wird dem Hirn eine bestimmte Frequenz angeboten, je nachdem welcher Bewusstseinszustand erreicht werden soll. Die wahrgenommene Frequenz entspricht dabei einem der fünf neurologisch relevanten Frequenzbereiche (Delta, Theta, Alpha, Beta, Gamma) und veranlasst das Gehirn aufgrund des Resonanzprinzips, auch Frequenz-Folge-Prinzip (FFP) genannt, sich dieser Frequenz anzunähern⁸⁶, wie EEG-Messungen gezeigt haben.

Das FFP ist effektiver, wenn die wahrgenommene Frequenz der binauralen Beats nahe der vorherrschenden Hirnfrequenz liegt und dann zum Beispiel für einen entspannten Zustand langsam gesenkt wird. Stimuliert man also das rechte Ohr beispielsweise mit einem konstanten und gleichmäßigen Ton von 400 Hz und das linke mit einem konstanten

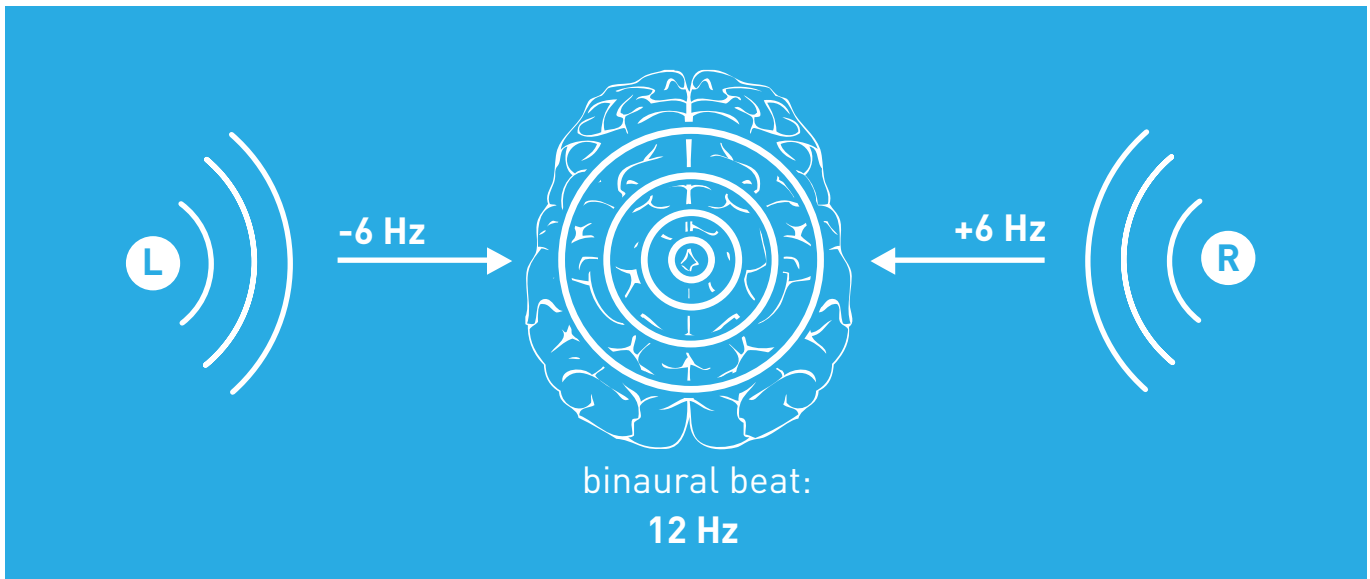


Abb. 50
Schematische Erklärung der Entstehung eines binauralen Beats von 12Hz.

Ton von 410 Hz, so entsteht im Gehirn eine binaurale Schwingung von 10 Hz, in diesem Fall also eine Frequenz im Alpha-Bereich. Den Ursprung der binauralen Beats vermuten Forscher im Nucleus olivaris superior, einem Teil des Hirnstamms. Er ist Teil der Hörbahn und seine Neuronen sind an der Lokalisation von Schallquellen beteiligt, indem sie Laufzeit- und Pegelunterschiede zwischen beiden Ohren auswerten⁸⁷.

Einige empfinden den Klang purer Sinuswellen als unangenehm, daher werden die binauralen Beats meist in Trägersounds wie Naturgeräusche und harmonische Kompositionen eingebettet. Die Frequenz-Kompositionen der Mindmachines werden als Sessions bezeichnet und bestehen in der Regel aus diesen drei Tonspuren. Alle erhältlichen Sessions sind statisch und der Hörer wird angeleitet, das Geschehen auf sich wirken zu lassen. Wie wir bereits herausgefunden haben, erhöht das FFP den Effekt durch die Übereinstimmung von Stimulation und Hirnaktivität. Die Gleichartigkeit der Wirkungsweise beider Methoden bestätigt unser Vorhaben individualisierte Sessions mit Hilfe der eigenen Gehirnwellen zu generieren.

NEUERFINDUNG DER MIND- MACHINE

Im folgenden Teil wird unsere praktische Versuchsreihe im Umgang mit der Mindmachine und deren Weiterentwicklung als Werkzeug zur Übertragung von Gemütszuständen beschrieben. Der Prozess im Kurs „Messing with our Minds“ sowie die Weiterführung des Projekts in den folgenden zwei Jahren werden vertieft und nachvollziehbar dargestellt.



Abb. 51
Vorbereitungen und Aufbau
auf dem Freqs of Nature
Festival.

Abb. 52
Mitch Altmans Guide glasses
alias MAKE Brain Machine.



MAKER BRAINMACHINE

Als Einstieg zur Auseinandersetzung mit AVE Systemen bauten wir (Christopher Pietsch, Luis Grass und Michael Härtel) die Maker Brain Machine von Mitch Altman mit dem Arduino nach. Im Vergleich zu kommerziellen AVE-Systemen, die mit 100 - 500 € für einfache Experimente zu teuer und in den meisten Fällen schwer zu modifizieren sind, hatten wir mit der Brain Machine die Gelegenheit für wenig Geld einen ersten Eindruck der Technologie zu bekommen. Für den Nachbau benutzten wir Kopfhörer, an deren Bügel auf der linken und rechten Seite jeweils 3 LEDs befestigt wurden, Arduino und Platine befestigten wir in einem geschlossenem Gehäuse. Die Anfertigung für ein portables und offenes System, welches den Funktionsumfang durchschnittlicher Mindmachines mit der Möglichkeit eigener Programmierung übertrifft, kostete uns weniger als zehn Euro. Wir hatten somit ein Mittel, eigene Erfahrungen im Umgang mit audiovisueller Stimulation zu sammeln und ein einfaches Werkzeug für die Exploration weiterer Konzepte.

Mit diesem Prototypen führten wir erst mal Selbst-

versuche durch, um festzustellen, ob er tatsächlich (so wie angegeben) funktioniert und, wenn ja, welche Wirkungen sich zeigen würden. Fazit war, dass das Gerät wirklich funktionierte. Die einprogrammierte Komposition von Frequenzen beginnt bei 14,4 Hz, führt einen 15 Minuten in tiefere Frequenzen bis 2 Hz und innerhalb weiterer 5 Minuten wieder aufwärts, endend auf der Höhe der Einstiegs-Frequenz. Wir hatten zu diesem Zeitpunkt noch keine Übung in Sachen Meditation und waren nachhaltig von der Wirkung beeindruckt. Wir tauschten die gebaute Brain Machine untereinander, damit es jeder entspannt zu Hause weiter ausprobieren konnte. Im Kurs „Messing with our Minds“ an der FH Potsdam hatten wir die Gelegenheit den Neurowissenschaftler Matti Gärtner zu konsultieren, um Näheres über die Hintergründe der Effekte zu erfahren.



Abb. 53
Ausprobieren des Nachbaus
der MAKE Brain Machine.

Die Entscheidung, die Möglichkeiten dieser Technologie im Kurs weiter zu erforschen war gefallen. Mit der Kombination von Arduino und Processing und der damit verbundenen Option zur Exploration, Erweiterung und Veränderung hatten wir ein spannendes Framework für die Durchführung weiterer Experimente.

Abb. 54
Umgebaute Kopfhörer
werden zur Brain Machine
umfunktioniert.



EEG-BRAINMACHINE EXPERIMENT

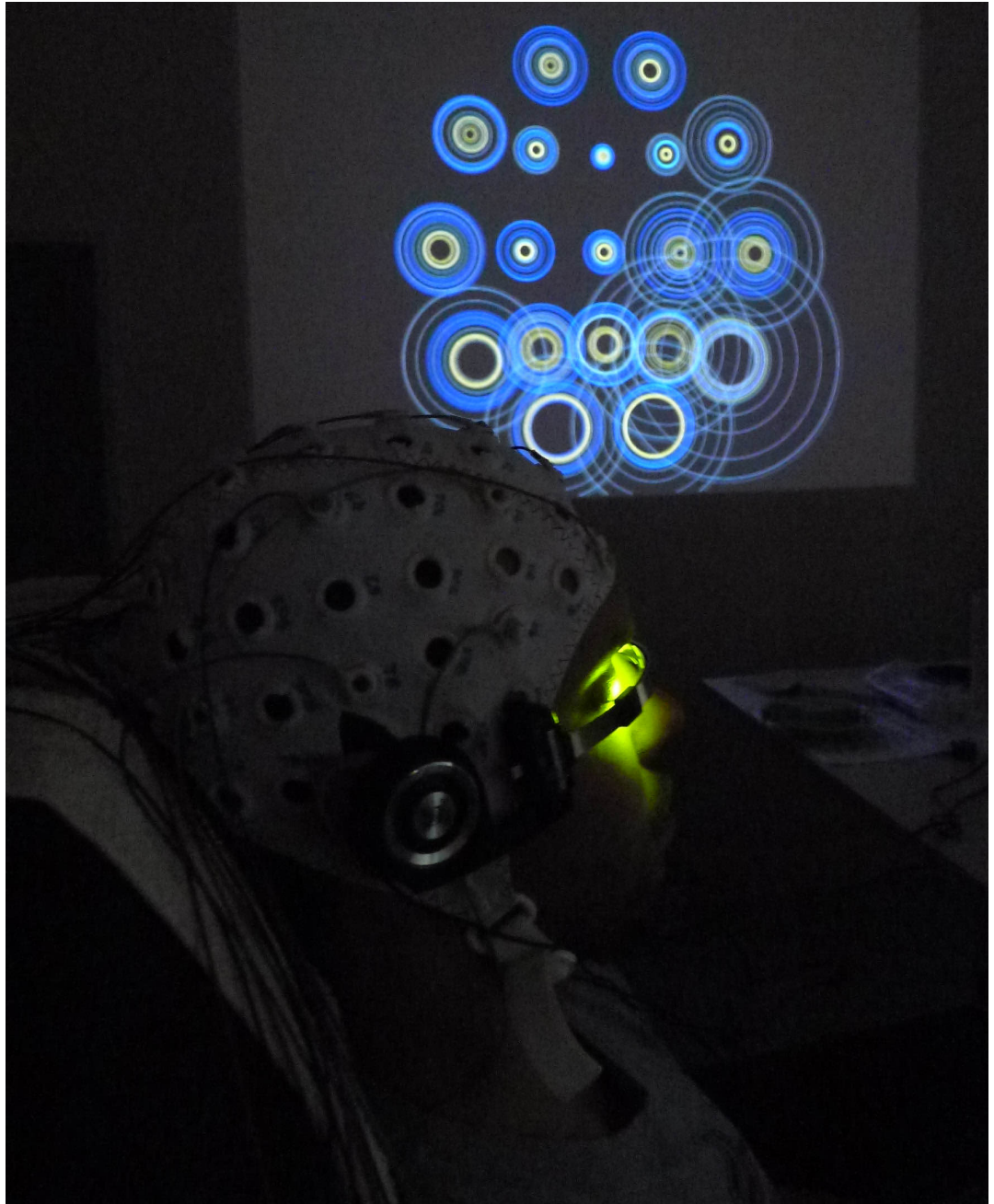


Abb. 55
Brain Machine und EEG,
Visualisierung des EEGs
im Hintergrund.



Abb. 56
Übersicht des Versuchsaufbaus im EEG Labor.

Im Cluster „Languages of Emotion“ der FU Berlin konnten wir die Auswirkungen der Brainmachine im EEG-Labor nachprüfen. Die Verwendung der OSC/Processing Bridge von Willy Sengewald ermöglichte uns die Visualisierung der Live-EEG-Daten aus MATLAB, die unter Neurowissenschaftlern weit verbreitete Software zur Analyse von Gehirnwellen. Um so früh wie möglich Visualisierungsideen für die Live-Daten auszuprobieren, bekamen wir ein aufgenommenes EEG-Set mit normalisierten Werten – 19 Signale mit jeweils drei Untersignale-, die wir auf einfache Art und Weise abfragen und dann darstellen konnten. Für das Experiment entwickelten wir einen Sketch, der die vorherrschende Frequenz der Elektrode einfärbt und durch Veränderung des Radius der Ringe die Amplitude beschreibt.

Der Proband war Chris und da er gleichzeitig programmierte, um die Darstellungsergebnisse zu optimieren, kam es zu Neurofeedback-Situationen. Dies bedeutet, dass man seine eigenen EEG-Signale sieht und dadurch seine EEG-Signale beeinflusst. Die Session dauerte mehrere Stunden – allein schon deshalb, weil der Anschluß es EEG eine zeitraubende Angelegenheit ist.

Ausgestattet mit einer klinischen EEG-Haube und unserer modifizierten Brain Machine waren wir in der Lage Grundlagenforschung zu betreiben. Wir fanden unter anderem heraus, dass die Frequenzab-

folgen der Session im EEG nachvollziehbar und zum Teil eindeutig zu erkennen sind. Von dem Ergebnis begeistert und sichtlich von der neuen Art EEG-Daten darzustellen beeindruckt, versicherte uns Matti Gärtner, dass die Evaluation dieses Themas auch wissenschaftlich sehr spannend sei und wir definitiv unser Vorhaben weiterverfolgen sollen. Unsere Vermutungen waren nun also von einem Neurowissenschaftler bestätigt und durch EEG-Analysen validiert. Inspiriert und mit einem guten Gefühl, dass man in einem wissenschaftlichen Feld neue Impulse geben kann, konzipierten wir unser Projekt für die Lange Nacht der Wissenschaften (LNDW). Die Übertragung von Gehirnwellen von einer Person auf andere wurde als Ausblick festgemacht.

BRAINSTATESHARING

Bei einer Vorführung mit Willy Sengewald kamen wir zu dem Schluß, dass wir versuchen wollten, den Probanden, der ans EEG angeschlossen werden sollte, mit unserer Brainmaschine zu manipulieren. Die gemessenen Signale sollten dann an eine Gruppe Freiwilliger übertragen werden, für die wir weitere Brainmachines benötigten.

Aus diesen Ideen wurde das Projekt mit dem plakativen Namen «Brain State Sharing». Wir wollten nun herausfinden, ob EEG-Daten an andere Personen weitergeleitet werden können und wie man so etwas realisieren kann. Für die «große» Brain Machine gab es dann zwei Varianten der Umsetzung. Naheliegender wäre der Einsatz mehrerer Brain Machines gewesen. Dafür hatten wir zwar ein Szenario skizziert, doch der Bau und die parallele Ansteuerung mehrerer Brillen wäre aufwendiger gewesen als die Alternative. Ein Processing-Programm würde die visuellen Signale (einfacher Wechsel zwischen rotem und schwarzem Hintergrund) auf eine Leinwand projizieren und zusätzlich das akustische Signal über den Audioausgang des Rechners ausgeben. Die Freiwilligen, an welche die EEG-Signale weitergeleitet werden sollten, würden dann vor dem Beamer sitzen – allerdings dessen Licht direkt ausgesetzt. Auf der anderen Seite

der Leinwand würde das Publikum nur die Silhouetten und die von der Decke hängenden Kopfhörerkabel im flackernden Licht des Projektors sehen.

Wir mussten nun noch die beste Möglichkeit herausfinden, die Augen der Probanden vor dem Beamerlicht zu schützen und trotzdem eine angemessene Durchlässigkeit für das Licht zu gewährleisten. Wir bauten das Szenario auf und probierten verschiedene Materialien aus – hauptsächlich Folien. Trotz interessanter Ergebnisse entschieden wir uns dafür, uns selber Diffusoren zu bauen, in die wir auch die Kopfhörer einlassen konnten. Als Grundlage benutzten wir, angelehnt an Richard Altcrofts' „Infinity Projector“, transparente Kugeln, die aus zwei Hälften bestanden. Aus diesen Hälften wollten wir sowohl die »Brillengläser« bauen, als auch – aus einer kleineren Variante – die Kopfhörerschalen. Das Ganze sollte dann mit einem Gummiband und einer Schnalle verbunden werden, um den festen Halt der Mindmachines zu gewährleisten.



Abb. 57 oben
Session zu dritt mit neuen Goggles und der Beamer Mindmachine.



Abb. 58 links
Ansicht von hinten.

Abb. 59 unten
fertig zusammengestellte Goggles für die Lange Nacht der Wissenschaften.

Bau der Mindmachines

In die Kunststoffhüllen frästen wir Schlitzte und feilten sie glatt aus. Danach wurden die Hüllen von innen angeschliffen, damit der Lack besser hält. So sollte ausreichend Licht zum Auge vordringen, das direkte Durchscheinen jedoch verhindert werden. Da alle Kugeln relativ scharfe Kanten hatten, mussten wir sie noch mit Gummis zum Schutz präparieren. Am Ende wurden die Teile vernäht und zusammengebaut.





2011

Vorführung bei der Langen Nacht der Wissenschaften

Wir hatten im Laufe des Nachmittags unsere erste Brain Machine zum Testen ausgestellt und schon bald kamen viele Interessierte, die sie ausprobieren wollten. Manche hielten es bis zu 20 Minuten damit aus, andere sagten nach weniger als einer Minute, dass es ihnen unangenehm sei und sie aufhören wollen. Zur besseren Wirkung hatten wir das Arduino-Board in einen Kasten integriert, an den die Brain Machine dann angeschlossen wurde. Der Kasten stellte nicht nur die Stromversorgung über eine Steckdose sicher, sondern diente auch als „Pseudobedienelement“ der Brain Machine, an dem wir vorgaben, die jeweiligen Frequenzen einzustellen.

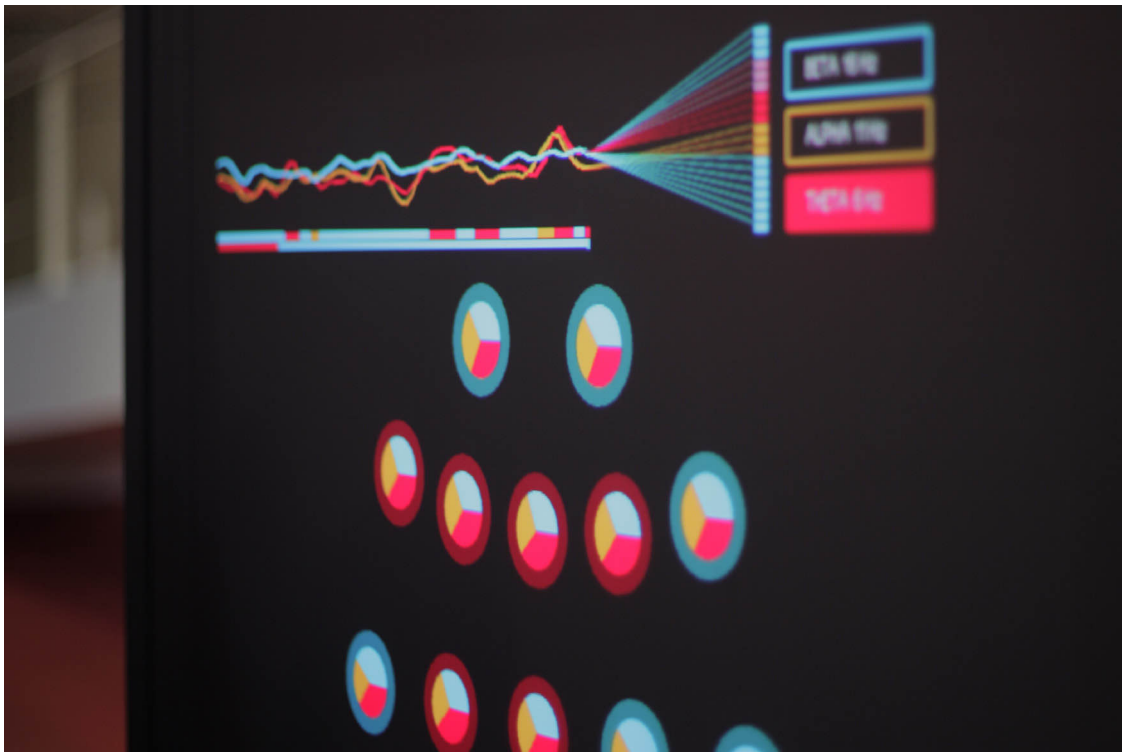


Abb. 60 links
Meditierende Person mit EEG und drei Probanden mit Mindmachine hinter der Leinwand.

Abb. 61 links unten
Besucher mit Brain Machine Prototyp.

Abb. 62 rechts
Live-Visualisierung der EEG-Daten.

Visualisierung der Daten

Bei der LNDW gab es einen meditierenden Probanden, ausgestattet mit einem klinischem EEG. Die Visualisierung der Hirnaktivität und des Prozesses sollte gleichzeitig erklärenden Charakter haben. Die 19 Elektroden wurden mittig auf dem Screen so positioniert, wie sie auch auf dem Kopf angebracht waren. Die Elektroden, jeweils als Kreis- und Tortendiagramme dargestellt, zeigten an, welche der drei Frequenzbänder in der Elektrode zum aktuellen Zeitpunkt aktiv waren. Das darüberliegende Tortendiagramm zeigte die einzelnen Anteile der Bänder am Gesamtwert der Elektrode an. Dazu gab es am oberen Rand einen Verlauf, in welchem die Daten zusätzlich live eingetragen wurden. Die vorherrschende Frequenz aller Elektroden wurde auf eine Timeline übertragen. Sie zeichnete den aktuell höchsten Wert und die Durchschnittswerte zu früheren Zeitpunkten auf. So visualisierten wir die Werte, welche wir vom Probanden bekamen und die, die wir für die Steuerung der Mindmachine nutzten. Anschließend begannen wir mit dem eigentlichen Experiment. Wir fragten im Publikum nach Freiwill-

ligen, die das Broadcasting von Gemütszuständen testen wollten. Drei Freiwillige konnten gleichzeitig auf der Rückseite der Leinwand Platz nehmen und sich ins Licht des Beamer setzen. Sie bekamen die Mindmachines aufgesetzt und kurz darauf starteten wir das Programm. Das Publikum sah die Silhouetten der Teilnehmer und die herunterhängenden Kopfhörerkabel im Flackern des Beamerlichts. Die ursprünglich auf der Leinwand gezeigte Live-Darstellung der EEG-Daten wurde nun an eine Wand projiziert, damit die Zuschauer die Daten weiter verfolgen können. Da viele Freiwillige testen wollten, zog sich das Experiment lange hin. Die Berichte der Tester reichten von Traum-ähnlichen Zuständen bis hin zu angeregten Beschreibungen der erlebten Muster. Eine Probandin schlief sogar ein, als der Proband, der die Daten lieferte, in aller Ruhe meditierte.



2011

Immersive Mindmachine - FullDome Installation

Bis zum Semesterende, an dem unsere Projekte im FullDome dargestellt werden sollten, gab es für die Visualisierung noch viel zu tun. Die Geometrie des Domes erfordert eine spezielle Darstellung und diejenige, welche wir in der FU benutzt hatten, war für eine Kuppelprojektion nicht geeignet. Wir benutzten im Dome wieder den gleichen Experimentaufbau wie bei der LNDW – dieses mit vier statt drei Probanden. Die Daten wurden als Raster an die FullDome-Decke projiziert.

Dabei war es Ziel der Visualisierung, Muster in den Gehirnstömen zu erkennen. Die EEG Daten wurden in eine 4x4 Matrix übersetzt und entsprechend der vorherrschenden Wellenart - Beta, Alpha oder Theta - durch farbige Rechtecke codiert. Zum Zwecke der Übersicht und Abstrahierung wiederholten wir die Matrix platzfüllend einige Male auf der Kuppelfläche. Die so entstandene Visualisierung hatte als Nebeneffekt eine leicht berauschende Wirkung, da durch das Pulsieren der Signale vom Gehirn des Probanden ein simultanes Flackern im FullDome ausgelöst wurde.

Abb. 63

Ansicht der Kuppelprojektion im Powerdome 360° in der Orania Potsdam.



Abb. 64
Ansicht der Projektion
und der vier Probanden
mit Mindmachines.



Abb. 65
Nahaufnahme der Teil-
nehmer während einer
Session.



Abb. 66
Setup der ersten
Installation auf dem Freqs
of Nature Festival.

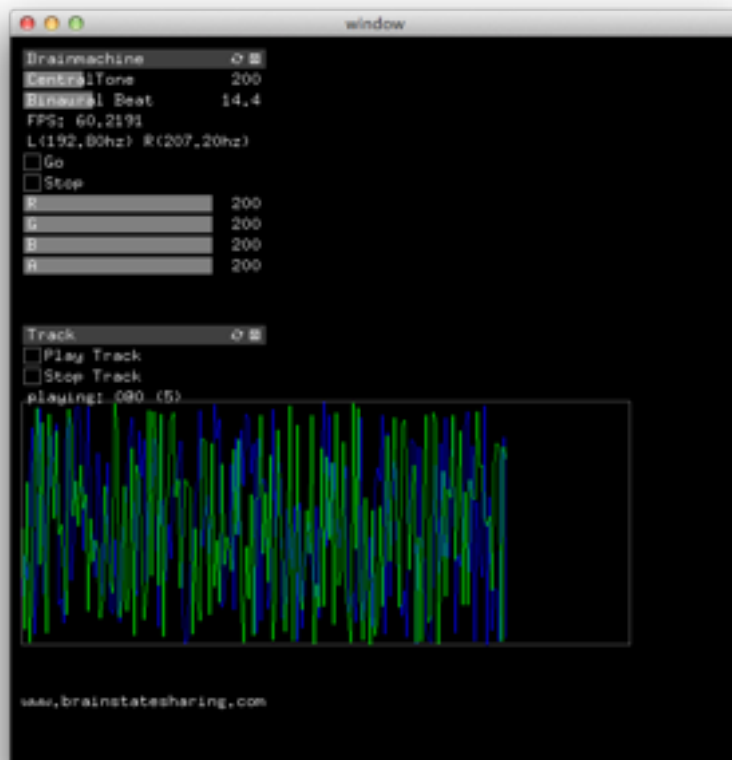
2012

Beamer Visor-Brainmaschine

Nachdem der Kurs abgeschlossen war, wollten wir unser Projekt nicht verstauben lassen sondern weitermachen. Matti Gärtner hatte uns gefragt, ob wir nicht Lust hätten die Brainmaschine auf einem Festival aufzubauen - wir sagten sofort zu. Natürlich war es nicht möglich, das teure EEG aus dem Labor für Festivals zu benutzen. Ebenso ist das langwierige, eine Stunde dauernde Einrichten und die anschließende schwierige Prozedur des Abwaschens der Bleipaste keine attraktive Einladung für Festival Besucher. Durch den Veranstalter hatten wir ein kleines Budget für Hardware und kauften das sehr niederkomplexe Neurosky Headset, welches mit einer

Elektrode an der Stirn und einer Referenzelektrode am Ohr nicht mit einem klinischen EEG zu vergleichen, jedoch umso schneller bei Probanden angebracht ist. Zudem ist das Neurosky Headset wegen seiner Leichtigkeit in vielen Projekten zum Einsatz gekommen, bereits gehackt und gut dokumentiert. Um die Performance der Brainmaschine zu erhöhen und Probleme wie asynchrones Flackern oder unerklärliches Knacken im Ton zu umgehen, wechselten wir zu Openframeworks. Die Tracks konnten jetzt in XML editiert werden und über ein simples Interface geladen und abgespielt werden, ohne das Programm neu zu starten. Die Projektion des Flackerns

Abb. 67
openframeworks GUI zur
Ansteuerung der Beamer
Mindmachine.



erweiterten wir ebenfalls durch bewegte Bilder und wechselnde Farben für eine komplexere visuelle Stimulation. Wir investierten auch in die Qualität der Kopfhörer, um die auditive Stimulation zu verbessern und durch größere Ohrmuscheln Umgebungsgeräusche zu dämpfen. An die Bügel befestigten wir Visoren, die im Gegensatz zu den Goggles keinen Druckkontakt ausüben und somit angenehmer zu tragen und leichter aufzusetzen sind. In einem alten Flugzeug Hangar benutzten wir am Ende eine Kinobank mit vier Sitzen und jeweils einer Visor-Brainmachine, die vor dem Beamer platziert wurde. Das farbige Flackern lockte Interessierte an, am Experiment teilzunehmen. Um den Wissensdurst des neugierigen Publikums zu stillen, gestalteten wir Plakate mit ausführlichen Erklärungen und zur stellen zur Absicherung Warnschilder für Epileptiker auf.

Leider hat die Anbindung an das Neurosky auf dem Festival nicht funktioniert und wir mussten uns mit einer kollektiven Mindmachine zufrieden geben. Es ist zwar nicht verwunderlich, dass auf einem psyche-

delischem Festival das Interesse an Bewusstseins verändernden Methoden sehr groß ist, dennoch hat uns das positive und euphorische Feedback einzelner Leute erstaunt. Nach jeder Session befragten wir die Leute nach ihren Erlebnissen und Erfahrungen. Von Berichten über halluzinative Zustände bis zu euphorischen Beschreibungen von Mustern wurden wir mit individuellen Erfahrungen überschüttet. Neben dem Wunsch nach gemütlicheren Sitzen und ruhigerer Umgebung war das Feedback hinsichtlich der Weiterentwicklung insofern interessant, dass Personen die Tracks anpassen, die Geschwindigkeit verändern und die Stimulation individualisieren wollten. Festivals zu nutzen, um Feedback und Input für die Weiterentwicklung zu bekommen und im Gegenzug eine Gruppe zusammengewürfelter Personen „auf eine gemeinsame Welle“ zu bringen, hat sich für uns ausgezahlt.



Abb. 68
Teilnehmer mit LED Mindma-
chine erlebt eine personali-
sierte Session.

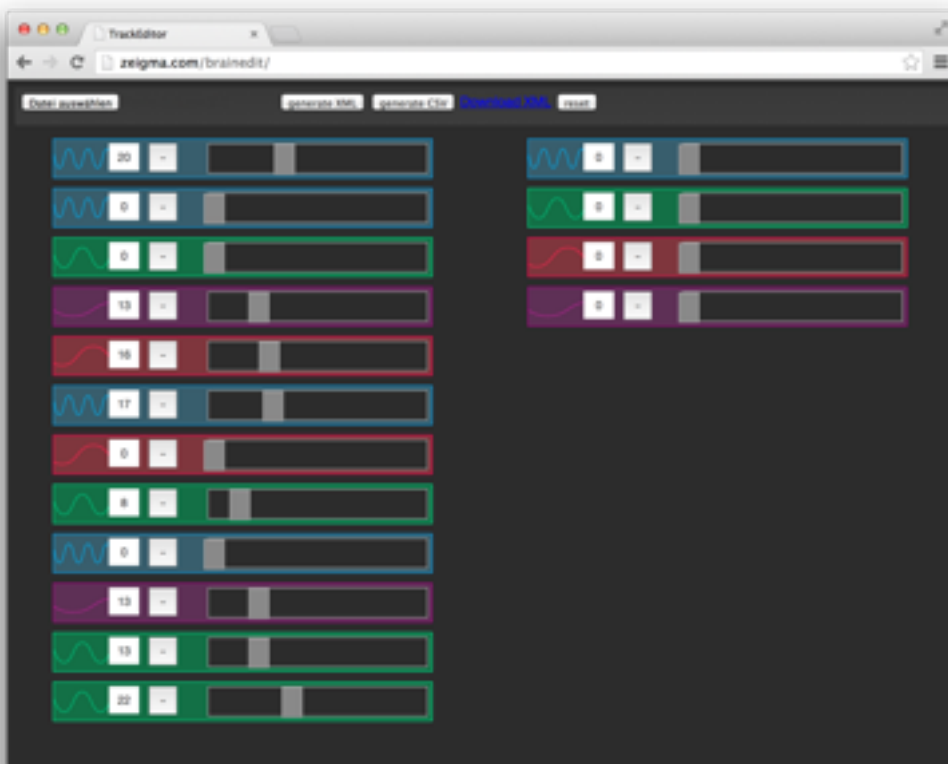


Abb. 69
erster Web Editor zur Erstel-
lung von Sessions.

2013

LED Mindmachine und Session Editor

Während das Erscheinungsbild beim ersten Festival mit Kinobänken und omnipräsentem Flackern des Beamers fast schon aufdringlich wirkte, verlagerten wir das Geschehen an einen ruhigeren Ort mit gemütlichen Liegen und Decken. In der Weiterentwicklung der Mindmachines legten wir den Schwerpunkt auf die Individualisierung der Sessions über ein simples Interface. Bei der Produktgestaltung wechselten wir durch die Verwendung von LEDs und einen abdunkelnden, größeren Visor auf eine intimere Erfahrung.

Wir nutzten Openframeworks zur Ansteuerung und Arduino als LED-Controller Bridge. Im Session Editor wurden die jeweiligen Frequenzbereiche per Drag´n´Drop zu einer neuen Session zusammengestellt und in XML gespeichert. Insgesamt hatten wir Platz und Hardware für drei Personen pro Sitzung. Obwohl der Ort zwar etwas verborgen wirkte, waren die Plätze immer ausgebucht; mit dem Unterschied, dass die Personen im Durchschnitt 45 Minuten auf den Liegen verweilten, fast dreimal so lang. Bevor die Personen mit der ersten Session starteten, wurde eine kurze Erklärung über die Funktionsweise gegeben und abgefragt, welche Präferenzen sie haben, damit wir eine bessere Auswahl der vorgefertigten Tracks treffen konnten. Nach der ersten Session, die ungefähr 15 Minuten dauerte, holten wir ein erstes Feedback ein und ließen die Teilnehmer im nächsten Schritt die Sessions durch den Editor mitgestalten, woraufhin die zweite Session anging. Durch

die intensive Unterhaltung mit oder Befragung der Probanden und das Eingehen auf die persönlichen Bedürfnisse der Teilnehmer, kam es zu wertvollen Gesprächen und konstruktivem Feedback. Die zweite Session wurde zwar nach der Anpassung durchgehend als angenehmer empfunden, allerdings wünschten sich die meisten, die Option in der Komposition mehrere Parameter, wie neue Tonspuren, die Lautstärke des binauralen Beats oder durch einfache Pausen verändern zu können. Leider wurden in der ersten Nacht zwei der drei Mindmachines zerstört, womit nur noch eine Person pro Sitzung stimuliert werden konnte. Das hatte zur Folge, dass die Sitzungen persönlicher und noch länger wurden, über einen Zeitraum von acht Stunden wurden nur sechs Sitzungen durchgeführt. Nach den ausführlichen Gesprächen hatten wir den Eindruck, dass eine simple Individualisierung der Sessions über ein Interface nicht möglich ist und wir unseren Ansatz verfolgen mussten, das Gehirn selbst entscheiden zu lassen, welche Frequenzen es gerade am liebsten hören möchte.



Abb. 70
Gruppenfoto der
Neurovillage Crew.

2014

Neurovillage

Auf dem diesjährigen Festival hatten zum dritten Mal die Gelegenheit, unsere Mindmachine einzusetzen. Gemeinsam mit Matti Gärtner, Willy Döring, Masahiro Kehata und Meta gründeten wir das Neurovillage. Diesmal hatten wir mit einer eigenen Holzhütte einen zentralen Anlaufpunkt für alle Interessierten und einen Raum für offene Experimente mit EEG, Mindmachines und Neurofeedback. Unser Anliegen war das Feld der Neurowissenschaften aus einem anderen Blickwinkel zu beleuchten und durch kreativen Umgang mit EEG-Installationen einen einfacheren und interessanteren Zugang zu schaffen.

Der Andrang und das gesteigerte Interesse an der Sichtbarmachung von Hirnaktivität überstieg unsere Erwartungen bei weitem. Jeden Tag war das Neurovillage gefüllt mit wissbegierigem Publikum. Mit Masahiro Kahata hatten wir ein Teammitglied, das sich seit über 40 Jahren mit der Gehirnforschung befasst, und unter anderem das erste portable EEG gebaut hat und mit namhaften Künstlern wie Mariko

Mori und dem „Guru“ der Hippie-Bewegung Timothy Leary zusammengearbeitet hat. Seine Entwicklung ist der Interactive Brainwave Visualizer (IBVA), ein leicht anzulegendes portables EEG-Headset mit eigens entwickelter Software zum Gehirnwellen-Monitoring und der Möglichkeit 3D-Visuals durch Neurofeedback zu beeinflussen.

In Kombination mit dem IBVA und unserer Mindmachine konnten wir die Wirkung der individualisierten Sessions besser nachvollziehen. Masahiro's Software spezialisierte sich auf die Kohärenz beider Gehirnhälften und lieferte spannende Ergebnisse.

Die Experimente bestätigten uns, dass wir EEG und Mindmachine in einem Produkt vereinen sollten. Für das Festival entwickelten wir den Session Editor in Sachen Bedienung und Funktion weiter. Die Lösung war eine webbasierte Version, bei der Sessions gespeichert und somit möglichst viele Varianten erstellt werden können, die uns im Nachhinein zur Analyse bereitstehen. Unser Vorhaben eine Web-



Abb. 71

Impressionen aus einer Neurofeedback Session zusammen mit einer Mindmachine.

plattform zur Verfügung zu stellen, bei der Mindmachine-Sessions einfach gestartet und angepasst werden können, haben wir auf dem Festival erfolgreich getestet und evaluiert. Allerdings war die Einführung und Aufklärung der Teilnehmer jedes Mal sehr wichtig für eine entspannte Haltung und eine neutrale Einstellung den Mindmachines gegenüber. Als wir die Funktionsweise den Teilnehmern nicht vorher erklärten, wurde es sehr skeptisch und kritisch hinterfragt. Immer wieder kam die Frage auf, ob durch die Benutzung das Gehirn programmiert wird. Obwohl wir die Frage jedes Mal verneinten, blieb eine gewisse Skepsis bei manchen Personen. Die Tatsache, dass man keinen direkten Einfluss auf die Stimulation hat und sich der Session hingibt, ohne zu wissen, was mit einem geschieht, wollten wir ändern. Ebenso interessant waren die zum Teil sehr speziellen Fragen nach Personal Alpha, Kohärenz Experimenten oder luziden Träumen.

Abb. 72

Neurofeedback Experiment mit Emotiv EPOC Headset.



AUSBLICK AUF DIE PRAKTISCHE ARBEIT

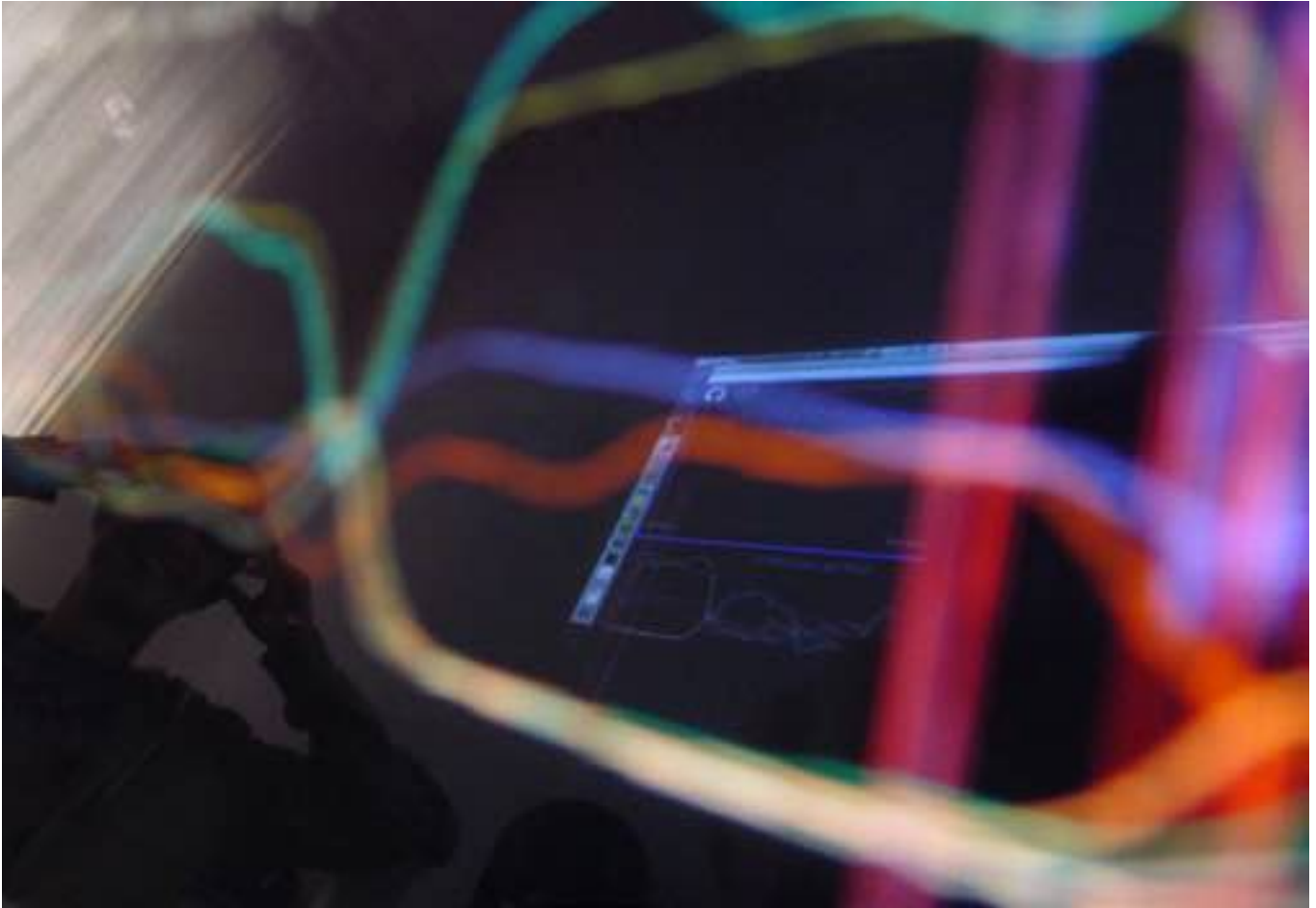


Abb. 73

Das Foto zeigt eine Session mit dem Muse Headset und einer Mindmachine.

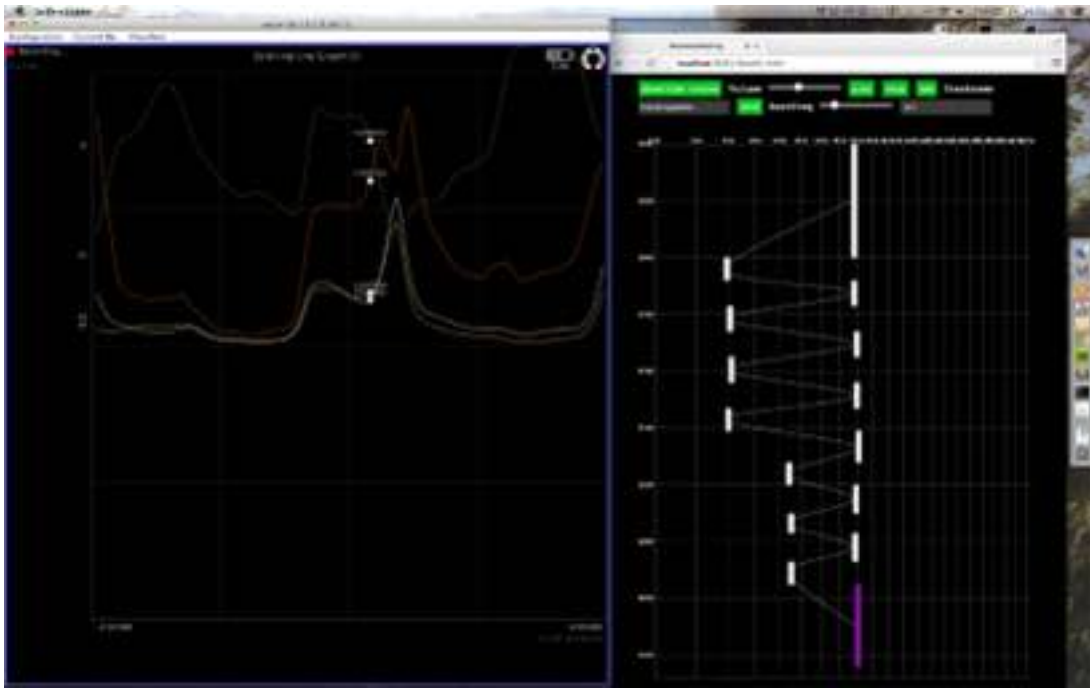


Abb. 74
 Analyse und Vergleich
 von EEG Daten und
 generierter Mindmachine
 Session im aktuellen
 Session Editor.

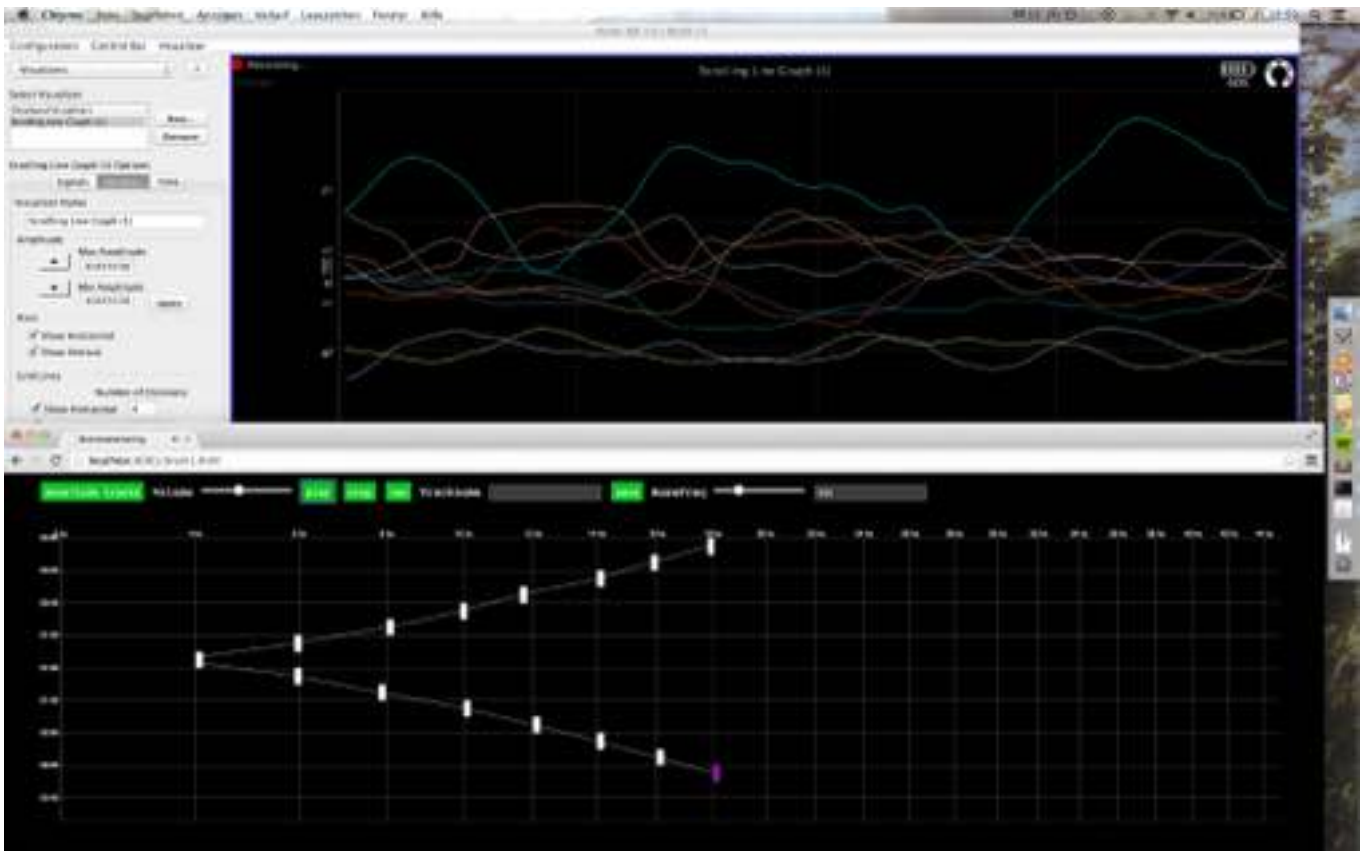


Abb. 35
 Evaluierung der relevanten
 EEG Werte des Muse Headsets
 während einer Mindmachine
 Session.

AUSBLICK

Während der Recherche und Ausarbeitung des theoretischen Teils unserer Bachelor-Arbeit wurde uns bewusst, dass die aktuelle Forschung in den Neurowissenschaften bereits viel weiter fortgeschritten ist als gedacht. Jedoch gibt es auch Parallelen zu unserer Nutzung der oberflächigen Stimulation durch Licht und Ton. Es sprengt die Vorstellungskraft, wenn man bedenkt dass an neuronalen Implantaten gearbeitet wird, die zum einen gezielt Krankheiten bekämpfen können, andererseits aber auch in der Lage wären, den Körper durch exakt injizierte Lichtimpulsen zu programmieren oder sogar Erinnerungen zu verändern. In den Szenarios von DARPA wird das Gehirn als Medium genutzt, um komplexe Aufgaben zu lösen und der Mensch als Werkzeug instrumentalisiert.

Wir hingegen wollen mit unserem Ansatz eine neugedachte Mindmachine entwickeln, die die angewandte Technologie offen kommuniziert. Der Betrachter soll die Funktionsweise verstehen, um daraus evtl. Schlüsse ziehen zu können und in Dialog zu treten.

Unser neuer Prototyp soll das frei verfügbare EEG Headset Muse mit der Mindmachine und die in Vergessenheit geratene Technologie der DZIDRA Brille zu einem neuen BCI verbinden. Durch die wissenschaftliche Vertiefung der nötigen Grundlagen erlangten wir Erkenntnisse, die wir in einer Reihe von Experimenten untersuchen wollen.

RESONANZ

Die Frequenzabfolge der audiovisuellen Stimulation ist essentiell für eine anregende Erfahrung der Mindmachine. Über eine Kalibrierungsphase durch das EEG könnte sich die Mindmachine an den vorherrschenden Erregungszustand des Hirns anpassen. Die Mindmachine erzeugt somit bei jedem Benutzen eine individuelle Session. Tendenzen der Entspannung oder Erregung nehmen Einfluss auf die Stimulation, so dass ein direkter Feedback Loop zwischen Mindmachine und Nutzer entstehen kann. Insofern kombiniert dieses Experiment Neurofeedback und direkte Stimulation zu einem unbewussten Interaktionsmodell.

SELBSTREGULATION

Ein sensomotorischer Zugang wäre durch eine Reihe von peripheren Sensoren erprobbar. Durch einfache Kopfbewegungen kann der Gyroskop im Muse zur Steuerung von Parametern der Mindmachine genutzt werden. Bevorzugte Frequenzen können z.B. durch Augenzwinkern gehalten werden, um danach wieder den Kopf in eine angenehme Position zurück zu bringen. Eine weitere Möglichkeit ist die Umfunktionalisierung eines Spheros, ein ballförmiger Spielzeug-Roboter, zu einem Bedienelement der als Artefakt inszeniert wird. Der steuerbare Schwerpunkt des Balles könnte die Veränderungen der gemessenen EEG-Bänder anzeigen. Das haptische Feedback des Sphero's kann demzufolge als Medium für Neurofeedback genutzt werden.

ADAPTION

In unseren bisherigen Mindmachine Prototypen haben wir mit künstlichem Licht stimuliert. Zuerst über die flackernde Projektion mit einem Beamer, bei der die Farbwahl leicht anzupassen ist. Durch die flächige Projektion können mehrere Teilnehmer bespielt werden, es muss jedoch das gerichtete Licht mit Diffusoren abgedämpft werden. Später verwendeten wir verschieden helle LEDs und probierten mehrere Farben aus, die unterschiedliche Effekte hervorriefen. Allerdings bekamen wir bei jeder Variante vereinzelt das Feedback, das Licht sei zu hell oder es wurde der Wunsch nach anderen Farben geäußert. Kurzum jeder Mensch hat spezielle Vorstellungen zum optimalen Licht der Stimulation. Warum sollten wir nicht ein flexibleres System schaffen, dass sich an das Umgebungslicht anpasst? Anstatt Licht künstlich zu erzeugen, können wir auch durch eine zweckentfremdete Shutter-Brille vorhandenes Licht pulsieren. So wird es möglich, eine eigene Wahl der Lichtquelle zu treffen und sogar Sonnenlicht zu nutzen.v

QUELLEN- VERZEICHNIS

LITERATURVERZEICHNIS

Hinweis zu Internetquellen:

Die Verfügbarkeit der Internetquellen wurde vor dem Druck vom Autor überprüft. Solange nicht anders ausgezeichnet, waren die in dem Literaturverzeichnis und Bildquellenverzeichnis angegebenen Quellen zuletzt am 1. September 2014 erreichbar. Auf eine separate Auszeichnung wurde daher verzichtet.

- 1 Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., & Vaughan, T. M. (2002). Brain–computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113(6), 767–791.
- 2 The Human Brain Project - Human Brain Project. (2014). Verfügbar unter: <https://www.humanbrainproject.eu/>
- 3 BRAIN 2025: A Scientific Vision - BRAIN Initiative - National Institutes of Health (NIH). (5. Juni 2014). Verfügbar unter: <http://www.nih.gov/science/brain/2025/>
- 4 Brainnetome Project. (2014). Verfügbar unter: <http://www.brainnetome.org/en/brainnetome-project>
- 5 Society for Neuroscience - Q&A: Cornelia Bargmann, PhD and William T. Newsome, PhD. (30. Januar 2014). Verfügbar unter: <http://www.sfn.org/news-and-calendar/news-and-calendar/news/spotlight/2014/qa-bargmann-and-newsome>
- 6 Vgl.: Abbott, A. (8. Juli, 2013). Neurotechnik: Die Vermessung des Hirns - Spektrum der Wissenschaft. Verfügbar unter: <http://www.spektrum.de/news/die-vermessung-des-hirns/1203524>
- 7 Ebd. Vgl.
- 8 Vgl.: Durand, D. M. (2006). What is Neural Engineering? *Journal of Neural Engineering*, 4(4), 1. doi:10.1088/1741-2552/4/4/E01
- 9 Vgl.: Wolpaw, J., & Wolpaw, E. W. (2012). *Brain–Computer Interfaces Principles and Practice*. Oxford University Press. Verfügbar unter: <http://www.oxfordscholarship.com/view/10.1093/acprof:oso/9780195388855.001.0001/acprof-9780195388855>
- 10 Vgl.: Duvinage, M., Castermans, T., Petieau, M., Hoellinger, T., Cheron, G., & Dutoit, T. (2013). Performance of the Emotiv Epoc headset for P300-based applications. *Biomedical Engineering Online*, 12, 56. doi:10.1186/1475-925X-12-56
- 11 Vgl.: Mesgarani, N., Cheung, C., Johnson, K., & Chang, E. F. (2014). Phonetic feature encoding in human superior temporal gyrus. *Science (New York, N.Y.)*, 343(6174), 1006–1010. doi:10.1126/science.1245994
- 12 Vgl.: Carey, B. (9. Juli, 2014). Probing Brain's Depth, Trying to Aid Memory. *The New York Times*. Verfügbar unter: <http://www.nytimes.com/2014/07/09/health/probing-brains-depth-trying-to-aid-memory.html>
- 13 Vgl. Degans, H. (13. Februar, 2014). Imec and Holst Centre Demonstrate Low-Power ECG-Acquisition Chip at ISSCC2014. Verfügbar unter: http://www2.imec.be/be_en/press/imec-news/imec-implantable-ecg-asic-isscc.html
- 14 Vgl. Ifft, P.J., Shokur, S., Li, Z., Lebedev, M. A., & Nicolelis, M. A. L. (2013). A Brain-Machine Interface Enables Bimanual Arm Movements in Monkeys. *Science Translational Medicine*, 5(210), 210ra154–210ra154. doi:10.1126/scitranslmed.3006159

- 15 Carey, B. (9. Juli, 2014). Probing Brain's Depth, Trying to Aid Memory. The New York Times. Verfügbar unter: <http://www.nytimes.com/2014/07/09/health/probing-brains-depth-trying-to-aid-memory.html>
- 16 Vgl.: Optogenetik - kurz erklärt - Spektrum der Wissenschaft. (2014). Verfügbar unter: <http://www.spektrum.de/alias/biologie/optogenetik-kurz-erklart/1069557>
- 17 Vgl.: Yizhar, O., Fenno, L. E., Davidson, T. J., Mogri, M., & Deisseroth, K. (2011). Optogenetics in Neural Systems. *Neuron*, 71(1), 9–34. doi:10.1016/j.neuron.2011.06.004
- 18 Vgl.: Gradinaru, V., Zhang, F., Ramakrishnan, C., Mattis, J., Prakash, R., Diester, I., ... Deisseroth, K. (2010). Molecular and cellular approaches for diversifying and extending optogenetics. *Cell*, 141(1), 154–165. doi:10.1016/j.cell.2010.02.037
- 19 Vgl.: Berglund, K., Birkner, E., Augustine, G. J., & Hochgeschwender, U. (2013). Light-Emitting Channelrhodopsins for Combined Optogenetic and Chemical-Genetic Control of Neurons. *PLoS ONE*, 8(3), e59759. doi:10.1371/journal.pone.0059759
- 20 Vgl.: News Staff. (2010). Insights of the decade. Stepping away from the trees for a look at the forest. Introduction. *Science* (New York, N.Y.), 330(6011), 1612–1613. doi:10.1126/science.330.6011.1612
- 21 Vgl.: Busskamp, V., & Roska, B. (2011). Optogenetic approaches to restoring visual function in retinitis pigmentosa. *Current Opinion in Neurobiology*, 21(6), 942–946. doi:10.1016/j.conb.2011.06.001
- 22 Vgl.: Produkte und Werkzeuge, 26-29
- 23 Vgl.: Fenn, J. (2010). Hype Cycle for Emerging Technologies, 2010 (No. G00205757) (S. 13). Gartner Inc.
- 24 Vgl.: Rachul, C., & Zarzeczny, A. (2012). The rise of neuroskepticism. *International Journal of Law and Psychiatry*, 35(2), 77–81. doi:10.1016/j.ijlp.2011.12.008
- 25 Vgl.: DARPA (2013). Small Business Innovation Research (SBIR) Proposal Submission Instructions. Verfügbar unter: <http://www.acq.osd.mil/osbp/sbir/solicitations/sbir20131/darpa131.htm>, 2014
- 26 Vgl.: Vidal, J. J. (1973). Toward Direct Brain-Computer Communication. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, 2(1), 157–180. doi:10.1146/annurev.bb.02.060173.001105
- 27 Allen, L. (2013). Can DARPA spark a DIY brain-scanning movement? Verfügbar unter: <http://www.theverge.com/2013/9/22/4756816/can-darpa-spark-a-diy-brain-scanning-movement>
- 28 Vgl.: Ekins, S., & Williams, A. J. (2010). Reaching Out to Collaborators: Crowdsourcing for Pharmaceutical Research, 27(3), 393–395. doi:10.1007/s11095-010-0059-0
- 29 Vgl.: Howe, J. (2008). *Crowdsourcing: Why the Power of the Crowd Is Driving the Future of Business* (1st ed.). New York: Crown Business.
- 30 Vgl.: McMillan, R. (13. Januar, 2014). These Guys Are Creating a Brain Scanner You Can Print Out at Home | Enterprise. Verfügbar unter: <http://www.wired.com/2014/01/openbci/>

LITERATURVERZEICHNIS

- 31 Vgl.: Goddard, L. (20. September, 2012). DARPA harnesses the power of subconscious brain-waves to boost threat detection system. The Verge. Verfügbar unter: <http://www.theverge.com/2012/9/20/3361972/darpa-brainwave-threat-detection>
- 32 Siegle, J., & Voigts, J. (2014). Open-Ephys. Open-source electrophysiology. Verfügbar unter: <http://open-ephys.org/>
- 33 Klopfenstein, T. (2014) Enginursday: Open Ephys An open-source electrophysiology project. Sparkfun. Verfügbar unter: <https://www.sparkfun.com/news/1541>
- 34 Vgl.: Klint, F. (10. März, 2014). Out in the Open: The Men Supercharging Neuroscience With Open Source Hardware. WIRED. Verfügbar unter: <http://www.wired.com/2014/03/open-ephys/>.
- 35 MindWave from NeuroSky. (2014). Verfügbar unter: <https://www.mindstore.com.au/index.php/products-products/mind-body-training-tools/eeg-neurosky-tools/item/750-mindwave.html>
- 36 NeuroSky, Inc. (15. Dezember, 2009). Brain Wave Signal (EEG) of NeuroSky, Inc.. Verfügbar unter: <http://frontiernerds.com/files/neurosky-vs-medical-ee.pdf>
- 37 Vgl.: NeuroSky. (2014). ThinkGear™ AM. Verfügbar unter: <http://neurosky.com/products-markets/eeg-biosensors/hardware/>
- 38 Quantified Self. (14. August, 2014). Aus Wikipedia. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantified_Self&oldid=133080628
- 39 Nunez, P & Srinivasan, R. (2007). Electroencephalogram, Scholarpedia, Verfügbar unter: <http://www.scholarpedia.org/article/EEG>
- 40 Ebd. Vgl.
- 41 Vgl.: Berger, P. D. H. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten, 87(1), 527–570. doi:10.1007/BF01797193
- 42 Vgl.: Lehrner, J., Pusswald, G., Fertl, E., Strubreither, W., & Kryspin-Exner, I. (2011). Klinische Neuropsychologie: Grundlagen – Diagnostik – Rehabilitation. Springer-Verlag, 1, 4
- 43 Vgl.: Hyland, HH. Goodwin, JE. Hall, GE. (1939) CLINICAL APPLICATIONS OF ELECTROENCEPHALOGRAPHY. Can Med Assoc J. 41(3), 239.
- 44 Vgl.: Wolters, C.H. (2007). The Finite Element Method in EEG/MEG Source Analysis. SIAM News. 40(2)
- 45 Elektroenzephalografie. (6. September, 2014). In Wikipedia. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Elektroenzephalografie&oldid=133772297>
- 46 Vgl.: Budzynski, T. (1992). Clinical Guide to Light and Sound: SELECTED RESEARCH ON SOUND/LIGHT. Verfügbar unter: <http://web.stanford.edu/group/brainwaves/2006/theclinicalguidetosoundandlight.pdf>
- 47 Grosse-Wentrup, M. (2012). Gehirn-Computer-Schnittstellen – eine neue Form der Kommunikation. Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme. Verfügbar unter: http://www.is.mpg.de/249932/research_report_5019039?c=248902

- 48 Vgl.: Spektrum Akademischer Verlag. (2000). Alpha-Blockade - Lexikon der Neurowissenschaft. Verfügbar unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/neurowissenschaft/alpha-blockade/448>
- 49 Doppelmayr, M., W. Klimesch, W. Stadler, D. Pöllhuber, & C. Heine. (2002). EEG Alpha Power and Intelligence. *Intelligence* 30(3), 289–302. doi:10.1016/S0160-2896(01)00101-5.
- 50 Vgl.: Posthuma, D., Neale, M.C., Boomsma, D.I., de Geus, E.J. (2001). Are smarter brains running faster? Heritability of alpha peak frequency, IQ, and their interrelation. *Behavior Genetics* 31, 567-79.
- 51 Vgl.: Köpruner, V., Pfurtscheller, G., & Auer, L. M. (1984). Quantitative EEG in Normals and in Patients with Cerebral Ischemia. In E. H. J. and F. H. L. D. S. G. Pfurtscheller (Ed.), *Progress in Brain Research* (Vol. Volume 62, pp. 29–50). Elsevier. Verfügbar unter: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079612308621688>
- 52 Vgl.: Arns, M., Drinkenburg, W. H., Fitzgerald, P. B. & Kenemans, J. L. (2012). Neurophysiological predictors of non-response to rTMS in depression. *Brain Stimulation* 5, 569-576.
- 53 Klimesch, W., Schimke, H., Ladurner, G. & Pfurtscheller, G. (1990). Alpha frequency and memory performance. *Journal of Psychophysiology*, 4, 381-390
- 54 Babiloni, C., Stella, G., Buffo, P., Vecchio, F., Onorati, P., Muratori, C., ... Rossini, P. M. (2012). Cortical sources of resting state EEG rhythms are abnormal in dyslexic children. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 123(12), 2384–2391. doi:10.1016/j.clinph.2012.05.002
- 55 Klimesch, W. (1999). EEG Alpha and Theta Oscillations Reflect Cognitive and Memory Performance: A Review and Analysis. *Brain Research Reviews* 29(2–3), 169–95. doi:10.1016/S0165-0173(98)00056-3.
- 56 Hypnagogie. (1. September, 2014). Aus Wikipedia. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Hypnagogie&oldid=131157020>
- 57 Vgl.: Vanderwolf, C. H. (1969). Hippocampal electrical activity and voluntary movement in the rat. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 26(4), 407–418. doi:10.1016/0013-4694(69)90092-3
- 58 Skrandies, W. (2009). Elektrische Hirnaktivität. Uni Giessen. Vorlesung Physiologie, 4
- 59 Gruzelier, J. (2009). A theory of alpha/theta neurofeedback, creative performance enhancement, long distance functional connectivity and psychological integration. *Cognitive Processing*, 10(S1), 101–109. doi:10.1007/s10339-008-0248-5
- 60 Vgl.: Lagopoulos, J., Xu, J., Rasmussen, I., Vik, A., Malhi, G. S., Eliassen, C. F., ... Ellingsen, Ø. (2009). Increased theta and alpha EEG activity during nondirective meditation. *Journal of Alternative and Complementary Medicine* (New York, N.Y.), 15(11), 1187–1192. doi:10.1089/acm.2009.0113

LITERATURVERZEICHNIS

- 61 Gruzelier, J., Egner, T., & Vernon, D. (2006). Validating the efficacy of neurofeedback for optimising performance. In Christa Neuper and Wolfgang Klimesch (Ed.), *Progress in Brain Research* (Vol. Volume 159, pp. 421–431). Elsevier. Verfügbar unter: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079612306590272>
- 62 Sengbusch, J. (24. März, 2010). Entspannte Gehirne Lernen Besser. *Spektrum Der Wissenschaft*. Verfügbar unter: <http://www.spektrum.de/news/entspannte-gehirne-lernen-besser/1026192>
- 63 Hödlmoser, K. (2014). EEG Alpha Und Theta Power Im Zusammenhang Mit Intelligenz. University of Salzburg. Unveröffentlichte Masterarbeit, Universität Augsburg, 30
- 64 Vgl.: Hsieh, L.-T., & Ranganath, C. (2014). Frontal midline theta oscillations during working memory maintenance and episodic encoding and retrieval. *NeuroImage*, 85 Pt 2, 721–729. doi:10.1016/j.neuroimage.2013.08.003
- 65 Vgl.: Luu, P., Tucker, D. M., Derryberry, D., Reed, M., & Poulsen, C. (2003). Electrophysiological responses to errors and feedback in the process of action regulation. *Psychological Science*, 14(1), 47–53.
- 66 Vgl.: Onton, J., Delorme, A., & Makeig, S. (2005). Frontal midline EEG dynamics during working memory. *NeuroImage*, 27(2), 341–356. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.04.014
- 67 Vgl.: Nyhus, E., & Curran, T. (2010). Functional role of gamma and theta oscillations in episodic memory. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(7), 1023–1035. doi:10.1016/j.neubiorev.2009.12.014
- 68 Vgl.: Gärtner, M., Rohde-Liebenau, L., Grimm, S., & Bajbouj, M. (2014). Working memory-related frontal theta activity is decreased under acute stress. *Psychoneuroendocrinology*, 43, 105–113. doi:10.1016/j.psyneuen.2014.02.009
- 69 Vgl.: Gerken, G. M., Moushegian, G., Stillman, R. D., & Rupert, A. L. (1975). Human frequency-following responses to monaural and binaural stimuli. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 38(4), 379–386.
- 70 Vgl.: Budzynski, T. H., Budzynski, H. K., Evans, J. R., & Abarbanel, A. (2009). *Introduction to Quantitative EEG and Neurofeedback: Advanced Theory and Applications*. Academic Press, 155-183
- 71 Vgl.: Siever, D. (2007) Audio-visual entrainment: history, physiology, and clinical studies. *Handbook of Neurofeedback: Dynamics and Clinical Applications*. The Haworth Medical Press, 155-183
- 72 DocCheck. (2014). Biofeedback. Verfügbar unter: <http://flexikon.doccheck.com/de/Biofeedback>
- 73 Solomon, G. D. (2005). Slow Wave Photic Stimulation in the Treatment of Headache - a Preliminary Report. *Headache: The Journal of Head and Face Pain*, 25(8), 444–446. doi:10.1111/j.1526-4610.1985.hed2508444.x
- 74 Vgl.: Gysin, B. (1985). *Here To Go: Planet R-101* (1st edition.). London: Quartet Books.
- 75 Vgl.: Purkyne, J. E. (1819). *Beiträge zur Kenntniss des Sehens in subjectiver Hinsicht*. Prag : In Commission bei Johann Gottfried Calve. Verfügbar unter: <http://archive.org/details/beitrgezurkennoopurk>

- 76 Wade, N. J. (1999). *A Natural History of Vision*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press
- 77 Vgl.: Helmholtz H (1925). *Physiological Optics*. Rochester, Optical Society of America
- 78 Vgl.: Adrian ED, Matthews BHC (1934). The Berger rhythm: potential changes from the occipital lobes in man. *Brain*, 57, 355–385
- 79 Grey, W.W. (1953). *The Living Brain*. London, Gerald Duckworth & Co, 64–65
- 80 Vgl.: Klüver H. (1966). *Mescal and Mechanisms of Hallucinations*. Chicago, University of Chicago Press
- 81 Vgl.: Smythies JR. (1960). The stroboscopic patterns. III. Further experiments and discussion. *Br J Psychol*, 51, 247–255.
- 82 Vgl.: Grey, W.W. (1953). *The Living Brain*. London, Gerald Duckworth & Co, 69–70
- 83 Vgl.: Ffytche, D. H. (September, 2008). The Hodology of Hallucinations. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 44(8), 1067–83. doi:10.1016/j.cortex.2008.04.005.
- 84 Vgl.: M. Rule, M. Stoffregen, & B. Ermentrout (2011) A Model for the Origin and Properties of Flicker-Induced Geometric Phosphenes. In *Proceedings of PLoS Computational Biology*.
- 85 Vgl.: Oster, G. (1973). Auditory Beats in the Brain. *Scientific American*. 94–102
- 86 Vgl.: Dobie, R. A., & Berlin, C. I. (1979). Binaural interaction in brainstem-evoked responses. *Archives of Otolaryngology (Chicago, Ill.: 1960)*, 105(7), 391–398
- 87 Vgl.: Spitzer, M. W., & Semple, M. N. (1998). Transformation of binaural response properties in the ascending auditory pathway: influence of time-varying interaural phase disparity. *Journal of Neurophysiology*, 80(6), 3062–3076

BILDQUELLEN

- 1 INFINITY IMAGINED, <http://infinity-imagined.tumblr.com/image/23611966771>
- 2 REDDIT.COM, http://31.media.tumblr.com/tumblr_m4grjyb9qz1qbpwkro1_1280.jpg
- 3 SCIENTIFIC AMERICAN, http://blogs.scientificamerican.com/talking-back/files/2013/01/prosthetic-limbst120524_arm3.jpg VERKEHRSLAGE, <http://www.verkehrslage.de/wp-content/uploads/2011/05/Einer-der-Forscher-beim-Versuch-seines-Projekts-BrainDriver.jpg>
- 4 IMEC, http://www2.imec.be/content/user/Image/Pictures_Press_releases/olympus002.jpg
- 5 ES MATERIA, <http://esmateria.com/wp-content/uploads/2014/08/rat%C3%B3n.jpg>
- 6 NEWSOFFICE MIT, http://newsoffice.mit.edu/sites/mit.edu.newsoffice/files/images/2013/20130724135045-o_o.jpg
- 7 GARTNER, https://www.gartner.com/doc/2809728/hype-cycle-emerging-technologies-images/2013/20130724135045-o_o.jpg
- 8 AMAZON, http://ecx.images-amazon.com/images/I/917bRQqgg4S_SL1500_.jpg images/2013/20130724135045-o_o.jpg
- 9 FAST COMPANY, http://b.fastcompany.net/multisite_files/fastcompany/poster/2012/09/3001501-poster-darmpacam-top.jpg
- 10 DARPA, http://www.darpa.mil/uploadedImages/Content/Our_Work/DSO/Programs/Cognitive_Technology_Threat_Warning_System/CT2WS2%5B1%5D.jpg
- 11 FILEPICKER, <https://www.filepicker.io/api/file/IRwKJuXSSYeKYMwlx4EQ>
- 12 OPEN EPHYS, https://open-ephys.atlassian.net/wiki/download/attachments/491527/lfp_screenshot.jpg?version=1&modificationDate=1383933218987&api=v2
- 13 SQUARESPACE, http://static.squarespace.com/static/504033b9e4b0991b726573c4/515c4f62e4b0875140c2dc66/515c5473e4b02ae07850c1e5/1365005428338/flexdrive_fullview.png?format=750w
- 14 SEEDSTUDIO, <http://www.seeedstudio.com/depot/images/product/Brainwave%20Sensor.jpg>
- 15 SEEDSTUDIO, http://www.seeedstudio.com/depot/bmz_cache/0/008e40136b606fa50a9d941e262f20dc.image.530x397.jpg
- 16 OCULUSRIFTITALIA, <http://www.oculusriftitalia.com/wp-content/uploads/2013/11/emotiv-epoc.jpg>
- 17 MINDTECSTORE, http://www.mindtecstore.com/images/stories/virtuemart/product/mindwave__23.jpg
- 18 THINKTECHUK, http://thinktechuk.files.wordpress.com/2011/08/img_1864.jpg
- 19 NEWSWEEK, <http://s.newsweek.com/sites/www.newsweek.com/files/styles/headline/public/2014/07/31/0808nw0106braindevicegs02.jpg?itok=u3gfuxbi>
- 20 GERMAN GOMEZ-HERRERO, http://www.germangomez.com/tutorials/dipoles/dipoles_leadfield.png
- 21 ANSWERS, http://content.answers.com/main/content/img/oxford/Oxford_Body/019852403x.electroencephalogram.1.jpg
- 22 NEUROELECTRICS, http://www.neuroelectrics.com/sites/neuroelectrics.com/files/imce/electrode_power.jpg
- 23 WIKIPEDIA, <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Elektroenzephalografie&oldid=131245478>
- 24 PUBMED, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22658819>
- 25 WIKIMEDIA, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michael_Lukas_Leopold_Willmann_001.jpg
- 26 FLATWORLDKNOWLEDGE, http://images.flatworldknowledge.com/stangor/stangor-fig13_010.jpg
- 27 KLINIK BEDBURG HAU, <http://www.klinik-bedburg-hau.lvr.de/02kliniken/kinder-+und-+>

BILDQUELLEN

- jugendpsychiatrie/ooaktuelles/neurofeed-back102009017.jpg
- 28 ITUNES APPLE, <https://itunes.apple.com/de/app/muse-calm/id849841170?mt=7>
- 29 ITUNES APPLE, <https://itunes.apple.com/de/app/muse-calm/id849841170?mt=8>
- 30 EIGENES ARCHIV
- 31 BEHANCE, <https://m1.behance.net/rendition/modules/31114809/hd/909a01980df6eecb819a89493cf3dfcz.jpg>
- 32 NEUROCRITIC, http://2.bp.blogspot.com/_IA-5nokOFh84/TTBetVnWpql/AAAAAAAAAEpQ/ERhE26dBnxQ/s1600/VINTAGE%2BSCHNEIDER%2BBRAIN%2BWAVE%2BSYNCHRONIZER%2BMODEL%2BMD-5.JPG
- 33 NEUROCRITIC, http://3.bp.blogspot.com/_IA-5nokOFh84/TTBkvZP3n4l/AAAAAAAAAEpg/KZiBSFbSwxA/s1600/BrainWave_Synchronizer_Ad.jpg
- 34 GUERRILLAZOO, <http://www.guerrillazoo.com/uploads/1/2/6/7/12672707/5151275.jpg?647>
- 35 CRYPTIK, http://www.cryptik.com/storage/DREAM_MACHINE_04.jpg?__SQUARESPACE_CACHEVERSION=1361553949702
- 36 EIGENES ARCHIV
- 37 Ebd.
- 38 MENZEL PHOTO, http://menzelphoto.photoshelter.com/gallery-image/New-Age/G00005aRq6jZTbgQ/100003QYZXyvXb_Q/C00001807VYw_gxk
- 39 MENZEL PHOTO, http://menzelphoto.photoshelter.com/gallery-image/New-Age/G00005aRq6jZTbgQ/10000hQB5Fk.TMBg/C00001807VYw_gxk
- 40 MINDALIVE, http://www.mindalive.com/2_0/2_1_4small.jpg
- 41 THE LEDGER, Williams, R. (1986, November 12). FDA not relaxed about inventor's specail glasses, The Ledger, 81, 12
- 42 MIND-MACHINES, http://www.mind-machines.de/images/ALERT_PRO.jpg
- 43 MINDMODS, <https://www.mindmods.com/images/stories/virtuemart/product/psio.png>
- 44 NEUROTRONICS, http://www.neurotronics.eu/shop/images/product_images/info_images/1_0.jpg
- 45 MONOSKOP, http://monoskop.org/images/a/a9/Purkyne_1819.jpg
- 46 EPISTEMOCRITIQUE, http://www.epistemocritique.org/IMG/jpg/Steen_-_Kluver.jpg
- 47 PLOSCOMPBIOL, www.ploscompbiol.org/article/info:doi/10.1371/journal.pcbi.1002158.g001/largerimage
- 48 PLOSCOMPBIOL, www.ploscompbiol.org/article/info:doi/10.1371/journal.pcbi.1002158.g006/largerimage
- 49 EIGENES ARCHIV
- 50 EIGENES ARCHIV
- 51 GOOGLE PATENTS, <http://www.google.com/patents/US8597171>
- 52 -75 EIGENES ARCHIV

EIDESSTAATLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe. Ich habe keine anderen, als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate als solche kenntlich gemacht.

Christopher Pietsch

Luis Grass

Berlin, 5. September 2014

BEARBEITUNGSZEIT

26.06.2014 – 10.09.2014

MATRIKELNUMMERN

Christopher Pietsch: 9147

Luis Grass: 9020

BETREUER

Frau Prof. Constanze Langer

Herr Dr. Matti Gärner

INCOM LINK

<https://incom.org/projekt/4774>

DRUCK UND PRODUKTION

Centralstation Druck&Kopie Berlin

SCHRIFTEN

Bembo von Stanley Morison

Rockwell von Morris Fuller Benton

Brandon Grotesque von Hannes von Döhren

KONZEPTION, GESTALTUNG UND SATZ

Christopher Pietsch, Luis Grass

Danke an alle, die uns in den letzten
Jahren unterstützt haben.

Unser besonderer Dank gilt Lea Segel, Manfred
& Gabi Pietsch, Daniel Tzschentke, Hannes
Geipel, Jeronimo Grass, Matti Gärtner,
Constanze Langer und Frank Heidmann.

In Gedenken an Michael Härtel



Danke für die aufregende gemeinsame Zeit mit dir,
die wir in Erinnerung halten werden.

Unvergessen bleiben die glücklichen Momente mit
dir: Während wir in einer unserer Test-Sessions nur
visuelle Erfahrungen machten, berichtete Micha
hingegen von klassischer Musik, die sich im Takt des
Lichtes formte.