

Verbessern von kontinuierlichen Anwendungen, die mit Bewegungsvorstellung kontrolliert werden, mittels hybriden Gehirn-Computer Schnittstellen Design-Prinzipien¹

Alex Kreilinger²

Abstract: Gehirn-Computer Schnittstellen, die für Querschnittgelähmte oder Schlaganfallpatienten einen Kommunikationskanal bieten können, weisen teilweise unzureichende Funktionalität und Verlässlichkeit auf. In der hier vorgestellten Dissertation wurden neue hybride Entwicklungsmethoden eingesetzt, um genau diese Faktoren zu verbessern. Insbesondere wurde ein allgemeiner Ansatz einer hybriden Gehirn-Computer Schnittstelle erprobt und die automatische Detektion von Fehlern während kontinuierlicher, asynchroner Steuerung untersucht. Außerdem wurde unter enger Zusammenarbeit mit querschnittgelähmten Anwendern verschiedene Methoden der Neuroprothesensteuerung erstellt und über einen längeren Zeitraum hinweg analysiert.

1 Einführung

Menschen, die von Querschnittlähmung betroffen sind oder an den Folgen von Läsionen im Gehirn, z.B. hervorgerufen durch Schlaganfall, leiden, müssen oft mit beträchtlichen Einschränkungen bei der Interaktion bzw. Kommunikation mit ihrer Umgebung leben. Die Hauptursachen für diese Einschränkungen sind normalerweise die unterbrochenen afferenten und efferenten neuralen Pfade zwischen Gehirn und Muskeln. Das Ziel von Gehirn-Computer Schnittstellen (Brain-Computer Interface, BCI) ist es, diese Unterbrechungen zu umgehen, indem Gehirnaktivität direkt in Kommandos für die betroffenen Muskeln übersetzt werden. Gehirnaktivität kann mit verschiedenen Technologien gemessen werden, allem voran steht jedoch die nicht invasive Methode der Ableitung von elektrischen Signalen mittels der Elektroenzephalografie (EEG).

Obwohl auf dem Gebiet der BCI-Forschung während der letzten Jahre kontinuierlich Erfolge verzeichnet werden konnten, ist die Verlässlichkeit und Leistungsfähigkeit von BCIs definitiv noch ausbaufähig. Die Tatsache, dass man sich nicht zu hundert Prozent auf eine BCI-Applikation verlassen kann, ist für viele potentielle Anwender ein Grund, diese eben nicht in ihrem täglichen Leben einzusetzen. Ein relativ neuartiges Konzept, wie man diese Probleme lösen, oder zumindest lindern kann, ist das sogenannte hybride BCI. In einem hybriden BCI (hBCI) werden BCI-Signale mit anderen Signalen kombiniert, die ohne weiteres auch BCI-Signale sein können, aber auch von anderen Quellen stammen können, wie z.B. von anderen Biosignalen oder von Sensoren, die die unmittelbare Umgebung des Anwenders überwachen. Eine große Herausforderung ist es, sinnvolle Kombinationen

¹ Englischer Titel der Dissertation: "Improving Continuous Motor Imagery-Controlled Applications with Hybrid Brain-Computer Interface Design Principles"

² Universitätsaugenklinik, Medizinische Universität Graz alex.kreilinger@medunigraz.at

von Signalen zu finden, die für den Anwender eine bestmögliche Verbindung von BCI und anderen assistiven Technologien ermöglicht. Im Gegensatz zu ursprünglichen BCI-Applikationen soll das BCI-Signal hierbei nicht zwingend als das Hauptsteuerungssignal, sondern je nach Funktionalität auch nur als optionales, zusätzliches Signal angesehen werden. Je nach Fähigkeiten und Zustand der Anwender kann man so das jeweils beste Szenario auswählen. In einem Beispiel kann etwa das BCI als Hauptkontrollsignal verwendet werden, solange der Anwender noch konzentriert ist. Wird nach längerer Anwendungsdauer der Anwender jedoch müde, kann das hBCI auf ein anderes Kontrollsignal umschalten, z.B. auf ein Signal, das auf noch aktiven Muskelfunktionen basiert. Vice versa kann nach zunehmender Erschöpfung der Muskelkraft wieder der BCI-Kanal verwendet werden. In einem anderen Beispiel könnte ein Anwender bei der Kontrolle eines BCIs unterstützt werden, indem die zusätzliche Einbindung von Sensorsignalen ein zielorientiertes Steuern ermöglicht. Dadurch bekommen auch Anwender, die sonst Schwierigkeiten haben ein BCI zu kontrollieren, die Möglichkeit, dieses sinnvoll einzusetzen.

Eine andere Möglichkeit, die Benutzerfreundlichkeit von BCIs zu verbessern, basiert auf einer automatisierten Detektion von Fehlern [CSM14]. In zahlreichen Studien wurde bereits eindeutig eine spezifische Region ausgemacht, die hauptsächlich für die Verarbeitung von Fehlern verantwortlich ist. Diese Region liegt im vorderen Teil des Gyrus cinguli (anterior cingulate cortex, ACC) [O'07]. Es konnte außerdem bereits gezeigt werden, dass nach dem Beobachten, Ausführen, oder Erfahren von Fehlern charakteristische, zeit- und phasengekoppelte Signale im Zeitbereich gemessen werden können. Ein solches Signal wird Fehlerpotential genannt (error potential, ErrP). Je nach den Umständen, unter denen das ErrP ausgelöst wird, unterscheidet man zwischen Antwort-, Feedback-, Observations- und Interaktions-ErrP. Im Bereich von BCIs ist das Interaktions-ErrP am besten geeignet, weil es gemessen werden kann, wenn die Anwender den Eindruck haben, nicht selbst für den Fehler verantwortlich zu sein. Vielmehr wird die BCI-Applikation selbst verantwortlich gemacht, was im Falle von BCIs auch durchaus der Fall sein kann. Im Kontext von BCIs kann bereits das Inkludieren von Fehlerdetektion als ein hybrides BCI bezeichnet werden, da das normale BCI von einer zusätzlichen Komponente unterstützt wird. Dass diese Fehlerdetektion funktioniert, wurde schon in Experimenten nachgewiesen. Diese bedienen sich jedoch hauptsächlich diskreter BCI-Applikationen, bei denen Aktionen, die potentielle Fehlerquellen darstellen, nur zu bestimmten Zeitpunkten ausgeführt werden können [DMM10, Fe07, Sp12].

Ein Anwendungsbereich, in dem die Verwendung von hBCIs—egal ob mit oder ohne Fehlerdetektion—besonders sinnvoll sein kann, ist die Steuerung von Neuroprothesen, die auf der funktionellen Elektrostimulation (FES) basieren [Ru15]. Für Querschnittgelähmte mit Höhe der Blockade bei C4/C5 oder höher ist es ein besonders wichtiges Bedürfnis, wieder greifen zu können, um die Selbständigkeit zu erhalten. Zu einem gewissen Grad ist dazu natürlich auch die Elbogenfunktionalität notwendig. Eine FES-Neuroprothese kann den Anwendern helfen, diese Funktionen wieder zu erlangen. Dabei werden Kommandos, die durch das Analysieren von Gehirnaktivität generiert wurden, direkt in Stromimpulse umgesetzt, die die motorischen Punkte nahe der zu kontrahierenden Muskeln stimulieren. Durch das Variieren des Orts und der Stärke dieser Pulse können mit aufeinanderfolgenden Muskelkontraktionen Bewegungsabläufe induziert werden.

2 Forschungsziele

Das Hauptforschungsziel der Dissertation [Kr15] war die allgemeine Verbesserung der Verlässlichkeit und Funktionalität von BCIs mittels der Anwendung von hBCI Designprinzipien. Zu diesem Zweck wurden drei verschiedene Strategien erprobt.

Erstens wurde das generelle Konzept eines hBCIs analysiert und dessen Eignung für eine automatische Bewertung und Selektion verschiedener Eingangssignale untersucht. Dies ist besonders wichtig für hBCIs, die keine kontextuelle Information zur Verfügung haben, sondern nur Eigenschaften der Signale selbst beurteilen können. Basierend auf diesen Eigenschaften, sollte eine automatisierte Qualitätsbewertung getestet werden.

Die zweite Strategie behandelt die automatische Erkennung und Unterdrückung von Fehlern in online BCIs. Der Fokus lag hier insbesondere in der Detektion von Fehlern in asynchronen, kontinuierlichen BCI-Applikationen. Asynchron bedeutet, dass der Anwender die Applikation jederzeit kontrollieren kann, nicht nur zu vorgegebenen Zeitepochen. Kontinuierlich beschreibt die Art, wie die Applikation kontrolliert wird: anstatt nur diskrete Zustände zu kontrollieren (z.B. Hand auf oder zu) kann mit einem kontinuierlichen BCI der Öffnungsgrad beliebig viele Zustände zwischen geöffnet und geschlossen annehmen. Wie schon erwähnt, konnte die Funktionalität der Fehlerdetektion in synchronen, diskreten BCI-Applikationen bereits erfolgreich demonstriert werden. Ein asynchrones, kontinuierliches BCI bietet jedoch ein natürlicheres Erlebnis für die Anwender und wird daher mit höherer Wahrscheinlichkeit im Alltag verwendet.

Die dritte Strategie betrifft die intensive Zusammenarbeit mit querschnittgelähmten Patienten. Beachtet man die große Variabilität an individuellen Bedürfnissen und Einschränkungen, wird schnell deutlich, dass ein Anwender-zentriertes Design notwendig ist. In dieser Dissertation werden Studien mit drei querschnittgelähmten Personen vorgestellt, die BCI in unterschiedlichen Varianten verwenden: als Hauptsteuerungskanal für komplexe Bewegungen bis zu optionalen, einfachen Schaltvorgängen.

Insgesamt besteht die kumulative Dissertation aus sieben Veröffentlichungen, die sich mit den bereits genannten Forschungszielen beschäftigen. In allen Arbeiten wurde BCI-Kontrolle immer mittels Bewegungsvorstellung (motor imagery, MI) [PN01] realisiert, genauer gesagt, Bewegungsvorstellungen der linken/rechten Hand oder beider Füße. Die dabei entstehenden Muster können am somatosensorischen Kortex gemessen und zur Generierung von Steuersignalen verwendet werden.

3 Selektion von manueller Steuerung oder BCI-Steuerung basierend auf Qualitätsbewertungen

In einem Autospiele, das entweder mit einem manuellen Joystick oder mittels MI-BCI gesteuert werden konnte, wurden beide Eingangssignale kontinuierlich qualitativ bewertet. Diese Qualitätsbewertung wurde dazu verwendet, das jeweils am besten geeignete Steuersignal auszuwählen [Kr12]. Das besondere an dieser Bewertung war, dass diese nur

auf Eigenschaften der jeweiligen Signale einging. Das Ziel der Studie war, herauszufinden, ob es möglich ist, ausschließlich durch diese Eigenschaften eine sinnvolle Selektion durchzuführen. Zehn gesunde Probanden nahmen an dem Experiment teil, bei dem es ihre Aufgabe war, möglichst viele Münzen zu sammeln und Barrieren auszuweichen. Das hBCI war in der Lage, bei Bedarf zwischen BCI und Joystick umzuschalten. Die Qualitätsbewertung des BCI-Signals war von detektiertem Rauschen, Instabilität, Invariabilität und Bias des Klassifikators abhängig; beim Joysticksignal basierte diese auf Zittern, zu niedriger Amplitude, Invariabilität und Bias.

Es konnte gezeigt werden, dass diese Umschaltfunktion die Funktionalität im Vergleich zu Messungen, bei denen nicht umgeschaltet wurde, verbessern konnte. Diese Publikation diente als wichtiges Beispiel, das demonstrieren konnte, wie ein hBCI potentiell verwendet werden kann, um selbständig seine Eingänge zu bewerten und zu selektieren. Das Funktionsprinzip ist in Abb. 1 dargestellt.

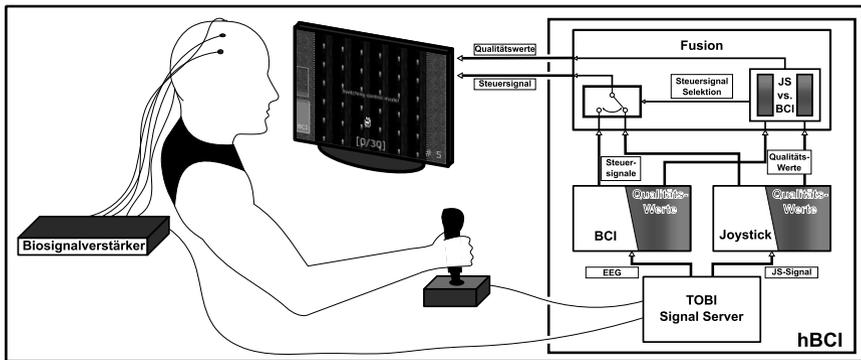


Abb. 1: Der Anwender kann entweder den Joystick oder ein auf Bewegungsvorstellungen basierendes BCI verwenden, um das Auto nach links oder rechts zu bewegen. Das aktive Signal wird konstant auf seine Qualität überprüft und bei Bedarf kann das hBCI zum anderen Signal wechseln. Dazwischen können sich entweder die Konzentration oder die Muskeln wieder erholen.

4 Fehlerdetektion während der kontinuierlichen Bewegung eines gedankengesteuerten künstlichen Arms

Das Ziel dieser Arbeit war, Reaktionen auf Fehler aufzuzeichnen und zu klassifizieren, die während der Beobachtung einer kontinuierlichen Bewegung entstehen [KNMP12]. Dazu wurde ein zeitversetztes BCI-Experiment verwendet, bei dem zehn gesunde Probanden zuerst Bewegungsvorstellung über eine vorgegebene Zeit ausführten, um dann die korrekte oder falsche Interpretation anhand der Bewegung eines künstlichen Arms über die gemessene Zeit zu beobachten. LEDs wurden verwendet, um zusätzlich zu der kontinuierlichen Bewegung diskretes Feedback zu geben, und zwar über die noch zu erwartende Länge der Bewegung. Diese LEDs blinkten je einmal vor jeder Sekunde: weiß, wenn der Arm sich noch mehr als 1 s weiter bewegen würde; rot, wenn der Arm innerhalb der nächsten Se-

kunde die Bewegung beenden würde. Das Schema wird mit einem Beispielziel von 3 s in Abb. 2 erläutert.

ErrPs konnten zwar über Zufallsniveau detektiert werden, allerdings ist die durchschnittliche Erkennungsrate von ca. 60 % noch zu niedrig für zukünftige Online-Anwendungen.

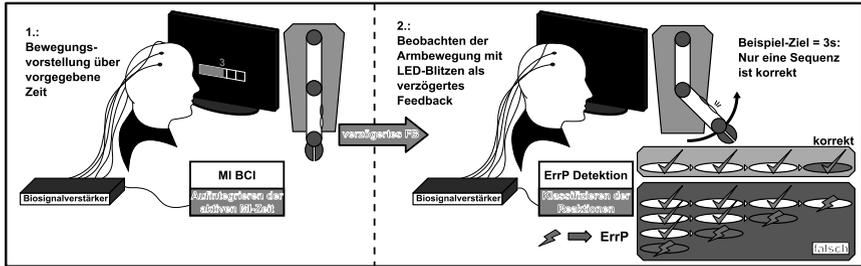


Abb. 2: In diesem zweigeteilten Experiment führen die Anwender zunächst je nach Vorgabe eine Bewegungsvorstellung aus. Die Länge der detektierten Vorstellung wird währenddessen integriert und dann dazu verwendet, den künstlichen Arm genau solange zu bewegen. Farbkodierte LEDs zeigen zu Beginn jeder Sekunde an, ob sich der Arm noch länger als 1 s bewegen wird. Dabei kann, je nach Zielvorgabe, immer nur genau eine LED-Sequenz korrekt sein. Weicht die Sequenz ab, wird zum Zeitpunkt des LED-Blitzes ein Fehlerpotential erzeugt.

5 Detektion von einzelnen und mehrfachen Fehlern in einem gedankengesteuerten Autospiel mit diskretem und kontinuierlichem Feedback

In der nächsten Arbeit, die sich mit Fehlerpotentialen befasst, wurden versucht, die Limitationen der Vorgängerpublikation zu beseitigen [KHMP15]. Eine Limitation war die zeitliche Entkopplung, die zur Folge hatte, dass die Anwender wenig involviert waren. Außerdem war das Feedback zu abstrakt und die Steuerung schwer zu meistern. In dieser Arbeit wurde stattdessen wieder ein Autospiel verwendet, das eine kontinuierliche, asynchrone Steuerung durch Bewegungsvorstellung der rechten Hand (Bewegung nach rechts) und beider Füße (Bewegung nach links) zuließ. Darüberhinaus galt es während vordefinierter Trials, deren Anfang und Ende mit eindeutig gekennzeichnet wurden, möglichst viele Münzen zu sammeln und Barrieren auszuweichen. Bei der Kollision mit diesen Objekten wurde ein diskretes Feedback ausgelöst: Über einen kurzen Zeitraum wurde das Auto vergrößert und in anderer Farbe dargestellt. Zeitgleich wurde außerdem ein kurzer Ton abgespielt.

In einer neuartigen Methode wurden dabei Fehler nicht anhand einzelner Reaktionen, auch Events genannt, klassifiziert, sondern immer erst nachdem eine Serie von Events aufgenommen worden war. Damit wurde dann bestimmt, ob ein ganzer Trial, der aus bis zu vier Münzen und/oder Barrieren bestand, eher fehlerhaft oder korrekt war, siehe Abb. 3. Bei Detektion eines fehlerhaften Trials konnte dieses dann verworfen werden. Mit dieser neuen Auswertung von mehrfachen Events konnte in offline Simulationen eine signifikant

höhere Erkennungsrate erzielt werden. Mit vier der zehn Teilnehmern konnte die neue Methode auch online mit Erfolg angewendet werden.

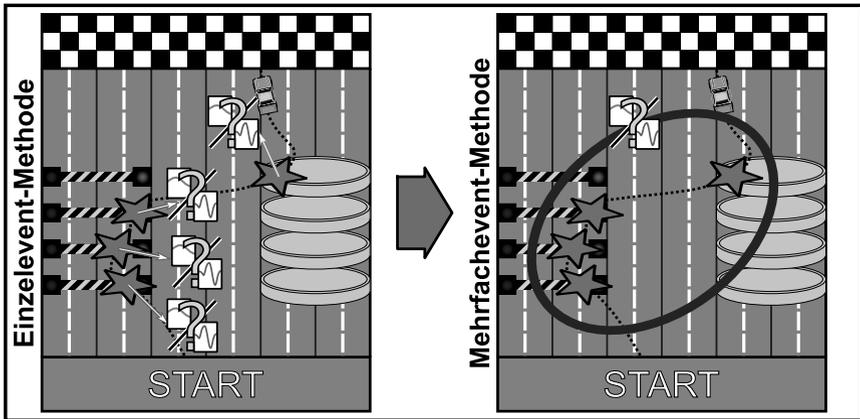


Abb. 3: Üblicherweise werden Fehler bei jedem einzelnen Event klassifiziert. Mit der neuartigen Mehrfachevent-Methode wird erst abgewartet, bis eine Serie von Reaktionen aufgezeichnet wurde. Erst nach Ende des Trials wird entschieden, ob dieses korrekt oder falsch war.

6 Neuroprothesensteuerung mittels hBCI

Die Steuerung von Neuroprothesen mittels BCI wurde in verschiedenen Szenarien mit gesunden und querschnittgelähmten Anwendern erprobt. Dabei wurde besonders darauf geachtet, ein hBCI zu verwenden, das auf die individuellen Bedürfnisse und Fähigkeiten der Patienten eingehen kann. Haben die Patienten z.B. noch relative viele muskuläre Restfunktionen, muss das BCI-Signal nur wenig Kontrolle übernehmen. Sind diese Funktionen nicht mehr vorhanden, oder von rascher Ermüdung betroffen, ist es notwendig, dass das BCI mehr Verantwortung übernimmt.

Eine Möglichkeit, wie BCI als das Hauptsteuersignal verwendet werden kann, um die Ellenbogen- und Greiffunktion einer Neuroprothese zu kontrollieren, wurde in [Wu13] gezeigt. Hier wurde ein zeitkodierte BCI verwendet: Lange Bewegungsvorstellungen wurden für Extension/Flexion des Arms verwendet. Der Winkel wurde dabei, solange die Vorstellung detektiert wurde, kontinuierlich mit Hilfe des FES-Stimulationsgeräts (MotionStim, Medel, Hamburg) mitgeregelt. Dies wurde durch einen Winkelsensor ermöglicht, der in der verwendeten hybriden FES-Orthese [Ro13] eingebaut war. Darüberhinaus konnte die Armposition durch einen mechanischen Riegel fixiert werden, um permanente Stimulation zu vermeiden, welche sonst rasch zu Ermüdung der kontrahierten Muskeln führt. Kurze Vorstellungen wurden verwendet, um die Hand zu öffnen oder zu schließen. Allerdings wurde zusätzlich eine sogenannte "Shared Control-" Logik verwendet [LM12], die je nach aktuellem Status, Kommandos auch anders interpretieren kann. Shared Control ist eine wichtige Komponente von hBCIs und dient vor allem dazu, die Steuerung für die Anwender durch zielorientierte Strategien zu unterstützen. Der Aufbau wird in Abb. 4

gezeigt. In diesem Szenario konnte mit kurzen Vorstellung je nach Position des Arms auch eine vollständige Extension oder Flexion erreicht werden. Im Experiment wurde von zehn gesunden und einem querschnittgelähmten Probanden versucht, vordefinierte Bewegungsabfolgen auszuführen. Der querschnittgelähmte Proband konnte dabei insgesamt die zweitbeste Leistung erzielen.

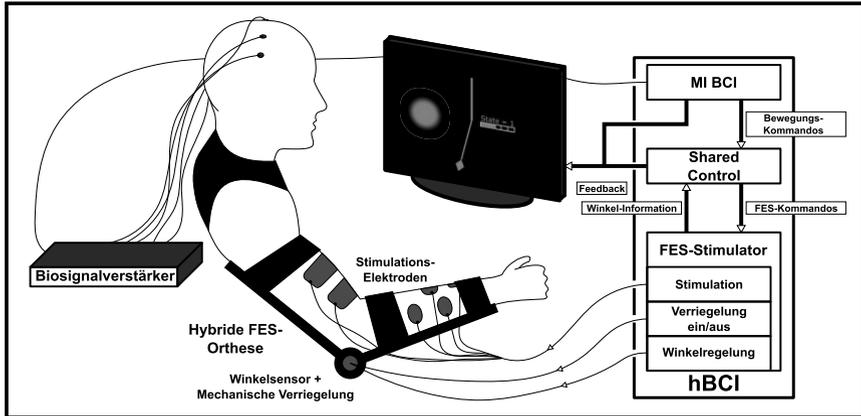


Abb. 4: Bei dieser hauptsächlich durch BCI gesteuerten Neuroprothese kann der Anwender mittels langen oder kurzen Bewegungsvorstellungen den Arm oder die Hand bewegen. Lange Vorstellungen bewegen den Arm, solange die Vorstellung aktiv detektiert wird. Eine kurze Vorstellung öffnet oder schließt die Hand, oder bewegt den Arm in die Ausgangs- oder Endposition. Diese kontextabhängigen Entscheidungen werden von der Shared Control-Logik getroffen. Der Winkel des Ellbogens wird mit dem Stimationsgerät eingeregelt. Die gewünschte Position kann mittels mechanischer Verriegelung fixiert werden.

In einem anderen Beispiel, bei dem die Anwender Schulterbewegungen durchführen und zum Teil auch noch den Ellenbogen abwinkeln können, wurden zwei hBCIs getestet, bei denen das BCI-Signal nur als Schalter verwendet wurde. In einer Variante wurde BCI dazu verwendet, zwischen zwei verschiedenen Greifmustern umzuschalten, die mit einem FES-Stimulationsgerät realisiert wurden. Damit konnte der Anwender frei entscheiden, ob er einen Palmar- oder einen Daumengriff verwenden wollte. Die tatsächliche Ausführung der Greifbewegung wurde dann mit einem Schulterpositionssensor gesteuert [Kr13a, Kr13b]. Bei einer anderen Variante wurde mit dem BCI zwischen Hand- und Armsteuerung umgeschaltet [Ro13]. Diese beiden Varianten wurden über einen Zeitraum von mehreren Monaten stetig eingesetzt und trainiert, sowohl im Labor als auch bei den Anwendern zu Hause.

7 Diskussion der Ergebnisse

In der ersten Publikation (Sektion 3) wurde ein allgemeines Problem der hBCI-Entwicklung behandelt. Da ein hBCI definitionsgemäß [Mu11, Pf10] mehrere Eingänge zur Verfügung hat, müssen auch gewisse Regeln, die vorgeben, wie die Eingänge zu verwenden sind, vorhanden sein. Liegen Informationen über den aktuellen Kontext vor (z.B. von

Kameras), können daraus Rückschlüsse über die individuelle Eignung von Signalen getroffen werden. In diesem Beispiel war das Ziel jedoch, eine Möglichkeit für den Fall aufzuzeigen, dass nur die Eingangssignale, aber keinerlei Zusatzinformationen, vorhanden sind. Die individuellen Qualitätsbewertungen konnten erfolgreich dazu verwendet werden, zwischen zwei Eingangssignalen umzuschalten. Es konnte beispielsweise gezeigt werden, dass schlechte BCI-Anwender weniger Zeit im BCI-Steuermodus verbrachten als geübte BCI-Anwender. Es konnte also eine potentielle Möglichkeit demonstriert werden, wie man Entscheidungen über das beste Eingangssignal treffen kann, basierend rein auf individuellen Signaleigenschaften.

Auch betreffend der Detektion von Fehlern in kontinuierlichen BCI-Anwendungen konnten Fortschritte verzeichnet werden (Sektionen 4 und 5). Zum einen konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, Fehler während kontinuierlicher Anwendungen zu detektieren und auch über Zufallsniveau zu klassifizieren, solange man einen sinnvollen Weg findet, diskretes Feedback zu integrieren. Zum anderen wurde anhand einer neuartigen Methode, der Mehrfachevent-Methode, signifikant bessere Klassifizierungen erreicht. Dabei wurden nicht einzelne Events klassifiziert, sondern ganze Trials, die mehrere solcher Events beinhalten konnten. Es gibt einige potentielle Anwendungsbeispiele für diese neue Methode. Zum Beispiel könnten dadurch ungewollte Zustände als falsch identifiziert werden, wenn diese über einen längeren Zeitraum diskrete Feedbackevents bereitstellen. Ein naheliegender Vergleich wäre beispielsweise das repetitive akustische Signal eines LKWs im Rückwärtsgang.

In Sektion 6 werden drei verschiedene, auf hBCI basierende, Neuroprothesensteuerungen vorgestellt. Die starken Unterschiede bei diesen Anwendungen demonstrieren die Notwendigkeit einer individuellen, Anwender-zentrierten Entwicklung. BCI-Applikationen müssen genau auf die Bedürfnisse und Fähigkeiten von potentiellen Anwendern abgestimmt sein und sich möglichst sinnvoll mit bestehenden assistiven Technologien kombinieren lassen. Diese Kombination kann durch das Bereitstellen von alternativen Steuerungssignalen erfolgen, aber auch durch zusätzliche Funktionen oder verbesserte Steuerungsmöglichkeiten durch Integration von Information, die man aus Gehirnsignalen zusätzlich ableiten kann.

8 Conclusio und Ausblick

In dieser Dissertation wird die Nützlichkeit von hybriden Entwicklungsprinzipien anhand einer Variation von Beispielen demonstriert. Diese beinhalten zum einen die Implementierung eines allgemeinen Konzepts, wie man anhand von Qualitätsbewertungen Steuerungssignale auswählen kann, aber auch konkrete Anwendungsbeispiele, die die Detektion von Fehlern in kontinuierlichen BCI-Applikationen zum Ziel hatten. Darüberhinaus wurden individuelle Lösungen für querschnittgelähmte Anwender erstellt und mit deren Hilfe über längere Zeiträume getestet.

Eine Zukunftsvision ist die Kombination aller untersuchten Themen: Die kontinuierliche, asynchrone Steuerung einer Neuroprothese für einen querschnittgelähmten Anwender, welche verschiedene Steuerungssignale (unter anderem BCI) zur Verfügung hat. Der

Anwender kann dann entweder selbst den Steuerungskanal auswählen, oder wird in der Auswahl oder auch in der Steuerung durch eine automatische Fehlerdetektion unterstützt. Eine Shared Control-Logik überwacht die Applikation und erleichtert für den Anwender die Kontrolle je nach aktuellem Kontext. Das Fundament für so eine Anwendung wurde jedenfalls mit der Dissertation schon gelegt.

Die Dissertation wurde vom europäischen Projekt Tools for Brain-Computer Interaction (TOBI), FP7-224631, gefördert.

Literaturverzeichnis

- [CSM14] Chavarriaga, Ricardo; Sobolewski, Aleksander; Millán, José del R.: Errare machinale est: The use of error-related potentials in brain-machine interfaces. *Frontiers in Neuroscience*, 8(208), 2014.
- [DMM10] Dal Seno, Bernardo; Matteucci, Matteo; Mainardi, Luca: Online detection of P300 and error potentials in a BCI speller. *Computational Intelligence and Neuroscience*, (307254):5, 2010.
- [Fe07] Ferrez, Pierre W.: Error-related EEG potentials in brain-computer interfaces. Dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.
- [KHMP15] Kreiling, Alex; Hiebel, Hannah; Müller-Putz, Gernot R.: Single versus multiple events error potential detection in a BCI-controlled car game with continuous and discrete feedback. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, S. in press, 2015.
- [KNMP12] Kreiling, Alex; Neuper, Christa; Müller-Putz, Gernot R.: Error potential detection during continuous movement of an artificial arm controlled by brain-computer interface. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 50(3):223–230, 2012.
- [Kr12] Kreiling, Alex; Kaiser, Vera; Breitwieser, Christian; Williamson, John; Neuper, Christa; Müller-Putz, Gernot R.: Switching between manual control and brain-computer interface using long term and short term quality measures. *Frontiers in Neuroscience*, 5(147), 2012.
- [Kr13a] Kreiling, Alex; Hiebel, Hannah; Ofner, Patrick; Rohm, Martin; Rupp, Rüdiger; Müller-Putz, Gernot R.: Brain-Computer Interfaces als assistierende Technologie und in der Rehabilitation nach Schlaganfall. *Orthopädie-Technik*, 6:18–25, 2013.
- [Kr13b] Kreiling, Alex; Kaiser, Vera; Rohm, Martin; Rupp, Rüdiger; Müller-Putz, Gernot R.: BCI and FES training of a spinal cord injured end-user to control a neuroprosthesis. In: *Proceedings of the BMT2013 Conference*. Graz, S. 1007–1008, 2013.
- [Kr15] Kreiling, Alex: Improving Continuous Motor Imagery-Controlled Applications with Hybrid Brain-Computer Interface Design Principles. Dissertation, Technische Universität Graz, 2015.
- [LM12] Leeb, Robert; Millán, José del R.: Introduction to devices, applications and users: Towards practical BCIs based on shared control techniques. In (Allison, B.; Dunne, S.; Leeb, R.; Millán, J. del R.; Nijholt, A., Hrsg.): *Towards Practical Brain-Computer Interfaces: Bridging the Gap from Research to Real-World Applications*. Springer, 2012.

- [Mu11] Mueller-Putz, Gernot R.; Breitwieser, Christian; Cincotti, Febo; Leeb, Robert; Schreuder, Martijn; Leotta, Francesco; Tavella, Michele; Bianchi, Luigi; Kreilinger, Alex; Ramsay, Andrew; Rohm, Martin; Sagebaum, Max; Tonin, Luca; Neuper, Christa; Millán, José del R.: Tools for Brain-Computer Interaction: a general concept for a hybrid BCI (hBCI). *Frontiers in Neuroinformatics*, 5(30):1–10, 2011.
- [O'07] O'Connell, Redmond G.; Dockree, Paul M.; Bellgrove, Mark A.; Kelly, Simon P.; Hester, Robert; Garavan, Hugh; Robertson, Ian H.; Foxe, John J.: The role of cingulate cortex in the detection of errors with and without awareness: a high-density electrical mapping study. *European Journal of Neuroscience*, 25(8):2571–2579, 2007.
- [Pf10] Pfurtscheller, Gert; Allison, Brendan Z.; Brunner, Clemens; Bauernfeind, Günther; Solis-Escalante, Teodoro; Scherer, Reinhold; Zander, Thorsten O.; Müller-Putz, Gernot R.; Neuper, Christa; Birbaumer, Niels: The hybrid BCI. *Frontiers in Neuroscience*, 4:30, 2010.
- [PN01] Pfurtscheller, Gert; Neuper, Christa: Motor imagery and direct brain-computer communication. *Proceedings of the IEEE*, 89:1123–1134, 2001.
- [Ro13] Rohm, Martin; Schneiders, Matthias; Müller, Constantin; Kreilinger, Alex; Kaiser, Vera; Müller-Putz, Gernot R.; Rupp, Rüdiger: Hybrid brain-computer interfaces and hybrid neuroprostheses for restoration of upper limb functions in individuals with high-level spinal cord injury. *Artificial Intelligence in Medicine*, 59(2):133–142, 2013.
- [Ru15] Rupp, Rüdiger; Rohm, Martin; Schneiders, Matthias; Kreilinger, Alex; Müller-Putz, Gernot R.: Functional rehabilitation of the paralyzed upper extremity after spinal cord injury by noninvasive hybrid neuroprostheses. *Proceedings of the IEEE*, 103(6):954–968, 2015.
- [Sp12] Spüler, Martin; Bensch, Michael; Kleih, Sonja; Rosenstiel, Wolfgang; Bogdan, Martin; Kübler, Andrea: Online use of error-related potentials in healthy users and people with severe motor impairment increases performance of a P300-BCI. *Clinical Neurophysiology*, 123(7):1328–1337, 2012.
- [Wu13] Wu, Zhaohui; Reddy, Raj; Pan, Gang; Zheng, Nenggan; Verschure, Paul F. M. J.; Zhang, Qiaosheng; Zheng, Xiaoxiang; Principe, José C.; Kreilinger, Alex; Rohm, Martin; Kaiser, Vera; Leeb, Robert; Rupp, Rüdiger; Müller-Putz, Gernot R.: The convergence of machine and biological intelligence. *Intelligent Systems, IEEE*, 28(5):28–43, 2013.



Alex Kreilinger hat im Jahr 2008 sein Diplomstudium Elektrotechnik/Biomedizinische Technik an der Technischen Universität Graz abgeschlossen. Von 2008–2013 war er am Institut für Neurotechnologie an der Technischen Universität Graz als wissenschaftlicher Projektmitarbeiter angestellt und hat 2015 an diesem Institut sein Doktoratsstudium erfolgreich beendet. Seit 2013 ist er als wissenschaftlicher Projektmitarbeiter an der Universitätsaugenklinik, Artificial Vision Center, an der Medizinischen Universität Graz tätig. Seine Forschungsinteressen beinhalten Gehirn-Computer Schnittstellen, insbesondere die Detektion von Fehlern in Gehirnsignalen, die Steuerung von Neuroprothesen und die Rehabilitation von Sehfunktionen blinder Personen mittels Retinaimplantaten.