

Verbundvorhaben	<b>IMMI</b> Intelligentes Mensch-Maschine-Interface - Adaptives Brain-Reading für unterstützende Robotik
Titel	<b>Abschlussbericht</b>
Förderkennzeichen	50RA1011
Zuwendungsempfänger	Universität Bremen Bibliotheksstrasse 1, D-28359 Bremen
Ausführende Stelle	Arbeitsgruppe Robotik der Universität Bremen, Bremen
Projektleiter	Prof. Dr. Frank Kirchner
Bewilligungszeitraum	15.05.2010 - 30.04.2015
Autoren	Dr. Elsa Andrea Kirchner, Dr. Su-Kyoung Kim, Dr. Mario Michael Krell, Anett Seeland, Hendrik Wöhrle, Marc Tabie
Erstellungsdatum:	24. Juli 2015

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 50RA1011 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50RA1011.

# Inhaltsverzeichnis

Einleitung	6
<b>1 Kurzdarstellung nach NKBF 98 8.2 I</b>	<b>7</b>
1.1 Aufgabenstellung	7
1.1.1 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele	8
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	9
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	9
1.3.1 Übersicht und Zusammenarbeit mit Dritten	9
1.3.2 Begründungen von Planabweichungen	12
1.4 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen	16
1.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	18
1.5.1 Eigene Vorarbeiten	25
1.5.2 Fachliteratur und verwendete Dokumentationsdienste	26
<b>2 Eingehende Darstellung nach NKBF 98 8.2 II</b>	<b>27</b>
2.1 Verwendung der Zuwendung	27
2.1.1 AP1100 Projekt-Management	27
2.1.2 AP1200 Außendarstellung PR	28
2.1.3 AP1300 Kooperation und Datenverwaltung	29
2.1.4 AP1400 Koordination von Veröffentlichungen	30
2.1.5 AP2100 Konzeptentwicklung	33
2.1.6 AP2200 Wahrnehmung und Bewegung	35
2.1.7 AP2300 Fehlerverarbeitung	37
2.1.8 AP2400 Bewegungslokalisierung	39
2.1.9 AP2500 Gesamtauswertung und Ausblick	41
2.1.10 AP3100 Testumgebung für BR-Methoden	43
2.1.11 AP3200 Deskriptive Analyse und Visualisierung	44
2.1.12 AP3300 Weiterentwicklung der BR-Methodik	45
2.1.13 AP3400 Adaptive Brain-Reading	46

---

2.1.14 AP4100 Anforderungsanalyse und Architekturentwurf . . . . .	48
2.1.15 AP4200 Umsetzung und Evaluierung der Komponenten . . . . .	48
2.1.16 AP4300 Umsetzung der Gesamtarchitektur . . . . .	48
2.1.17 AP5100 Spezifikation eines Anwendungsszenarios . . . . .	49
2.1.18 AP5200 Aufbau des Anwendungsszenario . . . . .	49
2.1.19 AP5300 Test im Anwendungsszenario . . . . .	54
2.1.20 AP5400 Dokumentation der Ergebnisse . . . . .	55
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises . . . . .	55
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit . . . . .	56
2.4 Voraussichtlicher Nutzen . . . . .	57
2.4.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte . . .	57
2.4.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende . . . . .	57
2.4.3 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende	58
2.5 Bekannt gewordener Fortschritt . . . . .	58
<b>3 Zusammenfassung</b>	<b>60</b>
<b>A Anhang</b>	<b>76</b>
A.1 Glossar . . . . .	76

## Abbildungsverzeichnis

1.1	<i>Einfacher Projektstrukturplan und Bezüge zwischen den Arbeitsbereichen . . .</i>	10
1.2	<i>Detaillierter Projektstrukturplan mit Unterarbeitspaketen der Aufstockung. Die Arbeitspakete mit zusätzlichen Arbeiten im Rahmen der Aufstockung sind durch einen verstärkten Rahmen gekennzeichnet. . . . .</i>	10
1.3	<i>Zeitplanung mit erweiterten Arbeitspaketen der kostenneutralen Verlängerung und Aufstockung. . . . .</i>	11
1.4	<i>Kernkompetenzen der Partner . . . . .</i>	12
2.1	<i>Quantitative Darstellung der Publikationen aus IMMI . . . . .</i>	32

# Tabellenverzeichnis

## Einleitung

Das vorliegende Dokument stellt den Abschlussbericht des Vorhabens IMMI dar. IMMI wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi, Förderkennzeichen 50RA1011) gefördert.

Dieser Abschlussbericht folgt dabei dem in der Anlage 2 zum NKBF 98 gegebenen Muster. In Kapitel 1 wird eine kurze Darstellung des Projektes gemäß Punkt I gegeben, Kapitel 2 stellt die inhaltlichen Entwicklungen in einer eingehenden Darstellung gemäß Punkt II des Musters dar. Die Punkte III (Erfolgskontrollbericht) und IV (Berichtsblatt bzw. Document Control Sheet) werden durch gesondert abgegebene Dokumente erfüllt.

Die dargestellten Arbeiten umfassen alle von der Universität Bremen geleisteten Arbeiten im Vorhaben IMMI.

# 1 Kurzdarstellung nach NKBF 98 8.2 I

In diesem Kapitel wird zunächst die Aufgabenstellung des Vorhabens IMMI beschrieben (Abschnitt 1.1). Anschließend werden die Voraussetzungen des Vorhabens (Abschnitt 1.2) sowie Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Zusammenarbeit mit Dritten (Abschnitt 1.3) mit begründeten Abweichungen von der Originalplanung behandelt. In Kapitel 1.4 wird der Bezug des Vorhabens zu förderpolitischen Zielen dargestellt. Es folgen Erläuterungen zum wissenschaftlichen Stand und zu eigenen Vorarbeiten (Abschnitt 1.5).

## 1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Vorhabens IMMI sollen Schlüsseltechnologien entwickelt werden, die echtzeitfähiges und adaptives „Brain-Reading“ ermöglichen. Brain-Reading (BR) bezeichnet die Analyse von Gehirnaktivität zum Zwecke einer Zustands- und Verhaltensvorhersage beim Menschen. Systeme, in denen adaptives Brain-Reading (aBR) integriert ist, sind derart gestaltet, dass sie sich selbstständig an wechselnde Bediener und Szenarien anpassen, um eine größtmögliche Einsatzfähigkeit in der Praxis zu gewährleisten.

Echtzeitfähiges aBR kann eingesetzt werden, um eine neuartige Generation von Mensch-Maschine-Schnittstellen zu entwickeln. Hierbei ergibt sich eine Vielzahl neuer Anwendungen in der Raumfahrt, etwa bei der Leitung teilautonomer Systeme für Explorationsmissionen, Wartungsaufgaben auf Raumstationen sowie Manipulationen allgemein, wie sie z. B. bei der Installation und Durchführung von Experimenten innerhalb und außerhalb der ISS auftreten. Durch ihren Einsatz ermöglichen aBR-Systeme die Erhöhung von Sicherheit und Effizienz komplexer Telemanipulationsaufgaben (etwa bei der Reparatur von Satelliten im All).

Systeme, welche für die Analyse der Gehirnaktivität eingesetzt werden, bestehen aus mindestens zwei Subsystemen: einem System für die Akquisition der Biosignale und dem eigentlichen

BR-System zur Verarbeitung der Biosignale. Für zukünftige Anwendungen muss das BR-System eine möglichst hohe Portabilität aufweisen. Im Rahmen dieses Vorhabens wird ein portables BR-System auf Basis von massiv-paralleler Datenverarbeitung konstruiert und getestet.

### 1.1.1 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Der Schwerpunkt des Vorhabenpartners Universität Bremen lag in der Umsetzung der wissenschaftlichen Arbeitsziele. Entsprechend werden diese hier nochmals aufgeführt.

#### WISSENSCHAFTLICHE ARBEITSZIELE

Besonderer Wert sollte auf die Nutzung der zu entwickelnden Algorithmen sowohl in der Grundlagenforschung als auch in der anwendungsnahen Forschung gelegt werden. Teilergebnisse des Vorhabens sind daher die Entwicklung neuer Algorithmen, die sowohl in der neurobiologischen Grundlagenforschung Verwendung finden als auch in eingebetteten BR-Anwendungen für assistierende Robotiksysteme genutzt werden sollen.

Es sollen neue Kenntnisse über funktionale Zusammenhänge zwischen sich gegenseitig bedingenden Prozessen gewonnen werden. Besonders für die Analyse von Prozessen, die sich im Laufe der Zeit ändern (z. B. Adaptation durch Training und deren Auswirkung auf Planung und Kontrolle von motorischem Verhalten aber auch auf die Analyse von Informationen), müssen neuartige Auswertungsmethoden für Gehirnaktivitätsdaten entwickelt werden. Die im Vorhaben IMMI entstandenen Methoden und Algorithmen sind Grundlage für Weiterentwicklungen in zukünftigen Vorhaben, welche der Fortentwicklung von Ansätzen der Zustands- und Intentionsüberwachung von Operatoren *komplexer Szenarien* dienen.

Wissenschaftliche Ziele des Vorhabens sind:

- Methoden für echtzeitfähiges aBR zur Zustandsbestimmung und Verhaltensvorhersage beim Menschen
  
- Neue Erkenntnisse über funktionelle Zusammenhänge zwischen Wahrnehmung, sensorischer Verarbeitung und Bewegung bzw. Bewegungsplanung

- Erweiterung der methodischen Herangehensweise und Analyse von (Gehirn-)Daten
- Entwicklung von echtzeitfähigen BR-Algorithmen für hochparallelisierte Recheneinheiten

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im vom BMBF geförderten Vorhabens VI-Bot konnten für die Durchführung des Vorhabens bereits grundlegende IMMI Kompetenzen entwickelt werden. Insbesondere wurden erste Algorithmen zur online Analyse von Elektroenzephalographie (EEG)-Daten entwickelt, auf die im Vorhaben IMMI aufgebaut werden konnte.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

### 1.3.1 Übersicht und Zusammenarbeit mit Dritten

Das Vorhaben IMMI begann am 01.04.2011 und wurde im Anschluss an das originäre Ende am 14.5.2014 bis zum 31.7.2014 kostenneutral verlängert. Außerdem gab es eine Aufstockung vom 1.8.2014 bis zum 30.4.2015. Zur Umsetzung des Vorhabens wurden die anfallenden Arbeiten in fünf Arbeitsbereiche (vier technische und ein administrativer) gegliedert (siehe Abbildung 1.1 und für eine genauere Übersicht bis zur Ebene von Unterarbeitspaketen siehe Abbildung 1.2). Die zeitliche Abwicklung des Arbeitsplans erfolgte wie in Abbildung 1.3 dargestellt.

#### ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Die Arbeiten werden von den Vorhabenpartnern DFKI RIC und Universität Bremen durchgeführt. Beide Partner arbeiten unter der Leitung von Prof. Kirchner. Aus diesem Grund wird von einer strikten Trennung der Aufgaben der einzelnen Partner in Unterarbeitspakete abgesehen. Es

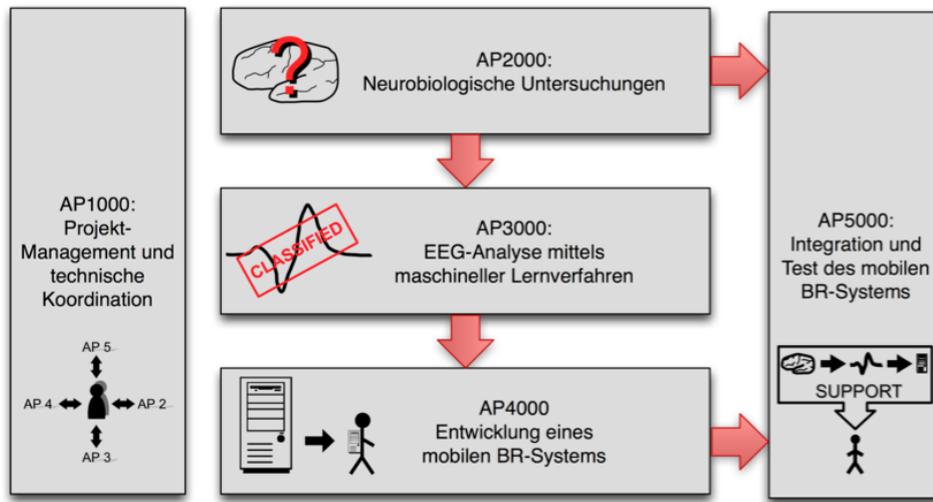


Abbildung 1.1 Einfacher Projektstrukturplan und Bezüge zwischen den Arbeitsbereichen

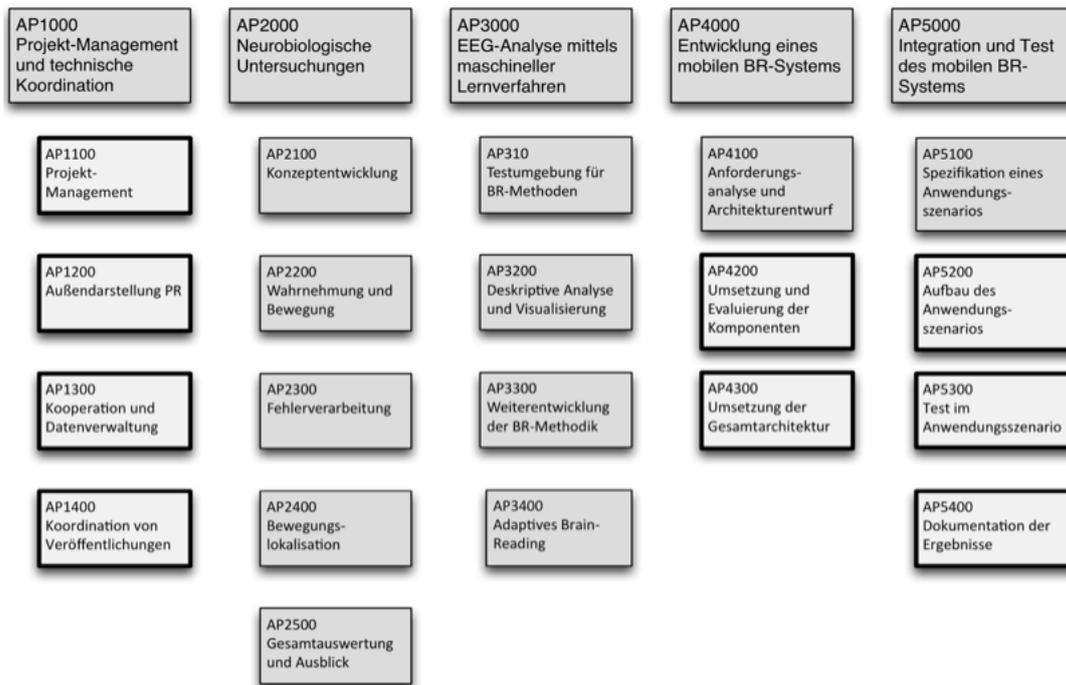


Abbildung 1.2 Detaillierter Projektstrukturplan mit Unterarbeitspaketen der Aufstockung. Die Arbeitspakete mit zusätzlichen Arbeiten im Rahmen der Aufstockung sind durch einen verstärkten Rahmen gekennzeichnet.



Abbildung 1.3 Zeitplanung mit erweiterten Arbeitspaketen der kostenneutralen Verlängerung und Aufstockung.

ist durchaus sinnvoll, dass einzelne Unterarbeitspakete sowohl von Mitarbeitern des DFKI RIC als auch von der Universität Bremen bearbeitet werden, da schon in früheren Vorhaben effektive Zusammenarbeit geleistet wurde. Insgesamt kann jedoch gesagt werden, dass der Schwerpunkt der Arbeiten der Universität Bremen in den Arbeitspaketen AP2000 und AP5000 lag. Zu den Arbeitspaketen in AP2000 und AP3000 wurde hälftig und zu den Arbeitspaketen in AP4000 den Vorhabenpartner unterstützend beigetragen.

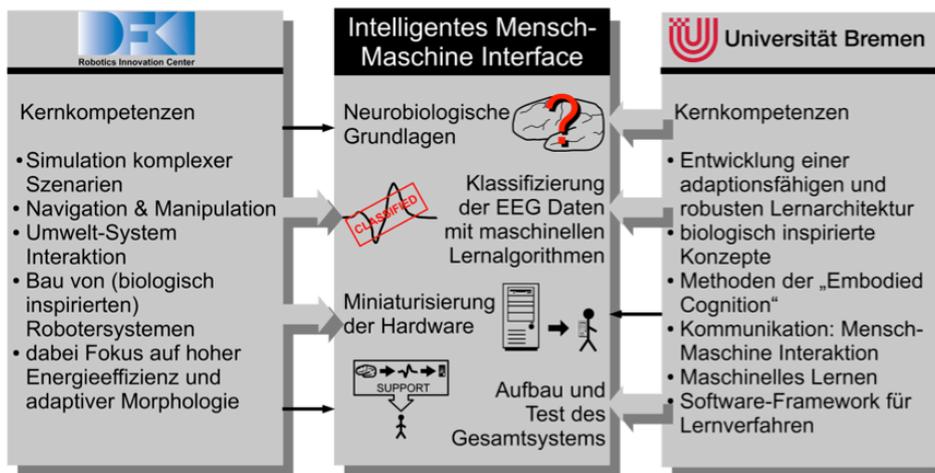


Abbildung 1.4 Kernkompetenzen der Partner

Das Vorhaben IMMI wurde vom DFKI als Konsortialpartner geleitet. Entsprechend war das DFKI Vorhabenpartner der Universität Bremen. Eine Kooperation war bezüglich der benötigten Kernkompetenzen beider Partner (siehe Abbildung 1.4) für das Erreichen der Ziele notwendig.

### 1.3.2 Begründungen von Planabweichungen

#### BEGRÜNDUNG DER KOSTENNEUTRALEN VERLÄNGERUNG

Auf Grund von unvorhergesehenen technischen Problemen bei der Integration und unerwartet hohen Anforderungen bei den Schnittstellenarbeiten im Anwendungsszenario (Arbeitspaket 5000) konnten die Arbeiten zur Finalisierung der Demonstration von Brain Reading in der vorgesehen Anwendung nicht rechtzeitig zum ursprünglichen Vorhabenende, dem 14.05.2014

erfolgen. Insbesondere wurde der Aufwand der die Integration der Kommunikationsprotokolle in das CAVE System, um die korrekte Interaktion zwischen dem Master und den Clients (Rechner die die CAVE Simulations- und Virtualisierungssoftware steuern und auf die Projektionswände verteilen) und die damit einhergehenden Probleme mit dem Timing in der Anzeige von Informationen für den Nutzer und der Aufzeichnung des Antwortverhaltens unterschätzt. Es waren intensive und aufwendige Anpassungen an der CAVE Software und umfangreiche Tests nötig. Es stellte sich außerdem heraus, dass die Überprüfung der Korrektheit des entwickelten Ansatzes in Bezug auf entstehende Latenzen in der Kommunikation deutlich zeitintensiver war als angenommen. Zusätzlich musste ein zunächst geplantes Anwendungsszenario angepasst werden, da das robotische System, welches zum Einsatz kommen sollte, sehr wartungsintensiv war und daher schlussendlich nicht zum Einsatz kam.

Auf Grund der Verzögerungen auf unserer Seite ergaben sich entsprechend auch Verzögerungen beim Vorhabenspartner DFKI, da einige Arbeiten ohne Test nicht abgeschlossen werden konnten. Um die technischen Mängel für die erfolgreiche Demonstration des gesamten Systems beheben zu können, wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Vorhabens IMMI um 2,5 Monate, also bis zum 31.7.2014, beantragt. Diese Verlängerung war notwendig um den positiven Gesamtabschluss und das Erreichen des Gesamtzieles von IMMI sicher zu stellen.

## **BEGRÜNDUNG EINER AUFSTOCKUNG**

Der Einsatz adaptiver Verfahren in mobilen Systemen verspricht nach derzeitigem Stand des Wissens weit höheren Nutzen als zu Beginn des Vorhabens IMMI angenommen wurde. Die Entwicklung adaptiver mobiler BR-Systeme war jedoch nicht Inhalt von IMMI. Eine Kombination dieser Entwicklungen aus IMMI (adaptive Verfahren und mobiles BR-System) wird als äußerst sinnvoll und nutzbringend erachtet, da es ermöglicht BR-Systeme nicht nur mobil zu halten und in komplexe Umgebungen zu integrieren, sondern sie auch automatisch während der Nutzung an verschiedene Nutzer anzupassen. Damit fallen aufwändige Trainingseinheiten aus und der Nutzer bleibt mobil und flexibel. Hieraus folgt eine wesentlich verbesserte Anwendbarkeit. Konkret besteht Interesse verschiedener Firmen solche mobilen adaptiven BR-Systeme zu nutzen, um etwa mobile Auswertung mit mobilen EEG-Systemen zu verbinden oder mobile BR-Systeme in andere Supportsysteme wie Orthesen zu integrieren und so gerätegestützte Rehabilitation zu ermöglichen oder zu optimieren. Eine Reihe weiterer, über die Ziele des Vorhabens IMMI hinausgehender, wichtiger Fortschritte in Forschungs- und Anwendungsgebieten könnten mit dem Einsatz adaptiver, mobiler BR-Systeme erzielt werden.

Eine Entwicklung solcher Systeme würde zu folgenden Anwendungsgebieten und bei den dortigen Herausforderungen genutzt werden können:

- **Signalverarbeitung und Mustererkennung:** Allgemein gilt die Echtzeitanalyse von Biosignalen wie dem Elektroenzephalogramm als wichtiges Referenzproblem auf dem Gebiet der Signalverarbeitung und Mustererkennung. Eine zuverlässige Verarbeitung nicht-stationärer Daten, wie dies beim EEG der Fall ist, ist ein derzeit nicht gelöstes Problem der Grundlagenforschung.
- **Big Data:** Es zeichnet sich allgemein der Trend zu wachsenden Datenmengen ab, welche mit Hilfe maschineller Lernverfahren in Echtzeit und adaptiv analysiert werden müssen.
- **Miniaturisierung:** Ein weiterer aktueller Trend ist das Verschwinden des herkömmlichen Rechners: Miniaturisierte, mobile oder eingebettete Systeme übernehmen in vielen Bereichen dessen Aufgaben.

Eine Kombination genau dieser drei Bereiche ist dementsprechend ein sich abzeichnender Trend, der zu einer Reihe von emergenten, sich gegenseitig positiv beeinflussenden Entwicklungen führen wird. Hierbei tragen die Weiterentwicklungen nicht nur zur Lösung von Grundlagenproblemen bei, sondern liefern auch Lösungsansätze für anwendungsorientierte Fragen. Insbesondere können durch die Kombination und Weiterentwicklung von Ergebnissen aus IMMI über die ursprüngliche Zielsetzung hinausgehende Ergebnisse mit geringfügigem Mehraufwand erreicht werden:

- **Entwicklung von übertragbaren und in anderen Bereichen wiederverwendbaren Verfahren** zur Bereitstellung von hochperformanten, massiv-parallelen mobilen Datenverarbeitungssystemen. Diese können große Datenmengen nicht nur schnell und energieeffizient verarbeiten, sondern sich auch auf die jeweilige Situation anpassen.
- **Durch die Verwendung dieser Systeme können Anwendungen realisiert werden, die z. B. eine benutzerspezifische echtzeitfähige Datenverarbeitung von Biosignalen voraussetzen, welche direkt in eine Anwendung eingebettet ist.**

Eine Vorhersage über die Erreichbarkeit dieser wertvollen Erkenntnisse war zur Zeit der Antragstellung des ursprünglichen Vorhabens nicht absehbar. Nach aktuellem Stand der erzielten Ergebnisse wird ein Erreichen dieser zusätzlichen Ziele im Rahmen einer kostenintensiven

Verlängerung von IMMI jedoch möglich. Dies ist sowohl aus wissenschaftlicher Perspektive als auch aus Sicht der Verwertung überaus wünschenswert und würde ein weiteres weithin sichtbares Alleinstellungsmerkmal des Vorhabens IMMI darstellen. Dementsprechend resultiert daraus eine weitaus größere Verwertbarkeit der Ergebnisse aus IMMI.

Die Entwicklungen lassen sich potentiell auf eine Reihe von weiteren Anwendungsgebieten übertragen, beispielsweise die adaptive, d. h. situationsspezifische, mobile und integrierte Echtzeitverarbeitung von Sensorinformationen in Robotern.

Aufgrund der für diese Weiterentwicklung notwendigen, zu unterhaltenden Infrastruktur (wie z. B. Hochleistungsrechner, Elektronikkomponenten) sowie der im Laufe des Vorhabens IMMI gewonnenen und notwendigen Kenntnisse der Mitarbeiter hat sich diese kostenintensive Verlängerung zum damaligen Zeitpunkt angeboten. Zu einem späteren Zeitpunkt wäre sie nur unter wesentlich vergrößertem Aufwand und Kosten zu erreichen gewesen, da besonders geschulte Mitarbeiter und die vorhabensspezifische Ausrüstung und Versuchsaufbauten nicht zur Verfügung gestanden hätten.

**ZUSÄTZLICHE UND ERGÄNZENDE ZIELSETZUNG IM RAHMEN DER BEANTRAGTEN AUFSTOCKUNG:** Wie bereits eingangs beschrieben, war zum Zeitpunkt vor der Aufstockung absehbar, dass die erzielten Erfolge in IMMI mit einem geringfügigen Mehraufwand ausgebaut werden können. Dies würde für viele gegenwärtig aktuelle Forschungsgebiete eine wesentliche Bedeutung haben.

Eine aktuelle Fragestellung in der Wissenschaft ist das Problem, wie anfallende Messdaten effizient verarbeitet und gespeichert werden können. Dieses Problem ist grundlegend und eine wesentliche Fragestellung für die Zukunft in einer Vielzahl von wissenschaftlichen Bereichen. Da im Vorhaben IMMI dieses Problem aufgrund der Masse der anfallenden Biodaten bereits seit Beginn des Vorhabens berücksichtigt werden musste, konnten auch bereits eine Reihe von Lösungsansätzen entwickelt werden.

Aufbauend auf diesen Ansätzen lassen sich nun mit nur geringfügigem Mehraufwand abgerundete Lösungen entwickeln. Insbesondere bei der Kombination verschiedener Ansätze (z. B. der massiv-parallelen Datenverarbeitung mit adaptiven Algorithmen) ist von bedeutsamen Resultaten und damit wesentlich gesteigerten Erfolgsaussichten auszugehen. Hierfür müssen die folgenden Ziele erreicht werden:

- Implementierung der adaptiven Algorithmen als Hardwarebeschleuniger
- Integration der adaptiven Algorithmen in das mobile BR-System
- Verifikation der Funktionalität auf Testdaten
- Erweiterung der Anwendungsszenarien, um die neue Funktionalität demonstrieren zu können
- Durchführung von Untersuchungen im Anwendungsszenario
- Auswertung der Untersuchungen

Im Rahmen der Aufstockung lagen die Schwerpunkte der Aufgaben der Universität Bremen in AP5000.

## 1.4 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Die methodischen und technologischen Entwicklungen in IMMI spiegeln die Grundlage der aktuellen Raumfahrtstrategie wieder. Sie belegen deutlich, dass sich die technologischen Entwicklungen der Raumfahrtforschung als Schlüsseltechnologien direkt oder mit gewissen Anpassungen auch für weitere Anwendungsgebiete und andere technologische und wissenschaftliche Bereiche einsetzen lassen. Aufgrund der Relevanz der Fragestellungen, welche in IMMI originär bearbeitet wurden, hat IMMI über reine Raumfahrtprobleme hinausgehende Einsatzmöglichkeiten. Durch die in der Verlängerung durchgeführte Kombination verschiedener Entwicklungen (d. h. die Entwicklung adaptiver maschineller Lernverfahren auf Basis mobiler rekonfigurierbarer Hardwaresysteme) lässt sich die Verwertbarkeit von IMMI auf eine Vielzahl von Bereichen weiter ausdehnen und damit entsprechend erhöhen.

Im direkten Zusammenhang mit der im Vorhaben IMMI verwendeten Biosignalverarbeitung wurde folgender zusätzlicher Mehrwert für die Erreichung förderpolitischer Ziele erwartet:

- Die wesentlichen Vorteile zweier Entwicklungsrichtungen werden verbunden: Mobilität und Adaptivität. Durch die Mobilität des in IMMI entwickelten mobilen BR-Systems kann

BR leicht in einer Vielzahl von verschiedenen Anwendungen eingesetzt werden, welche ein mobiles oder in die Anwendung eingebettetes System zur Datenverarbeitung voraussetzen. Adaptivität wiederum erlaubt, das System während des Einsatzes auf den jeweiligen Benutzer zu kalibrieren und auch sich verändernde kognitive Zustände kompensieren zu können. Durch die direkte Kombination dieser Techniken ergibt sich eine hochgradige Unabhängigkeit des mobilen Systems. Damit erhöht sich die Nutzbarkeit in den geplanten Einsatzgebieten.

- Diese Kombination würde auch die Verwendbarkeit in einer Reihe von Einsatzgebieten erhöhen, welche durch eine integrierte Biosignalverarbeitung verbessert werden können. Da hier der praktischen Einsatzfähigkeit eine wesentliche Bedeutung zukommt, müssen die eingesetzten Systeme zur Biosignalverarbeitung sowohl mobil als auch adaptiv sein:
  - EMG-sensitive Kontrolle von Orthesen im Alltag – Unterstützung schwerer Arbeiten oder älterer Menschen im Sinne der Ziele des demographischen Wandels
  - Integration von EEG- und EMG-basierter Bewegungsvorhersage zur Feinkontrolle von rehabilitationsunterstützenden robotischen Systemen wie z. B. Exoskeletten
  - Überwachung von anspruchsvollen kognitiven Arbeiten durch mobile Überwachungs- und Unterstützungssysteme.

Dies kann auch als Basis für Entwicklungen auf weiteren Anwendungsfeldern dienen:

- Echtzeitverarbeitung von Sensorsignalen in robotischen Systemen. Zunehmend werden Methoden des maschinellen Lernens in der Signalverarbeitung eingesetzt. Diese Methoden müssen anhand von Daten trainiert werden, was ihre Einsatzfähigkeit stark einschränkt. Hier können adaptive Methoden Abhilfe schaffen, da diese ein Training oder eine Anpassung eines anhand von Referenzdaten vortrainierten Systems erlauben. Da sich dies meist als sehr rechenaufwändig erweist, besteht hier wiederum der Bedarf an massiv-paralleler Datenverarbeitung, wie sie in IMMI entwickelt wird.
- Beschleunigung sonstiger adaptiver Verfahren, welche häufig in eingebetteten Systemen zum Einsatz kommen, z. B. adaptive Regelungstechnik.

## 1.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Die für IMMI originär relevanten Aspekte des damaligen Standes von Wissenschaft und Technik werden im Folgenden kurz umrissen. Für die Universität Bremen sind hier folgende Arbeiten relevant:

### WAHRNEHMUNGSPROZESSE

Den mentalen Zustand sowie die Zustandsänderung eines Operators kann ein BR-System prognostizieren, indem es spezifische Aktivitätsänderungen des Gehirns im EEG detektiert. Ein bekanntes und seit längerem untersuchtes Hirnpotential<sup>1</sup>, das auch häufig im Brain-Computer-Interface (BCI)-Anwendungsbereich eingesetzt wird, ist das sog. P300-Potential. Das P300-Potential ist eine Bezeichnung der P300-Gruppe, die sich je nach der zeitlich-räumlichen Charakteristik in P3a, P3b und "slow wave" unterteilen lässt [80, 58].

Meistens bezieht sich die Bezeichnung P300 im klassischen Sinne auf das P3b (welches daher ab hier vereinfachend als P300 bezeichnet wird), das durch ein sog. "Oddball-Paradigma" evoziert werden kann [55, 30, 66]. Im "Oddball-Paradigma" werden seltene, wichtige Stimuli (sogenannte "oddballs", z. B. wichtige Informationen sowie Warnungen) zusammen mit einer Serie von Hintergrundstimuli (z. B. unwichtigen Informationen) dargestellt. Bei der Wahrnehmung des wichtigen Stimulus tritt ein positives Potential etwa 350 ms nach dessen Präsentation auf, das als P300 bezeichnet wird [86]. Dagegen lösen unwichtige Stimuli keine P300 aus, weil sie durch die Verarbeitung im Gehirn frühzeitig ausgefiltert werden.

Die Morphologie des P300-Potentials, bestehend aus Amplitude, Latenz und Topographie, wird von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst. Zum Beispiel reduziert sich die Amplitude des P300-Potentials, a) wenn die Wahrscheinlichkeit des Auftretens wichtiger Informationen steigt [69, 79] b) wenn wichtige Informationen zeitlich nah zueinander auftreten [85, 27] und c) wenn sich die Anzahl der Messsitzen erhöht, wobei die Reduktion der Amplitude modalitätsspezifisch ist. Bei der auditiven Stimulusdarstellung wird die Intensität der Amplitude reduziert

---

<sup>1</sup>Ein Potential, oder Hirnpotential, steht für eine zeitlich abgrenzbare, kurzfristige negative oder positive Schwankung der von außen auf der Kopfoberfläche über Differenzmessung zwischen zwei Elektroden messbaren Hirnströme.

[65], aber nicht bei der visuellen Stimulusdarstellung [21].

Die Latenz des P300-Potentials verändert sich ebenfalls mit der Schnelligkeit der Evaluierung der Stimuli sowie mit der mentalen Auslastung des Operators. Zum Beispiel tritt das (P300)-Potential verzögert auf, wenn eine seltene, wichtige Information sehr schwierig zu identifizieren bzw. zu evaluieren ist [59, 33]. Auch lässt sich eine Latenzverschiebung beobachten, wenn der Operator mehrere gleich wichtige Aufgaben gleichzeitig erledigen soll [68]. Das P300-Potential hat in centro-parietalen Hirnregionen sein Maximum und stellt eine Summation weit gestreuter Hirnaktivität dar [67].

#### **KORREKTUR VON AUGENARTEFAKTEN**

EEG-Daten enthalten nicht nur Gehirnaktivität sondern auch Aktivitäten von Augenbewegungen. Es existieren verschiedene Methoden zur Korrektur der Aktivitäten von Augenbewegungen (Augenartefakten): z. B. zwei Methoden auf Basis von Regression (Regression [28, 37, 10] und gefilterte Regression [19, 72]) und zwei Methoden auf Basis von Unabhängigkeitsanalyse (Infomax [35] und SOBI [4]).

**Methoden auf Basis von Regression:** Die *Regressionsmethode* ist eine der bekanntesten Methoden zur Artefakteliminierung auf Basis des Elektrokulogramm (EOG). Diese Methode basiert auf der Annahme, dass die aus dem EOG-Elektroden gemessenen Artefakte linear den aus mehreren Elektroden gemessene EEG-Daten hinzugefügt werden. Unter dieser Annahme wird die Regression als eine Standardmethode zur Eliminierung der Augenartefakte betrachtet [28, 37, 10]. Auf Basis von Daten aus den jeweiligen Elektroden und Referenz-Elektroden (vertikale und horizontale EOG), wird der Verkürzungsfaktor mit der Methode der kleinsten Quadrate geschätzt [11].

Jedoch kann bei der EEG-Aufnahme eine bidirektionale Kontamination auftreten. Einerseits können die EEG-Daten durch die Augenaktivitäten (z. B. Augenbewegungen, Blinzeln) kontaminiert werden. Andererseits können die EOG-Daten durch die Gehirnaktivitäten kontaminiert werden [92]. Daher können während der Eliminierung der Augenartefakten EEG-Signale mit eliminiert werden. Um die bidirektionale Kontamination zu vermeiden, können vor der Regression die EOG-Daten gefiltert werden. Dieser Verfahren wird dann *gefilterte Regressionsmethode* genannt [19, 72].

**Methoden auf Basis von Unabhängigkeitsanalyse:** Die Unabhängigkeitsanalyse basiert auf der Annahme, dass Gehirnaktivitäten und Augenartefakte unabhängige Quellen haben. Die Unabhängigkeitsanalyse trennt EEG-Prozesse, die in ihrer zeitlichen Signalform maximal unabhängig sind. Augenartefakte stellen unabhängige Komponente mit spezifischen Aktivitätsmuster dar. Dagegen sind EEG-Aktivitäten an verschiedenen Elektroden stark korreliert und enthalten daher redundante Information. Die Artefakte projizieren auf Überlappung der Menge von Elektroden. Mittels Unabhängigkeitsanalyse können die überlappenden Projektionen der Artefakte an allen Elektroden isoliert werden [12]. Es gibt zwei Varianten der Unabhängigkeitsanalyse: *Infomax* und *SOBI*. Die *Infomax*-Methode ist ein parametrischer Ansatz zum Schätzen der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Komponente [3]. Dagegen ist die *SOBI*-Methode ein Methode zweiter Ordnung, die zeitliche Korrelationen in den Quellenaktivitäten verlangt [4].

Die zwei Methoden auf Basis von der Unabhängigkeitsanalyse (*Infomax* und *SOBI*) können mit zwei weiteren Methoden zur Identifizierung der Augenartefakte kombiniert benutzt werden: 1) *Adjust* [62] und 2) *Korrelation*.

**1) *Adjust*-Methode:** Die *Adjust*-Methode nutzt die Kombination des zeitlichen Verlaufes und der räumlichen Verteilung der unabhängigen Komponenten zur Identifizierung der Augenartefakte. Hierbei wurden z. B. drei Typen der Augenartefakte berücksichtigt: 1) Blinzeln, 2) vertikale Augenbewegungen und 3) horizontale Augenbewegungen. Für den jeweiligen Artefakttyp kann ein Detektor, der die zeitlichen und räumlichen Merkmale von allen unabhängigen Komponenten berechnet, generiert werden. Insgesamt können dann drei Detektoren je nach Artefakttyp generiert werden. Für die jeweiligen Merkmale wird ein Schwellwert, der zur Trennung zwischen Artefakten und Kein-Artefakten dient, auf Basis der gesamten Menge der unabhängigen Komponenten geschätzt. Dafür wird die Expectation-Maximization-Methode zur Generierung des automatischen Schwellwerts angewendet. Wenn die Artefakt-spezifischen räumlichen und zeitlichen Merkmale größer als der Schwellwert sind, werden die unabhängigen Komponenten als Artefaktkanäle klassifiziert [62].

**2) *Korrelation*:** Zur Identifizierung der Augenartefakte benötigt die Methode *Korrelation* physikalische Referenzkanäle, (z. B. einen horizontalen oder ein vertikalen EOG-Kanal), die eine Ähnlichkeit von Artefakten enthalten. In diesem Fall werden die unabhängige Komponente, die die höchste Korrelation mit dem physikalischen Referenzkanal haben, als Artefaktkanal (Pseudokanal) ausgewählt.

## FEHLERVERARBEITUNG

Im EEG wird ein error-related potential (ErrP) evoziert, wenn man Fehler erkennt. Es gibt vier Typen des ErrP: 1) Response ErrP [13, 20], 2) Feedback ErrP [61, 64], 3) Interaction ErrP [16, 17] und 4) Observation ErrP [90]. Ein Response ErrP wird evoziert, wenn man selbst einen Fehler macht. Wenn man Fehler durch das Feedback, das auf einen Fehler hinweist, erkennt, wird ein Feedback ErrP evoziert. Wenn man Fehler nicht durch ein explizit dargestelltes Feedback sondern durch die Interaktion zwischen Mensch (z. B. Benutzer) und Maschine (z. B. System, Roboter, usw.) erkennt, wird ein Interaction ErrP evoziert. Wenn man einen Fehler einer anderen Person oder eines externen Systems beobachtet, wird ein Observation ErrP im EEG des Beobachters evoziert.

ErrP wurde als Verifizierungszweck aber auch als Korrektur der Fehler bei einem System selbst verwendet.

Bei BCI-Anwendungen wurde das Interaction ErrP [16, 17] oft verwendet, um Schnittstellenfehler zu korrigieren. Schnittstellenfehler treten auf, wenn die Schnittstelle die Intention des Benutzers falsch erkennt bzw. klassifiziert. In diesem Fall sendet die Schnittstelle einen falschen Befehl an ein externes System. Wenn der Benutzer einen solchen Schnittstellenfehler erkennt, wird das Interaction ErrP im EEG des Benutzers evoziert.

Ein andere Art des ErrPs, das für Roboteranwendungen relevant, ist Observation ErrP [90]. Fehler eines externen Systems können durch das Erkennen des Observation ErrP, das durch das Beobachten des Fehlers des externen Systems (z. B. Roboter) evoziert wird, korrigiert werden.

## EEG-ANALYSE MITTELS MASCHINELLER LERNVERFAHREN

Es gibt zwei grundlegende, verschiedene Ansätze, die bei BCIs eingesetzt werden:

- Operator Konditionierung bzw. Biofeedback: Der Proband lernt, durch willkürliche Modifikation bestimmter Muster seines EEGs das BCI-System zu instrumentalisieren. Die Entwicklung der Fähigkeiten zur Kontrolle dauert hierbei vergleichsweise lang [5].

- **Detektion mentaler Zustände:** Das BCI-System lernt, mentale Zustände des Probanden zu erkennen und voneinander zu unterscheiden. Ein Beispiel für ein solches System ist in [6] vorgestellt.

Diese beiden Ansätze schließen sich nicht grundsätzlich aus, sondern können miteinander kombiniert werden. Die meisten der aktuellen BCIs verfolgen den zweiten dieser beiden Ansätze. Damit das BCI-System lernen kann, spezifische Muster in den EEG-Daten zu erkennen, werden hierbei maschinelle Lernverfahren in Verbindung mit Methoden zur Datenvorverarbeitung eingesetzt.

Im Rahmen der Datenvorverarbeitung werden eine Reihe von verschiedenen Verarbeitungsschritten durchgeführt, beispielsweise Normalisierung, Frequenz-Filterung, Trend-Bereinigung und Glättung, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern und Störgrößen zu minimieren. Darüber hinaus werden räumliche Filter eingesetzt, um die Anzahl der EEG-Kanäle zu reduzieren und überlagernde Signale zu trennen. Ein Überblick über die in BCIs eingesetzten Methoden zur Signalverarbeitung ist in [2] gegeben.

Einen zentralen Punkt stellt die Klassifikation der Signale dar. Hierbei lernt das BR-System mittels überwachter maschineller Lernverfahren, Muster im EEG zu erkennen und voneinander zu unterscheiden. Auf die zur Klassifikation verwendeten Methoden wird in einem folgenden Abschnitt genauer eingegangen.

## **EMG-ANALYSE MITTELS VERFAHREN AUS DER SIGNALVERARBEITUNG**

Die Messung von Muskelaktivität mittels Elektromyographie (EMG) weist eine starke Korrelation mit ausgeführten Bewegungen der jeweiligen Extremität auf. Die Verwendung von EMG ist daher sehr weitreichend, angefangen von der Bestimmung von Bewegungsanfängen einer Extremität, über die Analyse von Ermüdung der Muskulatur bis hin zu der Ansteuerung von Orthesen- und Prothesen-Systemen.

In der Vorverarbeitung der Signale werden zunächst Merkmale mit Verfahren aus der digitalen Signalverarbeitung extrahiert. Diese lassen sich grob in Frequenz- und Zeitmerkmale unterteilen. In der Kategorie der Frequenzmerkmale kommen häufig Wavelets und Frequenzspektren [71] zum Einsatz, für die Zeitmerkmale hingegen der quadratische Mittelwert (RMS), der Absolute Mittelwert (AMV) sowie die Varianz (VAR) [14, 89].

Eine Veränderung in dem gemessenen EMG lässt sich bereits kurz vor dem Beginn einer Bewegung detektieren dieses Phänomen wird als “electromechanical delay” (EMD) bezeichnet [97, 9]. Somit kann durch eine hinreichend schnelle Analyse des Signals eine Bewegungsvorhersage mittels EMG erfolgen. Für die Detektion der Signalveränderungen kommen häufig Schwellwerte zum Einsatz [31, 8]. Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens hingegen kommen bei der Analyse des Signals zum Ansteuern von Orthesen- bzw. Prothesensystemen zum Einsatz [73, 78].

## **KLASSIFIKATOREN**

Ein wichtiger Bestandteil vieler moderner BCIs ist die Anpassung des Systems an den Probanden mittels Methoden des Maschinellen Lernens. Hierzu benötigt man eine Trainingssitzung, in welcher der Nutzer je nach späterem Anwendungsszenario bestimmte Aufgaben erledigt. Während der Trainingssitzung wird sein EEG aufgenommen um einen Satz an Trainingsdaten zu erhalten. Mittels der Trainingsdaten werden dann im Folgenden die Parameter der Signalverarbeitung angepasst und ein Klassifikator konstruiert, der die verschiedenen Situationen (zum Beispiel bestimmte Bewegungsvorstellungen) für die anschließende Anwendung basierend auf den EEG-Daten unterscheiden soll.

Im BCI-Bereich wird hierfür eine Reihe von Klassifikatoren verwendet. Ein allgemeiner Überblick und Leistungsvergleich über die Klassifikatoren, die für BCIs verwendet werden, ist in [57] aufgeführt. Am weitesten verbreitet sind die Lineare Diskriminanzanalyse (LDA) [63, 96, 56] und die Support Vector Machine (SVM) [88, 34, 1], die ggf. abgewandelt werden zu Bayes'sche LDA [32], adaptierende LDA [91] bzw. Fuzzy SVM [70]. Des Weiteren findet die k-Nächste-Nachbarn-Klassifikation Anwendung [94, 74] und auch Arbeiten, die auf Kalman-Filter [95] und künstlichen Neuronalen Netzen [29] basieren, existieren. Alle verwendeten Klassifikatoren sind klassische maschinelle Lernverfahren - Untersuchungen, die sich speziell an die Eigenheiten des EEGs anpassen, befinden sich noch in den Anfängen.

## **ADAPTIVITÄT**

Durch die Verwendung maschineller Lernverfahren lernt das BCI- bzw. BR-System sich, wie schon beschrieben, an den jeweiligen Probanden anzupassen. Eine einzelne Trainingssitzung genügt hierbei jedoch nicht immer, denn es kann beispielsweise Unterschiede zwischen der

Trainingssitzung und der Online-Sitzung geben, weil sich beispielsweise im Aufbau des Experiments kleine Änderungen ergeben oder im Verhalten des Probanden, wenn ein Feedback gegeben wird. Außerdem können sich die für die Klassifikation relevanten Eigenschaften des EEG auch während einer Sitzung ändern, bedingt zum Beispiel durch zunehmende Müdigkeit, Aufregung, Frustration oder Lernprozesse des Probanden. Dieses Problem wird als Nichtstationarität der EEG-Daten bezeichnet. Es gibt zwei Wege, mit der Nichtstationarität des EEG-Signals umzugehen: Zum einen werden Methoden entwickelt, die robust gegen die Nichtstationarität sind, zum anderen Signalverarbeitungsmethoden, welche sich laufend an die nichtstationären Veränderungen der Daten anpassen.

Ein Unterschied zwischen Trainingssitzung und Online-Sitzung wird erstmals in [77] neurowissenschaftlich begründet. In dem dort vorgestellten Experiment werden Unterschiede in den statistischen Verteilungen der gewählten Features gezeigt und es werden drei verschiedene Methoden für eine adaptive Klassifikation verglichen. Bei der ersten Methode wird der Klassifikator mit jedem hinzukommenden Datensatz aus der Online-Sitzung aktualisiert, sodass er möglichst gut auf diesen neuen Daten arbeitet. In der zweiten Methode wird der verwendete LDA-Klassifikator auf den Online-Daten neu trainiert. Als dritter Weg werden sowohl die Common Spatial Pattern (CSP)-Transformation als auch der Klassifikator komplett neu berechnet, wodurch die Daten aus der Trainingssitzung nicht benötigt werden. Zudem wird zusätzlich die Wahl der verwendeten Trainingsbeispiele variiert. In [77] wird allerdings auch darauf hingewiesen, dass Methoden zur Adaptivität auf Grund der Unterschiede in den zugrunde liegenden Modellen schwer übertragbar sind. So benötigen andere Klassifikatoren dementsprechend andere Anpassungen der Parameter und auch die Unterschiede in den jeweils durchgeführten Experimenten haben einen Einfluss auf die Übertragbarkeit.

Eine Möglichkeit die Nichtstationarität der EEG-Daten bei der Klassifizierung zu berücksichtigen ist das Training des Klassifikators auf der Single-Trial-Ebene. Dadurch lernt dieser anhand von Trainingsbeispielen, welche bereits die Nichtstationarität beinhalten. Die meisten der üblichen Klassifikatoren gehen jedoch von stationären Verteilungen aus und erkennen somit die Nichtstationarität in den Daten nicht.

In [91] bzw. [95] erfolgen Erweiterungen der LDA bzw. des Kalman-Filters, sodass diese Methoden eine adaptive Klassifikation ermöglichen, indem sie die Parameter des Klassifikators kontinuierlich an die neuen Daten anpassen. Wurden mit einem Probanden schon mehrere BCI-Sitzungen durchgeführt, kann aus bereits vorhandenen CSPs, ein für die aktuelle Sitzung passender CSP bestimmt werden [7], um die Trainingszeit zu verkürzen. In [91] wird dies mit einer Anpassung des Klassifikators kombiniert.

Eine besondere Form der Nichtstationarität der EEG-Daten ist die Adaption des Probanden an das System. Wie beschrieben, benutzen klassische BCI-Systeme das Prinzip des Biofeedbacks: Hierbei passt sich die Hirnaktivität des Probanden an die Anforderungen des BCIs an. Die Systeme, welche auf maschinellem Lernen basieren, passen sich hingegen dem Probanden an. Allerdings lässt sich auch hier aufgrund des direkt gegebenen Feedbacks nicht verhindern, dass der Proband, bzw. dessen Hirnaktivität, sich wiederum dem System anpasst. Diese Anpassungen verändern demnach das Signal und erfordern daher eine weitere Anpassung des Systems. Um die Fehler des BCI-Systems zu korrigieren, versuchen neue BCIs zusätzlich das zuvor erwähnte ErrP zu detektieren, welches auftritt, wenn das BCI-System das gemessene Hirnsignal falsch klassifiziert und daher eine nicht erwartete Reaktion gezeigt hat [18] (Details siehe AP2300). Im Falle von BR liegt hingegen nur ein indirektes Feedback vor, sodass die Anpassung des Probanden, und damit eine gravierende Änderung bestimmter Prozesse bei der Gedankenverarbeitung, weitestgehend ausgeschlossen werden kann.

Nichtsdestotrotz ist es erstrebenswert die Anzahl der Trainingssitzungen möglichst gering und deren Dauer kurz zu halten, so dass im besten Fall vor den jeweiligen Anwendungen nach mehreren Vorexperimenten keine zusätzliche Trainingssitzung mehr benötigt werden, wie es in [45] erfolgreich umgesetzt wurde.

### 1.5.1 Eigene Vorarbeiten

Die Kompetenzen des Vorhabenpartners Universität Bremen liegen im Wesentlichen im Bereich der wissenschaftlichen Grundlagenforschung. Im Zusammenhang mit dem Vorhaben IMMI sind daher die Aufgaben des Vorhabenpartners Universität Bremen hauptsächlich in den für das Vorhaben wichtigen Grundlagenforschungsbereichen in den Gebieten Maschinelles Lernen und Gewinnung und Nutzung neuro-wissenschaftlicher Erkenntnisse anzusiedeln. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Realisierung von Versuchsaufbauten, etwa in Form von virtuellen Szenarien und die Entwicklung neuer Methoden zur Analyse hochkomplexer EEG-Daten zur Gewinnung von Einsicht in den mentalen Zustand eines Probanden.

Mit den Frameworks *Data Processing for adaptive Brain-Reading Interfaces (aBRI-DP)* und *Benchmarking On Rails (BOR)* hat die AG Robotik bereits erste Frameworks zur Signalverarbeitung und Klassifikation (aBRI-DP) und zur systematischen Analyse (BOR) entwickelt. Sie stellen sehr wichtige Vorarbeiten für IMMI dar. Die Erfahrung der Mitarbeiter der AG Robotik auf dem Gebiet des Maschinellen Lernens ist generell eine wichtige Voraussetzung für das Projekt IMMI

gewesen. Außerdem sind in der AG Robotik Wissenschaftler mit starkem Hintergrundwissen im Bereich der Neurowissenschaften tätig.

### **1.5.2 Fachliteratur und verwendete Dokumentationsdienste**

Die verwendete Fachliteratur ist im Literaturverzeichnis angegeben.

## 2 Eingehende Darstellung nach NKBF 98 8.2

### II

Die folgenden Abschnitte beschreiben eingehend die vorgenommenen Arbeiten und Untersuchungen im Vorhaben IMMI sowie deren Ergebnisse.

### 2.1 Verwendung der Zuwendung

#### AP1000 Projekt-Management und technische Koordination

##### 2.1.1 AP1100 Projekt-Management

Im Rahmen des Arbeitspaketes AP1100 hat die Universität Bremen folgende Arbeiten erfolgreich durchgeführt bzw. das DFKI als Koordinator des Projektes im Management unterstützt:

- Einstellung von neuen Mitarbeitern und Ausarbeitung des Kooperationsvertrages mit dem DFKI RIC.
- Unterstützung der Koordination wöchentlicher Meetings mit dem Projektpartnern und Mitarbeitern.
- Erstellung von Fortschrittsberichten, Teilnahme an Progress Meetings und Erstellung und Verteidigung von 5 Ethikanträgen.
- Diskussionsrunden für die Einrichtung von Adaptiven Lernen während des Einsatzes von IMMI wurden mit dem Projektpartner organisiert.

- Auswahl und Einstellung eines neuen Mitarbeiters für AP3000 und AP5000
- Auswahl eines weiteren neuen Mitarbeiters für AP5000 nach Weggangs des ersten.
- Abstimmung von Versuchen zwischen AP2000 und AP5000 und zwischen AP4000 und AP5000.

### 2.1.2 AP1200 Außendarstellung PR

Die Universität Bremen hat sich außerdem erfolgreich an der Außendarstellung des Projektes IMMI beteiligt. Folgende Arbeiten wurden durchgeführt bzw. unterstützt:

- Erstellung und Überarbeitung von Postern zur Darstellung der Projekthalte.
- Vorstellung des Projektes, insbesondere der Machine-Learning- und Framework-Ansätze, vor Vertretern der AG Wittenstein
- Vorstellung der Ansätze in IMMI bezüglich Performance-Metriken auf der Neuroscience Konferenz in Washington.
- Absprache zum Besuch des CAPIO Teams bei Prof. Schönle (Leitender Ärztlicher Direktor MATERNUS-Kliniken AG, Facharzt für Neurologie und Psychiatrie, Facharzt für Physikalische und Rehabilitative Medizin, Sozialmedizin, Rehabilitationswesen und Klinische Geriatrie) zur Vorstellung der in IMMI entwickelten EMG Bewegungsdetektion, die in IMMI und in CAPIO zur Steuerung einer Orthese genutzt wird.
- Demonstration des Anwendungsszenario zur Unterstützung von Multi-Roboter Kontrolle für Dr. Ingo Nee und Jens Nie von der Firma Rossen Technology and Research Center GmbH, in 49811 Lingen.
- Vorstellung von Ergebnissen aus IMMI auf der TAR 2013 in Berlin, auf der Biosignal Konferenz 2013 in Barcelona.
- Vorstellung von Ergebnissen auf der BioMed 2013 in Innsbruck und der BASP 2013 in Villars-sur-Ollon.

- Vorstellung von Ergebnissen aus IMMI auf der DATE-2013 in Grenoble, EUSIPCO -2013 in Marrakesh, der NEUROTECHNIX-2013 (Auszeichnung für die beste Einreichung) in Vilamoura, der SMC in Manchester und MLSP-2013 in Southampton.
- Vorstellung des Projektes IMMI, speziell des Signalverarbeitungs- und Klassifikationsframeworks „pySPACE“ beim 1. passive BCI Community Meeting in Delmenhorst, Deutschland.
- Vorstellung von Ergebnissen auf der 11. Internationalen Konferenz „ Biomedical Engineering“ (BioMed-14), 23.6.-25.6.2014, Zürich.
- Vorstellung des Signalverarbeitungs- und Klassifikationsframeworks „pySPACE“ auf der PyData in Berlin.
- Vorstellung von Ergebnissen in IMMI auf der Neurotechnix 2014 in Rom, Italien; Vorstellung von pySPACE auf der PyData in Berlin, Deutschland; Vorstellung von pySPACE auf dem 1. Passive BCI Community Meeting in Delmenhorst, Deutschland.
- Vorstellung des Softwareframeworks pySPACE bei der Arbeitsgruppe Prof. Debener an der Carl von Ossietzky Universität in Oldenburg.

### 2.1.3 AP1300 Kooperation und Datenverwaltung

Die Universität Bremen war im Arbeitspaket vor allem unterstützend tätig. Einige Versuchsaufbauten und insbesondere die finalen Anwendungsszenarien wurde jedoch hauptsächlich von der Universität Bremen aufgebaut. Arbeiten waren:

- Die Koordination und der Aufbau der Laborräume und Einrichtung (koordiniert durch den Partner DFKI RIC) wurde unterstützt.
- Eingerichtete Laborrechner wurden getestet und ein Konzept zur Nutzung der Labore erstellt.
- Optimierung der Datenbeschreibung.

- Versuchsaufbau zum Bewegungstracking in der Schirmkabine, Testmessungen mit einem Elektrodenpositionsbestimmungssystem durch ANT (ANT BV (Advanced Neuro Technology), 7521 PT Enschede Netherlands).
- Optimierung und Test des gelieferten Elektrodenpositionsbestimmungssystems.
- Kooperation mit der IFAM zum Test von Trockenelektroden für EKG und EMG Messungen.
- Unterstützung der Organisation der Kooperation mit dem Projekt CAPIO.
- Gemeinsame Skizze mit STILL (Kontakt: Volker Viereck, Vorentwicklung / Advanced Development (EVE), STILL GmbH, Berzeliusstraße 10, 22113 Hamburg) für ein Verbundprojekt. Die Skizze baut inhaltlich auf Ergebnissen aus IMMI auf (MMI für Multi-Roboter-Kontrolle für Industrie-Serviceroboter) und wurde beim BMBF eingereicht. Die Skizze wurde leider nicht angenommen.
- Unterstützung des Partners DFKI RIC bei der Aufzeichnung von Biosignaldaten von Patienten in der Maternusklinik.
- Unterstützung des Partners DFKI RIC bei der Aufzeichnung von neuen Daten im IMMI Anwendungsszenario.
- Unterstützung des Partners DFKI RIC bei der Aufzeichnung von weiteren Daten im IMMI Anwendungsszenario und bei der Aufzeichnung von Daten mit dem miniaturisierten EEG-System.

#### 2.1.4 AP1400 Koordination von Veröffentlichungen

Gemeinsame Veröffentlichungen mit dem Projektpartner wurden primär von dem Projektpartner organisiert. Die Universität Bremen war an einigen Veröffentlichungen beteiligt. Im Folgenden ist ein Auszug aus den Arbeiten im AP1400 dargestellt:

- Beitrag zu einer Veröffentlichung in IEEE SMC.
- Veröffentlichung für SSP wurde eingereicht und überarbeitet.

- Veröffentlichungen zu DAGM und GfKI wurden koordiniert.
- Poster-Kurzbeiträge für ECVP2011 wurden eingereicht; alle wurden akzeptiert.
- Poster-Kurzbeitrag zur Neuroscience Konferenz wurde eingereicht und wurde als Vortrag im Rahmen eines Nanosymposiums akzeptiert.
- Analyse von möglichen Konferenzen für die Einreichung methodischer Arbeiten zur Elektrodenreduktion.
- Koordination einer Veröffentlichung bei der Human Brain Mapping Konferenz in Peking, China.
- Koordination der Neueinreichung eines Papers zur ICANN 2012.
- Koordination der Einreichung einer gemeinsamen Veröffentlichung mit dem Projekt CAPIO in einem Journal.

Insgesamt wurden im Rahmen von IMMI eine Reihe von Publikationen auf Konferenzen, Workshops und in Buchkapiteln koordiniert und erfolgreich veröffentlicht, wie der Abbildung 2.1 zu entnehmen ist. Eine Liste von allen aus IMMI veröffentlichten Arbeiten ist dem Bericht beigelegt. Zusammengefasst wurden pro Jahr folgende Publikationen erfolgreich veröffentlicht:

- 2015: 3 Journal, 3 Konferenzen, 1 Dissertation, 2 Buchkapitel, 1 Nomination für den GI-Dissertationspreis 2014
- 2014: 5 Journal, 10 Konferenzen, 1 Dissertation, 1 Best Paper Award (PHYCS-14)
- 2013: 6 Journal, 19 Konferenzen (davon 1 Best Paper Award auf der NEUROTECHNIX-2013)
- 2012: 1 Journal, 8 Konferenzen
- 2011: 0 Journal, 5 Konferenzen

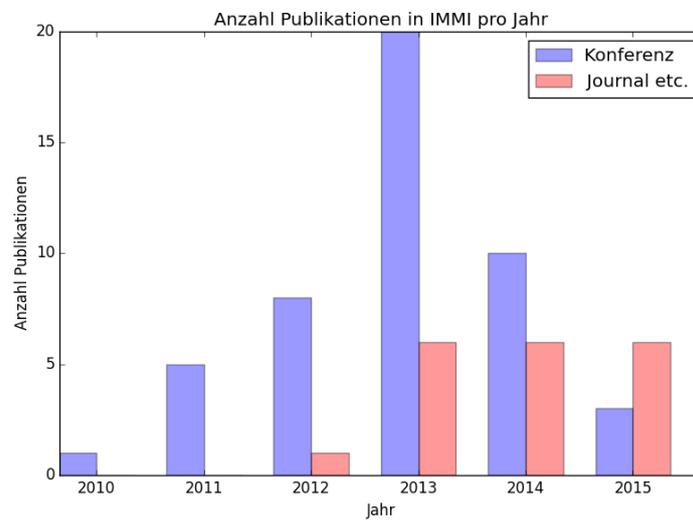


Abbildung 2.1 Quantitative Darstellung der Publikationen aus IMMI

## AP2000 Neurobiologische Untersuchungen

### 2.1.5 AP2100 Konzeptentwicklung

Die Konzeptentwicklung umfasste die Entwicklung des experimentellen Designs, die Konzipierung des experimentellen Szenarios, die Planung des Experiments und das Auswertungskonzept für die einzelnen Studien, die in den weiter folgenden Arbeitspaketen (AP2200/AP2300/AP2400) durchgeführt wurden. Es dient als Grundlage für die Ethikanträge für die einzelnen Studien, die in AP2200, AP2300 und AP2400 geschrieben wurden. An den Arbeiten in diesem AP waren beide Partner AG Robotik und das DFKI RIC gemeinsam beteiligt. In diesem Bericht werden nur die Arbeiten der AG Robotik beschrieben.

**KONZEPT ZUR UNTERSUCHUNG DER WAHRNEHMUNG IN AP2200:** Ziel der Untersuchung war es, den mentalen Zustand sowie die Zustandsänderung eines Operators bei der parallelen Ausführung mehrerer Aufgaben unter Nutzung von EEG-Daten zu untersuchen. Für die Erfüllung mehrerer Aufgaben sind drei Prozesse notwendig: 1) Erfolgreiche Evaluierung wichtiger Informationen, 2) Effiziente Strategie zur Aufmerksamkeitsverteilung und 3) Zeitlich optimale Planung der Bewegung des Operators notwendig.

Dafür sind drei Arten des Wissens relevant: 1) Das Wissen darüber, ob der Operator die wichtigen Informationen erkannt hat oder nicht; 2) Das Wissen darüber, wie die Aufmerksamkeitsausrichtung des Operators, je nach seiner Einschätzung der Wichtigkeit der Information in der aktuellen Situation (z. B. sehr wichtig oder weniger wichtig) variiert; 3) Das Wissen darüber, wie verschieden der Operator je nach Einschätzung der Dringlichkeit seine Handlung plant. Diese Art der Bewegungsplanung wird durch Hinweise (Stimuli) getriggert und unterscheidet sich von der intentionsbasierten Bewegungsplanung (siehe Abschlussbericht in AP2200 des Projektpartners DFKI RIC und in AP2400).

Es wurde geplant, das im Vorläuferprojekt VI-Bot entwickelte Szenario zu dieser Untersuchung zu nutzen. Innerhalb dieses Szenarios sollte ein Proband zwei Aufgaben parallel ausführen. Als Kontrolle sollte der Operator nur eine Aufgabe ausführen. Dabei sollten dann EEG des Probanden aufgenommen werden.

**KONZEPT ZUR EVALUATION DER METHODEN ZUR AUTOMATISCHEN ARTEFAKTKORREKTUR IN AP2200:** EEG-Daten enthalten nicht nur Gehirnaktivität sondern auch Aktivitäten von Augenbewegungen. Um die Aktivitäten von Augenbewegungen (Augenartefakten) zu korrigieren, ist eine Entwicklung der Methoden, die ermöglichen, Augenartefakte automatisch zu korrigieren, notwendig. Ziel dieser Untersuchung war es, Methoden zur Korrektur der Augenartefakte zu implementieren. Zur Methodenimplementierung wurde sich in vier bereits vorhandene Methoden eingearbeitet, zwei Methoden auf Basis von Regression und zwei Methoden auf Basis von Unabhängigkeitsanalyse: 1) Regression und 2) gefilterte Regression, 3) Infomax und 4) SOBI. Es wurde weiter konzipiert, zwei Methoden auf Basis von Unabhängigkeitsanalyse (Infomax und SOBI) mit zwei weiteren Methoden zur Identifizierung der Augenartefakte zu kombinieren: 1) Adjust und 2) Korrelation. Aus diesen Kombinationen ergeben sich dann sechs Methoden, die implementiert werden könnten: 1) Regression, 2) Gefilterte Regression, 3) Infomax mit Adjust-Verfahren, 4) Infomax mit Korrelationsverfahren, 5) SOBI mit Adjust-Verfahren und 6) SOBI mit Korrelationsverfahren.

**KONZEPT ZUR UNTERSUCHUNG DES ErrP IN AP2300:** Ziel der Untersuchung war es, unterschiedliche ErrP-Typen zu detektieren. Dafür sollten unterschiedliche experimentelle Szenarien entwickelt werden, um drei unterschiedlichen Typen von ErrPs (*interaction ErrP*, *Observation ErrP*, *Feedback ErrP*) zu generieren. Der Projektpartner DFKI RIC beschäftigte sich mit der Entwicklung eines Szenarios zur Detektion des *Interaction ErrPs* und *Observation ErrPs*. Ein weiteres Ziel war es, die Anwendbarkeit der untersuchten Gehirnaktivitäten beim entwickelten Mensch-Maschine-Interface (MMI) zu untersuchen. Zum Schluss sollte die funktionelle und effektive Zusammenhänge zwischen den Gehirngebiete während der Fehlerverarbeitung untersucht werden.

**KONZEPT ZUR ONLINE-BEWEGUNGSDETEKTION AUF BASIS VON EMG IN AP2400:** Ziel der Untersuchung war es, unter Nutzung von EMG den Beginn einer Bewegung online zu detektieren. Dafür sollte das *Armbewegungsszenario* (siehe Abschlussbericht in AP2200 des Projektpartners DFKI RIC) verwendet werden. Innerhalb des Armbewegungsszenarios sollte dann der Beginn der intentionsbasierten Bewegung bei drei unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten unter Nutzung von EMG online detektiert werden. Zur Methodenimplementierung wurde sich in drei bereits vorhandene Methoden eingearbeitet: 1) Teager-Kaiser-Energie Operator (TKEO), 2) Standardabweichungsmethode und 3) Varianz-Methode.

## 2.1.6 AP2200 Wahrnehmung und Bewegung

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, Gehirnaktivitäten während der Wahrnehmung der wichtigen Information zu untersuchen. Ein weiteres Ziel war es, herauszufinden, ob sich der mentale Zustand während der Ausführung einer Aufgabe differenzieren lässt. Zu diesen Untersuchungen wurden sowohl EKP- als auch ML-Analyse verwendet. Außerdem wurden die Methoden zur Korrektur der Augenartefakten implementiert, um die Aktivitäten von Augenbewegungen (Augenartefakten) zu korrigieren. Es folgte eine gemeinsame Diskussion und Publikation der Ergebnisse mit dem DFKI RIC.

**UNTERSUCHUNG DER WAHRNEHMUNG:** Ziel der Untersuchung war es, den mentalen Zustand sowie die Zustandsänderung eines Operators bei der parallelen Ausführung multipler Aufgaben unter Nutzung von EEG zu untersuchen. Zu dieser Untersuchung wurde das im Vorläuferprojekt VI-Bot entwickelte Szenario verwendet. Innerhalb dieses Szenarios hat ein Proband entweder eine Aufgabe oder zwei Aufgaben parallel ausgeführt: 1) Einfacher Task und 2) Dualer Task. Dabei wurde EEG des Probanden aufgenommen.

Beim einfachen Task sollte der Proband nur eine Aufgabe, genannt einen *Oddball Task* ausführen. Drei Arten der Information wurden auf einem Monitor präsentiert: 1) Selten auftretende Information, die eine Reaktion des Probanden verlangt, d. h., *task-relevante Information* (Target-Stimulus); 2) Selten auftretende Information, die keine Reaktion des Probanden verlangt (Deviant-Stimulus); 3) Nicht-selten auftretende Information, die keine Reaktion des Probanden verlangt (Standard-Stimulus). Beim Dualen Task sollte der Proband ein *Brio Labyrinth* spielen und während dieses Spiels den *Oddball Task* ausführen.

Die Analyse der mittleren Amplituden des EKPs zeigte, dass eine breitere Positivität an den parietalen Elektroden (z. B. Pz) durch die Erkennung der selten auftretenden Informationen (Target- und Deviant-Stimuli) evoziert wurde. Jedoch war die gemittelte Amplitude des positiven ereigniskorrelierten Potential (EKP)s signifikant stärker während der Erkennung der Target-Stimuli im Vergleich zur Erkennung der Deviant-Stimuli. Dieser Befund wurde unter beiden Bedingungen (einfacher/multipler Task) beobachtet, jedoch gilt dies nur für das frühere Zeitfenster (400–600 ms). Im späteren Zeitfenster (600–800 ms) zeigte sich ein Unterschied zwischen dem einfachen und dualen Task: die gemittelte Amplitude des positiven ereigniskorreliertes Potential (EKP)s war stärker bei der Erkennung der Target-Stimuli im Vergleich zur Erkennung der Deviant-Stimuli. Diese Ergebnisse deuten an, dass ein task-relevantes positives

EKP nur beim dualen Task ausgelöst wird, aber nicht beim einfachen Task. Wir nehmen an, dass das task-relevante positive EKP mit dem Prozess, der zur Ausführung des dualen Tasks zusätzlich benötigt wird, involviert ist (z. B. Wechsel zwischen zwei Aufgaben) [42].

Die Analyse des maschinellen Lernverfahrens (ML) zeigte, dass die Erkennung der selten auftretenden Information (Target- und Deviant-Stimuli) mit einer hohen Genauigkeit detektiert werden konnte. Jedoch war die Klassifikationsgüte bei der Detektion der Target-Stimuli (BA von 0.95) signifikant besser im Vergleich zur Detektion der Deviant-Stimuli (BA von 0.75). Diese ML-Ergebnisse bestätigen EKP-Ergebnisse. Weiterhin zeigte die ML-Analyse, dass es einen Unterschied zwischen dem einfachen und dualen Task gab, wenn zwei parietale Elektroden (CPz/Pz) zur Merkmalsextrahierung genutzt werden. Dieser Unterschied wurde bei der Detektion der Target-Stimuli beobachtet, jedoch nicht bei der Detektion der Deviant-Stimuli. Wir nehmen an, dass das task-relevante positive EKP mit dem Prozess, der zur Ausführung des dualen Tasks zusätzlich benötigt wird, involviert ist. Diese ML-Ergebnisse bestätigen ebenfalls die EKP-Ergebnisse. Ein Manuskript über die EKP- und ML-Ergebnisse wurde für eine Publikation in einer internationalen Zeitschrift *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation* verfasst [43].

**METHODENIMPLEMENTIERUNG ZUR KORREKTUR DER AUGENARTEFAKTE:** EEG-Daten enthalten nicht nur Gehirnaktivität sondern auch Aktivitäten von Augenbewegungen. Um die Aktivitäten von Augenbewegungen (Augenartefakten) zu korrigieren, ist eine Entwicklung von Methoden, die es ermöglichen, Augenartefakte automatisch zu korrigieren, notwendig. Ziel dieser Untersuchung war es, Methoden zur Korrektur der Augenartefakte zu implementieren.

Zur Methodenimplementierung wurden vier bereits vorhandene Methoden verwendet, zwei Methoden auf Basis von Regression und zwei Methoden auf Basis von Unabhängigkeitsanalyse: 1) Regression; 2) gefilterte Regression; 3) Infomax und 4) SOBI. Es wurde weiter konzipiert, zwei Methoden auf Basis von Unabhängigkeitsanalyse (Infomax und SOBI) mit zwei weiteren Methoden zur Identifizierung der Augenartefakte zu kombinieren: 1) Adjust und 2) Korrelation. Aus diesen Kombinationen ergeben sich dann sechs Methoden, die implementiert werden können: 1) Regression, 2) Gefilterte Regression, 3) Infomax mit Adjust-Verfahren, 4) Infomax mit Korrelationsverfahren, 5) SOBI mit Adjust-Verfahren und 6) SOBI mit Korrelationsverfahren.

Zur Evaluation der sechs implementierten Methoden wurden die Datensätze aus dem *Armbewegungsszenario*, das zur Untersuchung der Wahrnehmung in AP2200 entwickelt wurde (siehe Abschlussbericht in AP2200 des Projektpartners DFKI RIC), verwendet. Die beste Klassi-

fikationsgüte wurde mit der Methode *Infomax mit Adjust-Verfahren* erzielt. Danach folgte die Methode *SOBI mit Adjust-Verfahren, gefilterte Regression* und *Regression*. Vor allem zeigte nur die Methode *Infomax mit Adjust-Verfahren* signifikant höhere Klassifikationsgüte im Vergleich zur Anwendung ohne Methoden zur Korrektur der Augenartefakte. Die Ergebnisse wurden in der internationalen Zeitschrift *Journal of Neuroscience Methods* publiziert [24].

### 2.1.7 AP2300 Fehlerverarbeitung

Ziel der Untersuchung war es, unterschiedliche ErrP-Typen zu detektieren. Ein weiteres Ziel war es, die Anwendbarkeit der untersuchten Gehirnaktivitäten beim entwickelten MMI zu untersuchen. Zum Schluss sollten die funktionellen und effektiven Zusammenhänge zwischen den Gehirngebieten während der Fehlerverarbeitung untersucht werden. Es folgte eine gemeinsame Diskussion und Publikation der Ergebnisse mit dem DFKI RIC.

**UNTERSUCHUNG ZU UNTERSCHIEDLICHEN TYPEN VON ERRORPOTENTIALEN:** Ziel der Untersuchung war es, unterschiedliche ErrP-Typen zu detektieren. Dafür wurde ein Szenario entwickelt. Innerhalb dieses Szenarios konnten zwei unterschiedlichen Aufgaben ausgeführt werden. Je nach Aufgabe konnten zwei unterschiedlichen ErrP-Typen evoziert werden: 1) *Interaction ErrPs* und 2) *Observation ErrPs*.

Bei beiden Aufgaben sollte ein Cursor nach links, rechts, oben und unten gesteuert werden, um ein bestimmtes Zielobjekt zu erreichen. In der ersten Aufgabe steuerte ein Proband den Cursor (*Interaction Task*), wohingegen in der zweiten Aufgabe der Proband die Aktion eines Agenten, der den Cursor steuert, beobachtete (*Observation Task*). In den beiden Aufgaben wurden falsche Bewegungen des Cursors mit einer Wahrscheinlichkeit von 9 % simuliert. In diesen Fällen entsprach die vom Probanden gewählten Cursorbewegung nicht der tatsächlich ausgeführte Cursorbewegung. Die Erkennung solcher Fehler evozierte ein *Interaction ErrP*. Dagegen wurde ein *Observation ErrP* evoziert, wenn der Proband Fehler des Agenten beobachtete.

Acht Probanden haben an dieser Studie teilgenommen und sieben EEG-Datensätze wurden für den jeweiligen Proband und jeweiligen Aufgaben aufgenommen.

Die Analyse des maschinellen Lernverfahrens zeigte eine hohe Performanz bei der Detektion

der beiden ErrP-Typen: BA von 0,81 und 0,80 über alle Probanden für den jeweiligen ErrP-Typ. Weiterhin wurde analysiert, ob es einen Unterschied in der Klassifikationsgüte gibt, je nach Wahl des Zeitfenster, das zum Extrahieren der Merkmale verwendet wird. Hier wurde entweder das frühere oder spätere Zeitfenster zum Trainieren und Testen eines Klassifikators verwendet. Die Performanz bei der Detektion des *Interaction ErrPs* unterschied sich nicht zwischen dem früheren und späteren Zeitfenster, aber bei der Detektion des *Observation ErrPs*.

Ein relevanter Aspekt aus der Sicht der praktischen Anwendung war es, die Kalibrierungszeit zu reduzieren. Da die Kalibrierungszeit beim *Observation Task* deutlich kürzer war als im *Interaction Task*, wurde der Klassifikator, der auf den Daten vom *Observation Task* trainiert wurde, zur Detektion des *Interaction ErrPs* verwendet. Solcher Klassifikatortransfer war erfolgreich (BA von 0,79 über alle Probanden). Somit konnte die Kalibrierungszeit, die zur Detektion des *Interaction ErrPs* benötigt wurde, reduziert werden (8 min auf 2 min). Die Ergebnisse wurden zunächst auf einer internationalen Konferenz *IEEE Systems, Man, and Cybernetics* präsentiert [38] und ein ausführliches Manuskript bei einem internationalen Journal *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, eingereicht [40].

Ein wichtiger Punkt beim Klassifikatortransfer ist das Auswählen der Trainingbeispiele. Die Annahme war, dass der Klassifikatortransfer zwischen beiden ErrP-Typen möglich ist, wenn beide ErrP-Typen eine gemeinsame oder ähnliche EKP-Form haben. Diese Annahme basierte auf die Analyse der mittleren Amplitude der EKP, die zeigte, dass ein Unterschied in Form der gemittelten EKP-Kurve zwischen beiden ErrP-Typen im späteren Zeitfenster (600–800 ms) beobachtet wurde, aber nicht im früheren Zeitfenster (400–600 ms). Diese Ergebnisse deuten an, dass beide ErrP-Typen eine ähnliche EKP-Form im früheren Zeitfenster hatten, aber nicht im späteren Zeitfenster. Letztlich wurde die Klassifikationsgüte zwischen zwei Fällen verglichen, um die Annahme zu prüfen: die vom früheren Zeitfenster (400–600 ms) extrahierten Merkmale (Fall I) oder die vom späteren Zeitfenster (600–800 ms) extrahierten Merkmale (Fall II) wurde zum Training eines Klassifikators verwendet. Dieser Vergleich zeigte, dass die Klassifikationsgüte beim ersten Fall besser als beim zweiten Fall war. Diese Ergebnisse deuten an, dass das Nutzen der Merkmale aus einem Bereich mit ähnlicher EKP-Form zwischen beiden ErrP-Typen, eine positive Auswirkung auf den Klassifikatortransfer zwischen beiden ErrP-Typen hat. Die Auswahl der Trainingsbeispiele beim Klassifikatortransfer zwischen unterschiedlichen ErrP-Typen basierend auf Signaleigenschaften (z. B. EKP-Form) wurde auf einer internationalen Konferenz, *IEEE EMBS Neural Engineering*, präsentiert [39].

**METHODEN ZUR KONNEKTIVITÄT:** Eine relevante Fragestellung in der Forschung der Fehlerverarbeitung war es, zu untersuchen, wie Gehirngebiete während der Fehlerverarbeitung zusammenarbeiten bzw. verknüpft sind. Zur Untersuchung dieser Frage wurden Methoden implementiert, die es ermöglichen, herauszufinden, wie die Gehirngebiete während der Fehlerverarbeitung *funktionell* aber auch *effektiv* verknüpft sind. Vor allem ermöglichen die effektiven Konnektivitätsmethoden die Richtungen der Verknüpfungen zwischen den Gehirngebiete, d. h., die kausale Zusammenhänge (z. B. Gebiet A → Gebiet B) zu bestimmen. Die implementierten Methoden wurden an ErrP-Daten angewendet. Außerdem wurde eine neue Metrik zur Evaluation der Performanz konzipiert und auf einer internationalen Konferenz *IEEE EMBS Neural Engineering* präsentiert [41].

### 2.1.8 AP2400 Bewegungslokalisierung

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, unter Nutzung des EMGs, den Beginn einer Bewegung online zu detektieren. Dafür wurde das *Armbewegungsszenario*, das zur Untersuchung unterschiedlicher Bewegungsarten in AP2200 entwickelt wurde, verwendet. Innerhalb des Armbewegungsszenarios sollte dann der Beginn der intentionsbasierten Bewegung bei drei unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten unter Nutzung des EMGs online detektiert werden. Zur Methodenimplementierung wurde sich in drei bereits vorhandenen Methoden eingearbeitet: 1) Teager-Kaiser-Energie Operator (TKEO), 2) Standardabweichungsmethode und 3) Varianz-Methode.

Die AG Robotik unterstützte das Erreichen des Ziels durch die Akquise und Analyse von EEG- und EMG-Daten zur Bewegungsplanung und -ausführung. Es erfolgte eine gemeinsame Diskussion und Publikation der Ergebnisse mit dem DFKI RIC.

**ONLINE-BEWEGUNGSDETEKTION AUF BASIS VON EMG** Ziel einer durch die AG Robotik betreuten Masterarbeit war es zu evaluieren, ob Elektromyografie (EMG) genutzt werden kann, um den Beginn einer Bewegung online zu detektieren.

Dafür wurde zunächst der experimentelle Aufbau zum *Armbewegungsszenario* (siehe Abschlussbericht des DFKI RIC in AP2200) umgesetzt. Wichtig dabei war eine möglichst rauschfreie Datenaufnahme für die spätere Methodenentwicklung sowie eine möglichst exakte Markierung des Bewegungsbeginns. Um Rauschen in den Daten zu verhindern, erfolgte der

experimentelle Aufbau in der Schirmkabine. Drei Laborrechner kamen für das Experiment zum Einsatz: ein Videoaufzeichnungsrechner zur Probandenüberwachung durch den Versuchsleiter, ein Rechner um dem Probanden die verschiedenen Paradigmen zu präsentieren und gleichzeitig Ereignisse im EEG zu markieren (Nutzung der Software Presentation) und ein Akquiserechner, der die EEG/EMG-Daten in Verbindung mit den Markierungen aufzeichnet (Nutzung der Software VisionRecorder).

Nach Fertigstellung des experimentellen Aufbaus erfolgten einige Testaufnahmen, mit denen unter anderem überprüft wurde, wie viele Trainingsbeispiele nötig sind, damit neben neurobiologischen Auswertungen auch verschiedene maschinelle Lernverfahren auf den Daten evaluiert werden können. Ergebnis der Analyse war eine Datensatzgröße von 120 Bewegungen (80 zum Training, 40 zur Evaluation). Ebenfalls wurde mit den Testaufnahmen eine formale Berechnung der Fallzahl durchgeführt und anschließend ein Ethikvotum bei der Ethikkommission der Universität Bremen beantragt. Nach erteiltem Ethikvotum erfolgte die Datenaufnahme bei insgesamt acht Probanden. Es wurde EEG mit 128 Elektroden und EMG mit acht bipolaren Kanälen aufgezeichnet.

Drei Methoden zur automatisierten Detektion des EMG-Onsets wurden implementiert, getestet, optimiert und evaluiert: 1) Teager-Kaiser-Energie Operator (TKEO), 2) Standardabweichungsmethode und 3) Varianz-Methode.

Sowohl die Klassifikationsgüte als auch die Vorhersagezeiten der einzelnen Methoden unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Ein Unterschied war lediglich in der Komplexität der Berechnung festzustellen. Bei der Vorverarbeitung des Teager-Kaiser-Energie Operators (TKEO) müssen zwei Filterungen durchgeführt werden, wohingegen die zwei anderen Verfahren auf den ungefilterten Rohdaten arbeiten. Zusammenfassend zeigten die entwickelten Methoden eine gute Performanz, sowohl für die Bewegungsvorhersage als auch für die Bewegungsdetektion. Diese Ergebnisse wurden in einer internationalen Konferenz *Bio-inspired Systems and Signal Processing* vorgestellt [87].

**WEITERE ANALYSEN AUF DEN DATEN DES ARMBEWEGUNGSSZENARIOS:** Drei Untersuchungen wurden mit Hilfe der entwickelten EMG-Detektionsmethode (Varianz) durchgeführt: a) Generelle Nutzbarkeit des EMG-Signals zur Bewegungsvorhersage gegenüber der Nutzung des EEG-Signals, b) Bewegungsvorhersagen mittels EEG, basierend auf verschiedenen Markertypen zum Training des Klassifikators und c) Effektivität einer kombinierten Nutzung von EEG und EMG.

Die Nutzung des EEG-Signals liefert eine bessere Performanz im Vergleich zur Nutzung des EMG-Signals, unabhängig davon ob die Parameter für die EMG-Detektion global, d. h. gemittelt über alle Probanden und Geschwindigkeiten, oder spezifisch für den aktuellen Probanden und die aktuelle Bewegungsgeschwindigkeit optimiert wurden. Eine Ausnahme findet sich bei langsamen Bewegungen, die keinen Unterschied in der Anzahl der richtigen Bewegungsvorhersagen mittels EEG und EMG aufweisen. Eine mögliche Ursache für die schlechtere Performanz mittels EMG liegt in unserer speziellen Anwendungsbedingung, wobei eine Bewegungsvorhersage 50 ms vor dem tatsächlichen Bewegungsanfang erfolgen muss, um an einer Maschine die nötigen Voreinstellungen vorzunehmen. Daher ist die Nutzung des EMG-Signals zur Bewegungsvorhersage nur bedingt für diese Anwendung sinnvoll.

Für die zweite Untersuchung (b) wurden drei unterschiedliche Markertypen verwendet um den Bewegungsbeginn zu markieren: 1) Qualisys-Marker (Motion-Tracking-System), 2) EMG-Marker (globale Optimierung) und 3) EMG-Marker (spezifische Optimierung). Sowohl die Klassifikationsperformanz als auch bei den Vorhersagenzeiten zeigten keinen deutlichen Unterschied. Dies deutet an, dass die Wahl der Trainingsmarker keinen direkten Einfluss auf die Klassifikationsperformanz hat.

Die dritte Untersuchung hatte zum Ziel die Effektivität einer Kombination von EEG und EMG zu analysieren. Erste Versuche zeigten, dass durch Multiplikation der Ausgabe des EEG-Klassifikators mit dem gefiltertem EMG-Signal eine Reduktion von Fehlklassifikationen im EEG erreicht werden kann.

Es ist denkbar, die frühe Bewegungsvorhersage basierend auf EEG zu nutzen, um Voreinstellungen an einer Maschine vorzunehmen, die eigentliche Befehlsausführung aber erst dann zu starten, wenn die Kombination aus EEG- und EMG-Vorhersage anzeigt, dass eine Bewegung ansteht. Ausführlichere Analysen zur Kombination von EEG und EMG wurden vom Projektpartner (AP2200) durchgeführt.

### 2.1.9 AP2500 Gesamtauswertung und Ausblick

Die Fehlerdetektion war erfolgreich durch die Detektion des ErrPs (siehe AP2300). Weitere Verhaltensdaten, z. B. die Daten, die mittels Eyetracking gewonnen werden, können weitere sinnvolle Informationen zur Fehlerdetektion liefern. Ziel dieses Arbeitspaketes war es, zu untersuchen, inwiefern die Kombination der EEG-Daten (z. B. ErrP) und Verhaltensdaten (z. B.

Eyetracking-Daten) die Fehlerdetektion verbessert.

Eine Pilot-Studie wurde konzipiert, um diesen Ansatz zu prüfen. Zwei Probanden haben an dieser Studie teilgenommen und vier EEG-Datensätze sowie Eyetracking-Daten wurden für den jeweilige Proband aufgenommen. Die Eyetracking-Daten wurden mit den EEG-Daten synchronisiert.

Die Analyse des maschinellen Lernverfahrens zeigte, dass die Fehlerdetektion mit der Nutzung der EyeTracking-Daten schlechter im Vergleich zur Nutzung der EEG-Daten (ErrP-Daten) war. Die kombinierte Nutzung beider Datentypen verbesserte die Fehlerdetektion. Jedoch war die Fehlerdetektion mit der kombinierten Nutzung der ErrP-Daten und Eyetracking-Daten nicht signifikant besser im Vergleich zur Nutzung der ErrP-Daten.

Weitere Optimierungen der Verarbeitungskette sind notwendig, um die Analyse der zwei unterschiedlichen Datentypen (physiologische Daten/Verhaltensdaten) effektiv kombiniert zu nutzen. In zukünftigen Vorhaben soll dieser Ansatz bei mehreren Probanden weiter untersucht werden.

## AP3000 Analyse mittels maschineller Lernverfahren

### 2.1.10 AP3100 Testumgebung für BR-Methoden

Als Grundlage dieses Arbeitspaketes dienten die Frameworks aBRI-DP und BOR. Diese wurden im Rahmen des Projektes IMMI sehr stark erweitert und vereint und werden daher im Folgenden nur noch mit dem später verwendeten Namen, Signal Processing and Classification Environment written in Python (pySPACE), bezeichnet.

Zur Verbesserung der Software wurde in diesem Arbeitspaket die Dokumentation maßgeblich überarbeitet, erweitert und vereinheitlicht und ein graphisches Interface umgesetzt. Auch erfolgten zahlreiche Anpassungen, die die Nutzbarkeit der Software im Projekt IMMI erhöhten. Diese Anpassungen betrafen zum Beispiel den Cluster. Es wurde ein Modul implementiert, welches verteiltes Rechnen auf einem Cluster ohne Ressourcenteilung erlaubt (MPI-Backend). Auch wurde pySPACE um das Konzept der Klassifikation erweitert und zahlreiche Klassifikatoren aber auch andere Methoden wurden hinzugefügt.

Zur Auswertung wurden zahlreiche Metriken integriert und darauf aufbauend später ausführlich evaluiert und diskutiert. In der Praxis wird oft zwischen wichtiger und unwichtiger Information unterschieden, wie zum Beispiel auch in IMMI bei der Erkennung von Reaktionen zu seltenen Stimuli (P300) oder zu beobachteten Fehlern (ErrP). Daher ist es entscheidend eine Metrik in der Auswertung zu verwenden, die berücksichtigt, dass ggf. eine Klasse nur wenige Beispiele im Vergleich zur anderen Klasse enthält. Die bisher verwendete Metrik (F-Measure) wurde deshalb verworfen und durch Maße wie Balanced Accuracy (BA) und Area under the Receiver Operating Characteristic (ROC) (AUC) ersetzt, welche besser für ein ungleiches Klassengewicht geeignet sind. Die Ergebnisse wurden zunächst auf einer Konferenz präsentiert [83] und später wesentlich ausführlicher in einem etablierten Journal publiziert [82]. Des Weiteren waren sie auch regelmäßiger Bestandteil von Diskussionen auf besuchten Konferenzen.

Die Erweiterung durch parallelisiertes Rechnen, Klassifikatoren und Metriken konnte auch dazu genutzt werden, ein Parameteroptimierungsmodul zu implementieren, welches daraufhin zu einem wesentlichen Bestandteil aller Auswertungen mit pySPACE wurde.

Die Überarbeitung der Software wurde auch in AP3300 weiter geführt. So ergab sich aus den zahlreichen Verbesserungen der Dokumentation, dass eine Umstrukturierung der Software

notwendig ist. Zusammengenommen führte dies zur Veröffentlichung der Software durch beide Projektpartner [51, 47] und Präsentation auf mehreren Konferenzen [50, 49, 46]. Hierbei wurde auch ein Tutorialvideo erstellt. Auch auf der CeBIT wurde die Software im Jahr 2015 gemeinsam präsentiert.

### 2.1.11 AP3200 Deskriptive Analyse und Visualisierung

In diesem Paket wurden die Untersuchungen des Projektpartners bzgl. der polynomiellen Merkmale und der Nachverarbeitung der Klassifikator-Scores unterstützt und letztendlich zur Publikation gebracht [84, 81]. Auch wurde ein allgemeines abstrakteres Visualisierungskonzept entwickelt und umgesetzt, um die zukünftige Integration von Visualisierungen zu vereinfachen.

Die Analyse zur Elektrodenreduktion wurde durch Implementation und Auswertung verschiedener Auswahlverfahren unterstützt, basierend auf dem Signal-zu-Rausch-Verhältnis oder den Parametern von Verarbeitungsalgorithmen wie verschiedene räumliche Filter (Dimensionsreduktionsverfahren) oder der Support Vector Machine (SVM) als Klassifikator [15]. Des Weiteren wurde ein neuer Klassifikator entwickelt, welcher die Menge an verwendeten Sensoren selbstständig reduziert [47]. Auch wurde analysiert, welcher zeitliche Bereich der Daten für die Klassifikation am wichtigsten ist [44]. Die Ergebnisse waren konsistent mit denen der neurowissenschaftlichen Analyse.

Aufbauend auf den bereits erwähnten Ergebnissen beider Projektpartner und der Verbesserung der Visualisierung konnte ein neues Konzept namens Backtransformation entworfen werden [52, 47]. Dieses fokussiert sich nicht auf einzelne Algorithmen, sondern betrachtet deren Gesamtheit und deren Zusammenspiel. Es kann genutzt werden um darzustellen, welche Bereiche in den Daten bei der Verarbeitung relevant sind. Eine positive Erkenntnis war, dass unsere Klassifikation nicht auf Artefakte wie zum Beispiel Augenbewegung beruht. Im Vergleich zu den neurobiologischen Untersuchungen waren die ausgewählten Bereiche allerdings teilweise unerwartet. Um die Interpretierbarkeit weiter zu erhöhen, wurden erste Arbeiten zur Korrektur der Auswahl mittels Kovarianzmatrizen durchgeführt. Diese Arbeiten könnten im Rahmen eines Folgeprojektes weitergeführt werden.

### 2.1.12 AP3300 Weiterentwicklung der BR-Methodik

In diesem Paket wurde die Forschung des Projektpartners unterstützt [36, 76, 75].

Entscheidend war die Analyse der SVM und verwandter Algorithmen, wie der LDA, der Support Vector Regression (SVR) sowie der Relative Margin Machine (RMM). Hierbei wurde die balanced RMM (BRMM) entwickelt, welche jegliche Ausreißer im Model *im selben Maße* bestraft. Dieser Algorithmus verbessert die RMM maßgeblich und generalisiert die zuvor genannten Klassifikatoren. Außerdem ist er das passende Gegenstück zur SVR: Wendet man diesen Regressionsalgorithmus auf die Zahlenmenge  $-1, 1$  an, so ist der resultierende Klassifikator äquivalent zur BRMM. Eine Auswertung auf EEG-Daten zeigte eine wesentlich erhöhte Klassifikationsgüte, wenn kein räumlicher Filter eingesetzt wurde, ansonsten ist der Algorithmus genauso gut [48] wie andere Ansätze. Insbesondere durch die Anforderungen aus AP5000 wurde auch eine Variante der SVM analysiert, welche nur die Daten einer Klasse nutzt. Durch die Verwendung dieser Variante konnten vergleichbare Ergebnisse erreicht werden. Die Übertragbarkeit der Verarbeitung auf andere Sitzungstage war allerdings wesentlich schlechter [54]. Weiterhin wurde herausgefunden, wie diese Klassifikatorvariante geometrisch mit der SVM zusammenhängt. Dies führte zusammen mit den anderen Erkenntnissen zu einem besseren Verständnis der Stärken und Schwächen der Algorithmen und konnte auch für die Lehre verwendet werden. Ebenfalls wurde ein Algorithmus entwickelt, um die Entscheidungsgrenze abhängig von der gewählten Metrik zu optimieren. Dadurch konnte die Klassifikationsgüte verbessert werden [60]. Im Rahmen einer betreuten Masterarbeit wurde außerdem Bayes'sche Klassifikation untersucht, indem zwei Ansätze aus der Literatur in pySPACE integriert und verglichen wurden. Darüber hinaus wurden zur Erkennung mehrerer Klassen Auswertungsmöglichkeiten in pySPACE integriert und mehrere Möglichkeiten um binäre Klassifikatoren (d. h. Klassifikatoren, die nur für Zwei-Klassenprobleme geeignet sind) dafür nutzen zu können.

Es wurden verschiedene räumliche Filter (Dimensionsreduktionsalgorithmen) verglichen und nachgewiesen, dass vor allem für eine besonders starke Reduktion der Daten der xDAWN-Filter den anderen Algorithmen weit überlegen ist. Da die Berechnung dieses Filters aufwendig ist, wurde für das Online-Lernen eine verbesserte Variante vom Projektpartner (AP3400) entwickelt. Eine andere Möglichkeit dem hohen Rechenaufwand des xDAWN-Filters zu begegnen, ist die Entwicklung eines anderen Algorithmus, dessen Berechnung von Natur aus weniger Aufwand bedarf. Dazu wurde ein räumlicher Filter entwickelt, welcher die Periodizität in einer Signalreihe hervorzuheben versucht. Der *periodic spatial filter* und der *periodic spatio-spectral filter* verbesserten die Klassifikationsgüte für LDA-Klassifikatoren und sind im Gegensatz zum

xDAWN auch für das online Lernen anwendbar [26, 22, 23, 25].

Alternativ zum EEG wurde auch das EMG in Zusammenarbeit mit AP2000 zur Vorhersage von Bewegungen analysiert. Aufgrund der begrenzten Speicherressourcen auf dem finalen mobilen Verarbeitungssystem wurden die beiden entwickelten Methoden für die automatische Detektion des EMG (d. h. Varianz und Standardabweichung) in zwei Hinsichten optimiert: 1) Verringerung des Speicherverbrauchs und 2) Verringerung der Rechenzeit. Dafür wurde eine besonders effiziente Methode zur Varianzberechnung entwickelt [87, 53].

### 2.1.13 AP3400 Adaptive Brain-Reading

Zunächst erstellten beide Projektpartner einen gemeinsamen Plan für eine Datenanalyse und erweiterten das Framework pySPACE um die Möglichkeit adaptive Lernalgorithmen zu integrieren. Danach wurden inkrementelle Versionen für die SVM und ihr verwandte Algorithmen (die Bezüge bzw. Verbindungen wurden im AP3300 entdeckt) implementiert. Diese Art der Algorithmen ist jedoch ineffizient in Bezug auf Speicher und Rechenaufwand, da diese während der Laufzeit unbeschränkt zunehmen. Die Analyse der Verbindungen im Kontext des online passive-aggressive Algorithms (PAA) führte jedoch zur Erkenntnis des Single-Iteration Konzepts [52, 47]. Dieses ist ein generelles Konzept, um SVM-ähnliche Klassifikatoren in Online-Klassifikatoren umzuwandeln. Die Funktionsweise lässt sich im Wesentlichen wie folgt beschreiben: zunächst wird ein Verfahren zur Modellbildung des Klassifikators erzeugt, welches mehrfach über die gesamten Daten iteriert und danach wird dieses zur Aktualisierung nur noch einmalig ausgeführt. Dadurch müssen keine Daten mehr gespeichert werden. Dieser Ansatz beschränkt sich auf linearen Klassifikatoren und es kann nichtsdestotrotz zu einer Reduzierung der Klassifikationsgüte kommen. Wendet man das Konzept auf die lineare SVM an, so konnte nachgewiesen werden, dass man den PAA erhält, was bisher nicht bekannt war. Das Konzept wurde ebenfalls auf die BRMM und der 1-Klassen-SVM angewandt [54] und implementiert.

Im Rahmen einer durch die AG Robotik betreuten Masterarbeit wurde auch ein Bayes'scher Klassifikator umgesetzt, welcher ohne Trainingsdaten auskommt. Dieser sogenannte Out-of-the-Box-Klassifikator erreichte bereits ohne Trainingsdaten eine hohe Klassifikationsgüte, die vergleichbar mit Klassifikatoren ist, die trainiert werden müssen. Dies gelingt, da der neue Klassifikator bereits aus alten Daten *Annahmen* über die Daten ableitet, die er bei der Anwendung auf einen neuen Probanden von Anfang an Nutzen kann.

Für den in AP3300 entwickelten PiSF Filter, konnte eine adaptive Variante umgesetzt und veröffentlicht werden [26].

Der vom Projektpartner entwickelte axDAWN Filter und mehrere adaptive Klassifikatoren wurden in einer großen Analyse miteinander verglichen [93] (zur näheren Beschreibung der Analyse siehe Abschlussbericht DFKI RIC, AP3400). Ein Ergebnis der Analyse war, dass die Unterschiede zwischen Probanden sehr individuell sind und die Übertragung zwischen Probanden nicht empfehlenswert ist. Man könnte stattdessen ohne Trainingsdaten beginnen bzw. den axDAWN komplett neu trainieren. Oder aber die von der Backtransformation aus AP3200 abgeleitete Co-Adaptivität findet Anwendung: Wird ein Vorverarbeitungsschritt ausgetauscht, wie in diesem Fall der Filter, so kann der Klassifikator ausgetauscht werden und bisher Gelerntes geht nicht komplett verloren [47]. Ein weiterer sich aus den Problemen ergebender Lösungsansatz wurde erst nach Abschluss des Arbeitspaketes im Rahmen einer Masterarbeit erfolgreich im Projekt RECUPERA-Reha umgesetzt. Hierbei wird eine herkömmliche SVM verwendet aber ihr Speicherverbrauch limitiert, was auch die Rechenzeit beschränkt. Am besten für die Verarbeitung von P300-Daten ist es hierbei die ältesten Daten zu vergessen und nur falsch klassifizierte Beispiele hinzuzufügen und die Speichergröße auf 600 Beispiele zu limitieren.

Auch für die Bewegungserkennung wurden adaptive Algorithmen umgesetzt. Hierbei konnte die Klassifikationsgüte ebenfalls verbessert werden und man kann unter einem gewissen Verlust in der Klassifikationsperformanz komplett ohne vorheriges Training beginnen.

## **AP4000 Entwicklung eines mobilen BR-Systems**

Inhalt dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung eines tragbaren BR-Systems in miniaturisierter Bauweise und mit möglichst geringer elektrischer Leistungsaufnahme, welches im Rahmen eines Anwendungsszenarios der Raumfahrt einsetzbar ist. Das System soll für die Bestimmung des mentalen Zustandes und der Vorhersage von Bewegungen eines Menschen und somit zur intuitiven Mensch-Roboter-Kommunikation eingesetzt werden können. Das miniaturisierte Brain-Reading-System wird im Weiteren mit *MBRS* abgekürzt.

### 2.1.14 AP4100 Anforderungsanalyse und Architekturentwurf

Die Anforderungsanalyse und der Architekturentwurf wurden vom Projektpartner DFKI GmbH durchgeführt.

### 2.1.15 AP4200 Umsetzung und Evaluierung der Komponenten

Dieses Arbeitspaket ist planmäßig Mitte Mai 2011 gestartet und wurde planmäßig im zweiten Quartal 2013 abgeschlossen.

#### DATENAKQUISE

Für den Betrieb des MBRS in einer Anwendung ist eine direkte Anbindung der EEG-Hardware unerlässlich. Aus diesem Grund wurden die notwendigen Treiber und Schnittstellen für eine direkte Kommunikation des MBRS mit der verwendeten BrainProducts EEG-Hardware implementiert. Diese wurden dann in pySPACE integriert und evaluiert. Teil dieser Entwicklung war auch die Implementierung einer Kontroll-GUI, um die Datenakquise konfigurieren zu können.

#### ELEKTRONISCHE UND MECHANISCHE KOMPONENTEN-ENTWICKLUNG

Innerhalb dieses Arbeitspaketes wurden die zum Betrieb des MBRS notwendigen grundlegenden elektronischen und mechanischen Infrastruktur-Komponenten (z. B. Ladeelektronik, Gehäuse) entwickelt. ein Schwerpunkt lag insbesondere auf der Entwicklung der mechanischen Komponenten, um eine ausreichende Mobilität des MBRS gewährleisten zu können. Dies beinhaltet die Fertigung, Inbetriebnahme und ersten Tests der jeweiligen Komponenten.

### 2.1.16 AP4300 Umsetzung der Gesamtarchitektur

Dieses Arbeitspaket wurde betreffend der ursprünglichen Inhalte des Vorhabens IMMI planmäßig Mitte November 2011 gestartet und im 4. Quartal 2013 abgeschlossen. Im Rahmen der Aufstockung wurden die Arbeiten wieder aufgenommen.

## **EINGEBETTETES BETRIEBSSYSTEM**

Um die pySPACE innerhalb des MBRS nutzen zu können, ist die Nutzung eines Betriebssystems, welches für eingebettete Systeme geeignet ist, unerlässlich. Da ein Linux-Derivat ausgewählt wurde, mussten alle für die Nutzung eines Betriebssystems notwendigen Schritte, d. h. die Anpassung der Konfiguration, Kompilierung und die Erzeugung der Boot-Dateien sowie die Tests der Funktionalität durchgeführt wurden. Dies beinhaltet auch jeweils die Anpassungen, die sich für jede Generation des MBRS ergaben.

## **INTEGRATION DER ELEKTRONISCHEN UND MECHANISCHEN KOMPONENTEN UND INBETRIEBNAHME DER GESAMTSYSTEME**

Die vom Projektpartner DFKI GmbH entwickelten Elektronikkomponenten und die mechanischen Komponenten wurden zusammengesetzt und in Betrieb genommen. Es wurden erste grundlegende Tests der Gesamtsysteme durchgeführt.

## **AP5000 Integration und Test des mobilen BR-Systems**

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Konzeptionierung, Spezifikation und Realisierung eines Anwendungsszenarios sowie die Integration des BR-Systems und dessen Validierung und Verifikation durch Tests im Anwendungsszenario.

### **2.1.17 AP5100 Spezifikation eines Anwendungsszenarios**

Die Spezifikation des Anwendungsszenarios wurde durch den Projektpartner DFKI GmbH erstellt.

### **2.1.18 AP5200 Aufbau des Anwendungsszenario**

## REALISIERUNG DER SIMULATIONSUMGEBUNG

Das Anwendungsszenario für das Projekt IMMI (IAS) zur Multi-Roboter-Kontrolle wurde auf Basis der Simulationssoftware MARS entwickelt. Dazu wurden zunächst die notwendigen Softwarekomponenten auf den entsprechenden Laborrechnern installiert und eine Reihe von Anpassungen vorgenommen, um die Kompatibilität mit den verwendeten Rechnersystemen bzw. verwendeten Betriebssystemen und Laufzeitumgebungen zu gewährleisten. Um eine hohe Wartbarkeit und Erweiterbarkeit der Software zu erreichen, wurden alle Funktionen der Software in eigenständigen Modulen gekapselt. Das IAS enthält umfangreiche Loggingmechanismen, etwa zum Mitloggen der InterSense Daten sowie der Cursorposition auf dem Bildschirm und aller Ereignisse in der Simulation, um eine spätere Auswertung aller Experimentaldaten zu gewährleisten.

## ENTWICKLUNG EINES MULTI-ROBOTER-KONTROLLFRAMEWORKS

Die Anbindung mehrerer und verschiedenartiger Roboter ist ein zentrales Element eines Multi-Roboter-Kontrollframeworks und soll aus Anwendersicht so unproblematisch als möglich sein. Die Anbindung eines neuen Roboters wurde daher in einer generischen Schnittstelle, dem **RobotInterface**, gekapselt. Zur Integration jedes neuen Robotermodells muss lediglich dieses Interface ausimplementiert werden, so dass eine Anmeldung bei dem **Robot Manager** erfolgen kann. Dieses Prinzip unterstützt zusätzlich die Anbindung realer Robotersysteme an das Framework: da die exakten Implementierungen im jeweiligen Plugin passieren, kann dieses auch als reine Kommunikationsschnittstelle zum realen System fungieren.

## ENTWICKLUNG DER MENSCH-MASCHINE-SCHNITTSTELLE

Anschließend wurde eine grafische Benutzeroberfläche als Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Interaktion des Benutzers mit den Robotern in der Simulation realisiert. Hierbei wurde insbesondere ein Schwerpunkt auf Modularität gelegt, so dass alle GUI-Elemente einfach ausgetauscht, weggelassen oder neue Elemente erstellt werden können. Ebenfalls wurde die Funktionalität der Kamerasteuerung in MARS erweitert, um die Bedienbarkeit des Szenarios zu verbessern. Die Funktionalitäten der Roboter, das einfache Fahren in eine Richtung, gezieltes Anfahren einer Position und die Position selbst, werden über eine möglichst generische Schnitt-

stelle nach außen zur Verfügung gestellt. Somit ist es möglich, verschiedene Robotersysteme mit Hilfe der GUI steuern zu können. Zum Beispiel unterschieden sich der ASGUARD und der CREX in ihrer zur Verfügung gestellten Funktionalität. Das führt dazu, dass beide, wenn jeweils ausgewählt, eine andere Auswahl an Kontrollmöglichkeiten in dem Befehlsfenster anzeigen.

## **INBETRIEBNAHME DER AUSFÜHRUNGSUMGEBUNGEN**

Die Implementierung des IAS kann in verschiedenen Anwendungsumgebungen ausgeführt werden. Zum einen kann das IAS auf einem einzelnen Rechner, vor allem für Entwicklungszwecke, ausgeführt werden. Es ist aber auch die Nutzung komplexerer Ausführungsumgebungen möglich. Hier sind insbesondere die *CAVE* und die *Mini-CAVE* zu nennen.

Die *CAVE* ist eine stereoskopische 7-fach Rück-Projektion. Die Projektion besteht aus sieben Elementen. Neben Maus und Tastatur sind in der *CAVE* weitere Eingabegeräte vorhanden, wie z. B. eine 3D-Maus, ein Tracking-System inkl. Hand- und Head-Trackern sowie einem sogenannten Wand als auch ein Datenhandschuh. Die Darstellung der Simulationsumgebung auf den Leinwänden der *CAVE* erfolgt dabei über 14 separate *Client*-Rechner (je zwei Rechner für eine der sieben Projektionswände, jeweils für das rechte und linke Auge), welche von einem *Master*-Rechner aus gesteuert werden. Sowohl die 3D-Umgebung als auch die Physik werden auf dem *Master* erstellt bzw. berechnet und an die *Clients* übertragen, welche lediglich die aktuelle Szenerie auf den Projektionswänden darstellen. Im Zuge der Übertragung auf die *CAVE* wurden verschiedene Anpassungen an den bereits entwickelten Komponenten durchgeführt. Hierbei erfolgt die Interaktion mit der grafischen Benutzeroberfläche, wie z. B. das Anklicken eines Roboters auf der Karte, auf den *Clients*, wohingegen die Interaktion mit der 3D-Umgebung, wie z. B. das Anwählen eines Roboters, auf dem *Master* durchgeführt wird.

Die *Mini-CAVE* besteht hingegen aus drei Laborrechnern mit jeweils 30-Zoll-Monitoren als *Clients* und dem Tracking-Rack als *Master*. Die Funktionsweise hierbei ist ähnlich der *CAVE*. Der *Master*-Rechner erstellt die virtuelle Umgebung inklusive der Roboter und verteilt diese auf die drei *Clients*, welche die Umgebung visualisieren und mittels des *Wands* bedient werden können. Dieser kleinere Testaufbau ermöglicht zum einen aufgrund seiner geringeren Komplexität eine leichtere und schnellere Weiterentwicklung des Anwendungsszenarios und zum anderen eine geeignete Umgebung für neurobiologische Versuche.

## **EINBINDUNG DER EEG-HARDWARE**

Weiterhin wurde für die Nutzung der EEG-Hardware im IAS eine Lösung zum Streamen und Verteilen von EEG-Daten im Netzwerk implementiert. Die Gesamtfunktion der Software wird von einzelnen Modulen erbracht. Jedes Modul erfüllt genau einen Zweck, wie z. B. die Akquise der Daten von der EEG-Hardware. Mehrere Module können in eine Verarbeitungskette zusammenschaltet werden. Der Ablauf der einzelnen Module wurde so aufgebaut, dass zu jedem Zeitpunkt eine Interaktion möglich ist (hohe Reaktionsfähigkeit). Es werden alle Plattformen (Windows, Mac, Linux, embedded Linux) unterstützt und insbesondere auf die Nutzbarkeit auf dem MBRS geachtet. Für die Anbindung des IAS wurde das Schreiben von Marken über eine TCP/IP Verbindung ermöglicht.

## **ENTWICKLUNG DER OPERATORUNTERSTÜTZUNG**

Die Übermittlung von Informationen aus dem Roboterframework an den Operator stellt ein zentrales Element der Operatorunterstützung dar, so dass der Art der Darstellung besonders viel Gewicht in Bezug auf die möglichst effektive Vermittlung der Information zufällt. Hierbei ist es wichtig, dass sich

- *Dringlichkeit* und
  
- *Urheber*,
  
- *Inhalt*

der Nachricht möglichst schnell und sicher vom Operator erfassen lassen. Zu diesem Zweck wurde die Möglichkeit einer farblichen Hervorhebung (colour highlighting) von Nachrichten an den Operator implementiert.

Eine Nachricht besteht aus drei Teilabschnitten: dem Nachrichtenicon, dem Urheberfeld und einem Nachrichtenfeld. Das Nachrichtenicon zeigt durch ein leicht verständliches Symbol den Nachrichtentyp und dessen Dringlichkeit an (normale Nachricht oder Warnung); das Urheberfeld zeigt mittels Farbcodierung das Absendersystem an und das Nachrichtenfeld durch ein ebenfalls leicht verständliches Symbol den Betreff der Nachricht.

## ENTWICKLUNG DES EXPERIMENTALSZENARIOS IAS ZUR MULTI-ROBOTER-KONTROLLE

Nach Abschluss der Arbeiten am IAS wurde das eigentliche Experimentalszenario entworfen und implementiert. Das Szenario selbst besteht aus einem zentralen **MissionManager** Modul, das einzelne Missionen erzeugen und überwachen kann, wodurch unterschiedliche Missionen einem beliebigen Roboter zugewiesen und parallel oder sequentiell gestellt werden können. Die einzelnen Missionen können hierbei unterschiedlich komplex sein und durch ihre modulare Implementierung ist es möglich, dass eine Mission zunächst eine Instanz einer anderen Mission erzeugt, die erfüllt werden muss, bevor die eigene Aufgabenstellung gestellt wird.

Für das Szenario werden vier Asgards verwendet, denen jeweils eine eigene Farbe zugewiesen wurde. Um der Tatsache entgegenzuwirken, dass die Schritte zur Lösung einer Aufgabe dem Roboter mitunter schnell zugewiesen werden können, die tatsächliche Lösung aber auf sich warten lassen kann (es dauert, bis ein Roboter bei seinem Zielpunkt angekommen ist), lassen sich mehrere Missionen zur Zeit zuteilen, um Leerlauf zu vermeiden. Ebenso lässt sich die Anzahl der zum Abschluss des Experiments notwendigen gelösten Aufgaben einstellen.

Das Experimentalszenario wurde in einer Reihe von Untersuchungen iterativ evaluiert (siehe AP5300) und anhand der Ergebnisse Schrittweise verbessert, um eine bestmögliche Durchführung der neurobiologischen Fragestellungen zu ermöglichen.

## ENTWICKLUNG DES TRANSFERSZENARIOS *Rehabilitation*

Das vom Projektpartner DFKI GmbH spezifizierte Transferszenario aus dem Anwendungsgebiet Rehabilitation wurde iterativ entwickelt, um schon frühzeitig die Funktionalität zu verifizieren. Die anfängliche Entwicklung basierte zunächst auf dem in VI-Bot konstruierten Oberkörper-Exoskelett, welches die Bewegung eines Armes unterstützen kann. Weitere Entwicklungsschritte nutzten dann die im Vorhaben CAPIO entwickelte Orthese. Die finale Version nutzt das im Vorhaben CAPIO entwickelte Oberkörper-Exoskelett, welches die Rehabilitation beider Arme unterstützen kann. Während der unterschiedlichen Entwicklungsschritte wurden fortlaufend die in AP2000 für das Rehabilitationsszenario relevanten neuen Erkenntnisse und entwickelten Methoden (einfache EEG-basierte Bewegungsvorhersage, Kombination von EEG und EMG für Bewegungsvorhersage und -detektion, Vorhersage unterschiedlicher Bewegungsarten, Nutzung adaptiver Methoden für die Bewegungsvorhersage) zur Anwendung gebracht.

## ANBINDUNG VON pySPACE UND INTEGRATION DES MBRS

Um adaptives Brain Reading für die Optimierung der MMI im IAS nutzen zu können, wurde eine Schnittstelle zu pySPACE implementiert. Durch die Nutzung von pySPACE innerhalb des MBR-Systems kann dieses somit auch ohne weitere Änderungen im IAS genutzt werden. Dadurch ist es nunmehr möglich, die Abläufe des IAS durch die Vorhersagen des MBRS zu beeinflussen. Dies erlaubt die Anpassung der Schwierigkeit des Szenarios an die Auslastung des Operators.

### 2.1.19 AP5300 Test im Anwendungsszenario

#### FORTLAUFENDE TESTS ZUR OPTIMIERUNG DES IAS

Um die Entwicklung des Experimentalszenarios zu unterstützen, wurden von Beginn an fortlaufend Versuche im IAS zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Entwicklung durchgeführt. Hierbei wurden die Stabilität und Funktionalität des IAS überprüft. Darüber hinaus wurden die physiologischen Daten der Operatoren aufgenommen und mit Hilfe von pySPACE untersucht. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse flossen dann direkt in die Weiterentwicklung des IAS in AP5200 ein. Ein besonderer Schwerpunkt der Untersuchungen stellte hierbei die Auswertung der Marker- und Logdateien des Anwendungsszenarios zum Zwecke der Verifikation dar.

#### TESTS IM TRANSFERSZENARIO *Rehabilitation*

Es wurden fortlaufende Tests im Transferszenario *Rehabilitation* durchgeführt. Der Zweck der Tests diente der Verifikation und fortlaufenden Optimierung des Transferszenarios. Anhand der Versuche konnte gezeigt werden, dass durch die multimodale Bewegungsvorhersage und -detektion die Bewegungen des Operators auch unter Anwendungsbedingungen funktioniert.

## **DURCHFÜHRUNG EINER STUDIE ZUR UNTERSUCHUNG DER OPERATORAUSLASTUNG DURCH MODIFIKATION DES IAS**

In einer finalen Studie wurde die Anwendbarkeit von (klassischem) Brain Reading zur Optimierung der Operatorauslastung untersucht. Hierbei wurde die Operatorauslastung durch Änderung des Zeitabstandes der Zuteilung der zu erledigenden Aufgaben aufgrund der Ergebnisse der Echtzeit-Detektion der P300 mit Hilfe des MBRS angepasst. Durch diese Untersuchung konnte die Anwendbarkeit von BR belegt werden.

## **UNTERSUCHUNG DES EFFEKTES DER ANWENDUNG ADAPTIVER ALGORITHMEN IM ANWENDUNGSSZENARIO IAS**

Im Rahmen der Aufstockung wurden die in AP3400 entwickelten adaptiven Algorithmen durch den Projektpartner in das MBRS integriert. Dies erlaubt es, Brain Reading ohne die vorherige Aufnahme von Trainingsdaten im Anwendungsszenario zu nutzen. Die Wirksamkeit dieser Algorithmen wurde in einer auf der ersten Studie aufbauenden Nachfolgestudie untersucht und mit klassischem Brain Reading verglichen. Hierbei wurde die erste Studie durch zusätzlich erhobene Daten (physiologische Daten zur Messung der Auslastung des Operators und Fragebögen) ergänzt.

### **2.1.20 AP5400 Dokumentation der Ergebnisse**

Die Daten der oben beschriebenen Studie wurden hinsichtlich neurobiologischer Fragestellungen ausgewertet und die Ergebnisse in Berichten und Publikationen verwertet.

## **2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die für das Forschungsvorhaben IMMI aufgewendeten Kosten fielen hauptsächlich in dem Bereich Personalkosten an. Auf Seiten der Universität Bremen erfolgte lediglich die Beschaffung von projektbezogener Software und Literatur.

Der Personalaufwand war dabei in erster Linie für die Arbeitspaketgruppen 2x00 und 5x00 notwendig. Dies lag an den umfangreichen neurobiologischen Grundlagenforschungen und dem Aufbau der Anwendungsszenarien. Außerdem wurde umfangreiche Grundlagenforschung im Bereich maschineller Lernverfahren und Signalverarbeitung (Arbeitspaketgruppe AP3x00) durchgeführt. In der Aufstockung war die Universität Bremen hauptsächlich in den Arbeitspaketgruppen 5x00 tätig, um die Einbindung des mobilen adaptiven Gerätes, welches von dem DFKI entwickelt wurde in die Anwendungen einzubinden. wichtigen wissenschaftlichen Konferenzen für die Veröffentlichung von Vorhabensergebnissen, sowie für Diskussionen und zur Bestimmung des jeweils aktuellen Stands der Forschung notwendig.

Eine detaillierte Aufstellung aller Kostenpositionen kann dem rechnerischen Verwendungsnachweis entnommen werden.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Vorhaben IMMI sollten Basistechnologien für das Monitoring von Menschen entwickelt werden, im Speziellen von Operatoren komplexer Maschinen oder Systeme. Diese sollten die Grundlage für tragbare BR-Schnittstellen zwischen Menschen und Effektorsystemen unterschiedlicher Art bilden.

Mit dem Vorhaben IMMI sollte mit Hilfe des Beitrages der Universität Bremen besonders die wissenschaftliche Stellung Deutschlands in den Bereichen Neuroinformatik, Maschinelle Lernverfahren und hochperformante Analyse von Massendaten gestärkt werden. Es sollten Themen, sowohl der reinen als auch anwendungsbezogenen Grundlagenforschung behandelt werden. Daher ist eine unmittelbare Nutzung der erzielten Ergebnisse des Vorhabens (abgesehen von der Verwendung für weitere wissenschaftliche Vorhaben) durch die Zuwendungsempfänger zwar prinzipiell absehbar, jedoch ohne weiteren Forschungs- und Entwicklungsaufwand nicht möglich. Insbesondere setzt ein Einsatz der wissenschaftlichen Methoden und Technologien in erweiterten und übertragenen Anwendungsgebieten voraus, dass eine weitergehende Forschung und Umsetzung der Ergebnisse gewährleistet wird. Diese weitere Förderung beruht jedoch auf politischen und förderpolitischen Entscheidungen, welche erst in der Zukunft getroffen werden und auf die Zuwendungsnehmer keinen Einfluss haben. Aus diesem Grund musste das Vorhaben und die Verlängerung ausreichend gefördert werden. Für eine direkte kommerzielle oder sonstige wirtschaftliche Nutzung der Entwicklungen besteht noch wesentlicher Verbesserungs- und Weiterentwicklungsbedarf. Weiterhin müssen

vor einer direkten Nutzung noch zahlreiche grundsätzliche Fragestellungen bearbeitet und Untersuchungen durchgeführt werden. Trotz der bisher erlangten Ergebnisse bestand für die in der Verlängerung zu bearbeitenden Themen große technische und wirtschaftliche Risiken, weswegen weitere Förderung notwendig war. Insgesamt zeichnet sich das Vorhaben durch eine Vielzahl unterschiedlicher Untersuchungen in verschiedenen Forschungsgebieten aus. Mit diesem Ansatz konnten in der Vergangenheit eine Vielzahl von wissenschaftlichen und technischen Erfolgen erreicht werden. Jedoch haben Arbeiten mit so starker interdisziplinärer Ausrichtung wegen ihres hohen Risikos und Komplexität einen hohen Bedarf an ausreichenden Forschungs- und Entwicklungsmitteln.

## **2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

### **2.4.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte**

In IMMI wurden keine Schutzrechte erteilt oder Schutzrechtsanmeldungen getätigt. Das Softwareframework pySPACE wurde unter GPLv3 (GNU General Public License) "Open Source" gestellt. Die Software kann damit nur ebenfalls unter GPL (d. h. quelloffen) weiterverbreitet werden. Allerdings ist eine spätere Vermarktung durch eine Lizenzänderung jederzeit möglich.

### **2.4.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**

Die Universität Bremen ist eine wissenschaftliche und somit gemeinnützige Einrichtung. Aus diesem Grund wird es zu keinen direkten wirtschaftlich verwertbaren Erfolgen für die Universität Bremen kommen. Eine direkte kommerzielle Nutzung der Ergebnisse aus IMMI ist derzeit ebenfalls nicht absehbar. Allerdings sind verschiedene Unternehmen, wie die Audi Electronics Venture GmbH mit Sitz in Gaimersheim, daran interessiert, Softwarelösungen für z. B. den Bereich autonomes Fahren und Fahrerassistenz auf Basis der an der AG Robotik entwickelten Frameworks zum maschinelle Lernen, wie zB. pySPACE, weiter zu entwickeln. Ob es zu einer konkreten Zusammenarbeit kommt ist zum derzeitigen Zeitpunkt jedoch noch nicht absehbar.

Es bedarf jedoch noch umfangreicher Forschung und Entwicklung, um die Lösungen aus IMMI tatsächlich in ein kommerzielles Produkt umzuwandeln. Aus diesem Grund ist ein Antrag beim BMBF auf die Ausschreibung "Mensch-Technik-Interaktion (MTI) für eine intelligente Mobilität: Verlässliche Technik für den mobilen Menschen" angestrebt.

### **2.4.3 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende**

Die in IMMI erzielten Ergebnisse speziell in der Entwicklung von Methoden der Signalverarbeitung und des maschinellen Lernens liefern die Basis für mögliche Kooperationen mit anderen Forschungsgruppen. Die Ergebnisse wurden intensiv auf Konferenzen, Workshops und mittels Veröffentlichungen in Büchern ausgetauscht. Auf Grund der Arbeiten hat sich eine intensive Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Forschungsgruppen ergeben. Daraus resultierte bereits eine Beteiligung am Antrag zum DFG Wissenschaftsnetzwerk mit dem Titel: "Users' Body Experience and Human-Machine Interfaces in (Assistive) Robotics - URoBody", welcher im Mai 2015 eingereicht wurde. Um die Automatisierung der Signalverarbeitung und des maschinellen Lernens weiter voran zu treiben und so die Vorrangstellung des Wissenschaftsstandortes Deutschland auf dem sehr wichtigen wissenschaftlichen und technischen Gebiet des maschinellen Lernen zu sichern, beteiligt sich die AG Robotik der Universität Bremen aktuell an der Beantragung des Vorhabens KiMMI (Kontextabhängige intuitive Mensch-Maschine-Interaktion) beim BMWi mit einem möglichen Beginn in 2015 oder 2016.

## **2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Die Partner des Vorhabens haben sich auf mehreren Konferenzen mit dem Thema und den Ergebnissen von IMMI präsentiert und mit der jeweiligen Community ausgetauscht. Die Ergebnisse konnten erfolgreich präsentiert werden. Die Konzepte und Ergebnisse nehmen bereits Einfluss auf die Entwicklungen im vom BMWi geförderten Vorhaben TransTerrA und im 2014 begonnenen vom BMBF geförderten Vorhaben Recupera Reha. Insgesamt stellte sich im Laufe des Vorhabens heraus, dass das Vorhaben IMMI einen wissenschaftlich und technisch vielver-

sprechenden Weg eingeschlagen hat. Auf Konferenzen und durch Besuche von verschiedenen Firmen und Kliniken wurde ersichtlich, dass das passive Lesen von Gehirnaktivität (Brain Reading), sowohl im Bereich Gaming und Unterhaltung als auch für die Intentionserkennung zur Unterstützung von Mensch-Maschine-Kooperation in der industriellen Produktion und in der Rehabilitation verstärkt Aufmerksamkeit erlangt.

Hervorzuheben ist, dass die Universität Bremen mit ihren vielfältigen Kompetenzen im Bereich des maschinellen Lernens und durch ihre enge Kooperation mit dem DFKI RIC sowohl national als auch international in einer Ausnahmesituation ist, da eine sehr enge Verknüpfung zwischen Forschung und Anwendung realisiert werden kann. Das hauptsächlich von der Universität Bremen entwickelte Framework pySPACE unterscheidet sich z. B. entsprechend von anderen Frameworks zum maschinellen Lernen in dem Punkt als dass es direkt mit dem vom dem DFKI RIC für die Anwendung entwickelten Framework reSPACE koppelbar ist und so eine direkte Übertragung von grundlegenden Erkenntnissen und Entwicklungen in eine Anwendung möglich ist. Außerdem zeichnet es sich dadurch aus, dass es Signalverarbeitung und Maschinelles Lernen in einem Framework verknüpft. Somit kann festgehalten werden, dass die Universität Bremen mit ihren Arbeiten darstellen kann, dass embedded Brain Reading nicht nur theoretisch möglich und optimiert werden kann, sondern auch anwendbar ist. Dies kann potentiellen Verwertern direkt vermittelt werden.

Aber auch auf dem Gebiet der Grundlagenforschung wird die Universität Bremen durch ihre Arbeiten und umfangreichen Publikationen aus IMMI als führend wahrgenommen. So ist sie resultierend aus den Arbeiten zu IMMI über Frau Dr. Elsa A. Kirchner z. B. an einem Antrag zum DFG Wissenschaftsnetzwerk mit dem Titel: "Users' Body Experience and Human-Machine Interfaces in (Assistive) Robotics - URoBody" beteiligt, welches im Mai 2015 zur Begutachtung eingereicht wurde.

## 3 Zusammenfassung

Rückblickend auf das Verbundvorhaben IMMI lässt sich zusammenfassend feststellen, dass alle zuvor gestellten technischen und wissenschaftlichen Ziele erfüllt werden konnten. Im Folgenden werden die vier in Kapitel 1.1.1 genannten Themenblöcke noch einmal aufgegriffen und deren Ergebnisse zusammengefasst.

### NEUROBIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

Neurobiologische Untersuchungen beschäftigten sich mit Fragestellungen der Wahrnehmung, Fehlerverarbeitung, Bewegungsplanung und -ausführung beim Menschen. Sie umfassen Szenarioentwicklung, Datenaufnahme und Auswertungen, weiterhin stellen sie eine wichtige Grundlage zur Methodenentwicklung in AP3000 dar.

Die Differenzierung der Wahrnehmungsprozesse während der Ausführung einer Aufgabe sowie während der Bearbeitung mehrerer Aufgaben war erfolgreich. Dies wurde, sowohl durch die EKP- als auch ML-Analyse bestätigt. Die im EEG enthaltenen Augenartefakte konnten durch sechs implementierte Methoden erfolgreich korrigiert werden.

Weiterhin konnten Fehler durch die Detektion der ErrPs erfolgreich erkannt werden. Innerhalb des entwickelten Szenarios konnte gezeigt werden, dass die unterschiedlichen ErrP-Typen mittels maschinellen Lernverfahren erfolgreich detektiert wurden. Darüber hinaus war der Klassifikatortransfer zwischen den unterschiedlichen ErrP-Typen erfolgreich und dies führte zur Reduzierung der Kalibrierungszeit. Zum Schluss konnten die funktionellen und effektiven Verknüpfungen zwischen verschiedenen Gehirngebieten während der Fehlerverarbeitung durch verschiedene implementierte Methoden gefunden werden.

Außerdem konnte der Bewegungsbeginn durch drei implementierten Methoden zur automati-

sierten Detektion des EMG-Onsets online detektiert werden.

Die Hauptergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Erfolgreiche Differenzierung der Wahrnehmungsprozesse während der Ausführung einer Aufgabe während multitasking
  
- Erfolgreiche Detektion des positiven EKPs, das mit dem zur Ausführung mehreren Aufgaben benötigten Prozess involviert ist
  
- Erfolgreiche Korrektur der Augenartefakte durch sechs implementierte Methoden
  
- Erfolgreiche Fehlererkennung durch die Detektion des ErrPs innerhalb des entwickelten Szenarios
  
- Erfolgreicher Klassifikatortransfer zwischen den unterschiedlichen ErrP-Typen, der wiederum zur Reduzierung der Kalibrierungszeit führte
  
- Erfolgreiches Finden der funktionellen und effektiven Verknüpfungen zwischen verschiedenen Gehirngebieten durch die implementierten Methoden
  
- Erfolgreiche Online-Bewegungsdetektion durch drei implementierten Methoden zur automatisierten Detektion des EMG-Onsets

## ANALYSE MITTELS MASCHINELLER LERNVERFAHREN

Für die Analyse mittels maschinellem Lernverfahren wurden die bisher verwendeten Frameworks aBRI-DP und BOR verbessert, erweitert und umstrukturiert. Letztendlich führte dies zur Software pySPACE, die in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner veröffentlicht wurde. Die AG Robotik hat in diesem Zusammenhang die Transparenz und Benutzerfreundlichkeit der Software maßgeblich gesteigert, Klassifikation nativ im Framework ermöglicht, geeignete Metriken zur Evaluierung erarbeitet und verbreitet, die Cluster-Anbindung unterstützt sowie eine automatisierte Parameteroptimierung konzipiert und umgesetzt.

Zur besseren Interpretierbarkeit der Daten und der gelernten Modelle wurde ein generalisiertes Visualisierungskonzept entworfen, neue Kriterien zur Elektrodenreduktion entwickelt und die *Backtransformation* konzipiert, implementiert und analysiert. Letzteres Verfahren betrachtet alle Verarbeitungsschritte und so auch deren Zusammenspiel um darzustellen, welche Bereiche in den Daten bei der Verarbeitung relevant sind.

Im Verlauf des Projektes wurden außerdem neuartige Methoden implementiert und verglichen, mit dem Ziel die vom Projektpartner entwickelte Referenzverarbeitung zu verbessern und pySPACE zu erweitern. Die AG Robotik hat hierfür Bayes'sche-, 1-Klassen- sowie Multi-Klassen-Klassifikatoren integriert, einen neuen räumlichen Filter entwickelt, der online-fähig ist (piSF/piSSF) und maßgeblich SVM-Klassifikatoren analysiert, was zu neuen Verfahren und zu einem besseren Verständnis der Zusammenhänge führte.

Schließlich bildete die Erweiterung und Entwicklung von adaptiven Algorithmen, d. h. Algorithmen, die sich mit der Zeit an neue Situationen (z. B. Probanden) anpassen einen Arbeitsschwerpunkt. Neben der grundsätzlichen Konzipierung und Erweiterung der Software um die Möglichkeit adaptive Algorithmen zu integrieren, an denen die AG Robotik beteiligt war, sind hier das *Single Iteration*-Konzept und die *Co-Adaptivität* die zentralen Ergebnisse. Ersteres ermöglicht beliebige SVM-ähnliche Klassifikatoren in Online-Klassifikatoren zu transformieren. Letzteres beschreibt die Anpassung des Klassifikators bei gleichzeitigem Austausch einer Vorverarbeitungskomponente (z. B. weil ein anderer Proband das BR-System nutzt).

Die Hauptergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Erweiterung und Verbesserung der vorhandenen Frameworks (Dokumentation, Benutzerfreundlichkeit, Klassifikation, Metriken sowie Parameteroptimierung) bis hin zur Um-

strukturierung dieser und Veröffentlichung von pySPACE.

- Konzeption, Implementation und Analyse der *Backtransformation* zur Darstellung relevanter Bereiche in den Daten
- Verbesserung der BR-Methodik durch Integration vielversprechender Klassifikatoren sowie Aufzeigen neuer Zusammenhänge und Transformationen SVM-ähnlicher Klassifikatoren
- Entwicklung online-fähiger räumlicher Filter (piSF/piSSF)
- Entwicklung der *Co-Adaptivität*, bei dem der Klassifikator bei gleichzeitigem Austausch einer Vorverarbeitungskomponente nicht komplett neu trainiert werden muss

## ENTWICKLUNG EINES MOBILEN BR-SYSTEMS

Die für den Betrieb notwendigen Infrastruktur-Komponenten (Spannungsversorgung, Gehäuse) wurden entworfen und gefertigt. Darüber hinaus wurde die für die Anbindung der EEG-Hardware notwendige Software entworfen und entwickelt. Ein für den Betrieb des mobilen BR-Systems notwendiges Betriebssystem wurde ausgewählt und für das mobile BR-System angepasst. Alle Einzelkomponenten wurden zu dem finalen mobilen BR-System zusammengeführt und das System in Betrieb genommen.

Die Hauptergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Entwicklung der Infrastruktur-Komponenten des mobilen Brain Reading Systems
- Einbindung der EEG-Hardware in pySPACE und an das mobile BR-System
- Bereitstellung des Betriebssystems für das mobile Brain Reading System
- Zusammenfügen der Einzelkomponenten zu einem Gesamtsystem

## **INTEGRATION UND TEST DES MOBILEN BR-SYSTEMS**

Es wurde ein simulationsbasiertes Anwendungsszenario für die Kontrolle mehrerer Roboter im Weltraumbereich entworfen und implementiert. Das Anwendungsszenario ist generisch entwickelt und modular aufgebaut, so dass es auf verschiedenen Plattformen (wie etwa einzelnen Rechnern oder auch verteilt auf CAVE-Umgebungen) genutzt werden kann.

Darüber hinaus wurde ein Transferszenario aus dem Anwendungsbereich Rehabilitation entwickelt und getestet.

Die Szenarien können flexibel parametrisiert werden und die Belastung des Operators geändert werden, um verschiedene neurobiologische Fragestellungen zu untersuchen.

Das mobile BR-System wurde in das Anwendungsszenario eingebunden und erfolgreich getestet.

Die Hauptergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Entwicklung eines simulationsbasierten Szenarios aus dem Anwendungsgebiet "Weltraum"
- Entwicklung eines Transfer-Szenarios aus dem Anwendungsgebiet "Rehabilitation"
- Einbindung des mobilen Brain Reading Systems

## Literaturverzeichnis

- [1] F. Asano, M. Kimura, T. Sekiguchi, and Y. Kamitani. Classification of movement-related single-trial meg data using adaptive spatial filter. In *ICASSP '09: Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pages 357–360, Washington, DC, USA, 2009. IEEE Computer Society.
- [2] A. Bashashati, M. Fatourechi, R. K. Ward, and G. E. Birch. A survey of signal processing algorithms in brain–computer interfaces based on electrical brain signals. *Neural Engineering*, 4(2), June 2007.
- [3] A. J. Bell and T. J. Sejnowski. An information-maximization approach to blind separation and blind deconvolution. *Neural computation*, 7(6):1129–1159, 1995.
- [4] A. Belouchrani, K. Abed-Meraim, J.-F. Cardoso, and E. Moulines. A blind source separation technique using second-order statistics. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 45(2):434–444, Feb. 1997.
- [5] N. Birbaumer, N. Ghanayim, T. Hinterberger, I. Iversen, B. Kotchoubey, A. Kübler, J. Perelmouter, E. Taub, and H. Flor. A spelling device for the paralysed. *Nature*, 398(6725):297–298, March 1999.
- [6] B. Blankertz, G. Dornhege, M. Krauledat, K.-R. Müller, V. Kunzmann, F. Losch, and G. Curio. The berlin brain-computer interface: EEG-based communication without subject training. *IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 14(2):147–152, 2006.
- [7] B. Blankertz, R. Tomioka, S. Lemm, M. Kawanabe, and K.-R. Müller. Optimizing spatial filters for robust eeg single-trial analysis. In *IEEE Signal Processing Magazine*, pages 581–607, 2008.

- [8] P. Bonato, T. D'Alessio, and M. Knaflitz. A statistical method for the measurement of muscle activation intervals from surface myoelectric signal during gait. *IEEE Trans Biomed Eng*, 45(3):287–299, Mar 1998.
- [9] P. R. Cavanagh and P. V. Komi. Electromechanical delay in human skeletal muscle under concentric and eccentric contractions. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 42(3):159–163, Nov 1979.
- [10] R. Croft and R. Barry. Removal of ocular artifact from the EEG: a review. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 30(1):5–19, 2000.
- [11] R. J. Croft, J. S. Chandler, R. J. Barry, N. R. Cooper, and A. R. Clarke. EOG correction: A comparison of four methods. *Psychophysiology*, 42(1):16–24, 2005.
- [12] A. Delorme, T. Sejnowski, and S. Makeig. Enhanced detection of artifacts in eeg data using higher-order statistics and independent component analysis. *Neuroimage*, 34(4):1443–1449, 2007.
- [13] M. Falkenstein, J. Hohnsbein, J. Hoormann, and L. Blanke. Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 78(6):447–455, 1991.
- [14] F. D. Farfán, J. C. Politti, and C. J. Felice. Evaluation of emg processing techniques using information theory. *Biomed Eng Online*, 9:72, 2010.
- [15] D. Feess, M. M. Krell, and J. H. Metzen. Comparison of sensor selection mechanisms for an ERP-based brain-computer interface. *PLoS ONE*, 8(7):e67543, Jul 2013.
- [16] P. Ferrez and J. Millán. You are wrong!-automatic detection of interaction errors from brain waves. In *International joint conference on Artificial Intelligence*, volume 19, page 1413. Citeseer, 2005.
- [17] P. Ferrez and J. Millán. Error-related EEG potentials generated during simulated brain-computer interaction. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 55(3):923–929, 2008.
- [18] P. W. Ferrez and J. Millán. Simultaneous Real-Time Detection of Motor Imagery and

- Error-Related Potentials for Improved BCI Accuracy. In *Proceedings of the 4th International Brain-Computer Interface Workshop and Training Course*, pages 197–202, 2008.
- [19] T. Gasser, P. Ziegler, and W. Gattaz. The deleterious effect of ocular artefacts on the quantitative EEG, and a remedy. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 241:352–356, 1992.
- [20] W. Gehring, B. Goss, M. Coles, D. Meyer, and E. Donchin. A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, pages 385–390, 1993.
- [21] M. Geisler and J. Polich. P300 habituation from visual stimuli? *Physiology & behavior*, 56(3):511–516, 1994.
- [22] F. Ghaderi. Joint spatial and spectral filter estimation for single trial detection of event related potentials. In *2013 IEEE International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP)*, pages 1–6, 9 2013.
- [23] F. Ghaderi. Single trial erp detection exploiting sparsity in time. In *International Workshop on Biomedical and Astronomical Signal Processing Frontiers, BASP Frontiers Workshop, January 27 - February 1, 2013, Switzerland*, Jan 2013.
- [24] F. Ghaderi, S. K. Kim, and E. A. Kirchner. Effects of eye artifact removal methods on single trial P300 detection, a comparative study. *Journal of Neuroscience Methods*, 221(0):41–47, Jan 2014.
- [25] F. Ghaderi and E. A. Kirchner. Periodic spatial filter for single trial classification of event related brain activity. In *Proceedings of the 10th IASTED International Conference on Biomedical Engineering (BioMed-2013), February 13-15, Innsbruck, Austria*. ACTA Press, Feb 2013.
- [26] F. Ghaderi and S. Straube. An adaptive and efficient spatial filter for event-related potentials. In *Proceedings of the 21st European Signal Processing Conference, (EUSIPCO)*, 9 2013.
- [27] C. J. Gonsalvez, R. J. Barry, J. A. Rushby, and J. Polich. Target-to-target interval, intensity, and p300 from an auditory single-stimulus task. *Psychophysiology*, 44:245–50, Mar 2007.

- [28] G. Gratton, M. G. Coles, and E. Donchin. A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 55(4):468–484, Apr. 1983.
- [29] Y. Gu, K. Dremstrup, and D. Farina. Single-trial discrimination of type and speed of wrist movements from eeg recordings. *Clinical Neurophysiology*, 120(8):1596 – 1600, 2009.
- [30] S. Hillyard and M. Kutas. Electrophysiology of cognitive processing. *Annual review of psychology*, 34:33–61, Jan 1983.
- [31] P. W. Hodges and B. H. Bui. A comparison of computer-based methods for the determination of onset of muscle contraction using electromyography. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 101(6):511–519, Dec 1996.
- [32] U. Hoffmann, J.-M. Vesin, T. Ebrahimi, and K. Diserens. An efficient p300-based brain–computer interface for disabled subjects. *Journal of Neuroscience Methods*, 167(1):115–125, 2008.
- [33] J. Hohnsbein, M. Falkenstein, and J. Hoormann. Effects of attention and time-pressure on P300 subcomponents and implications for mental workload research. *Biological Psychology*, 40(1-2):73–81, 1995.
- [34] B. Hong, F. Guo, T. Liu, X. Gao, and S. Gao. N200-speller using motion-onset visual response. *Clinical Neurophysiology*, 120(9):1658 – 1666, 2009.
- [35] H. Hyvärinen, J. Karhunen, and E. Oja. *Independent Component Analysis*. Wiley-Interscience, 2001.
- [36] Y. Kassahun, H. Wöhrle, A. Fabisch, and M. Tabie. Learning parameters of linear models in compressed parameter space. In A. E. Villa, W. Duch, P. Érdi, F. Masulli, and G. Palm, editors, *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2012*, volume 7553 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 108–115. Springer, 2012.
- [37] J. L. Kenemans, P. C. Molenaar, M. N. Verbaten, and J. L. Slangen. Removal of the ocular artifact from the EEG: A comparison of time and frequency domain methods with simulated and real data. *Psychophysiology*, 28(1):114–121, 1991.
- [38] S. K. Kim and E. A. Kirchner. Classifier transferability in the detection of error related

- potentials from observation to interaction. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-2013, Manchester, UK, October 13-16*, pages 3360–3365, Oct 2013.
- [39] S. K. Kim and E. A. Kirchner. Choice of training data for classifier transfer in error related potentials based on signal characteristics. In *Proceedings of the 7th International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering, IEEE NER, Montpellier, France, April 22-24*, pages –, April 2015.
- [40] S. K. Kim and E. A. Kirchner. Handling few training data: classifier transfer between different types of error-related potentials. *submitted to IEEE Transactions on Neural System and Rehabilitation Engineering*, 2015.
- [41] S. K. Kim, S. K. Sanga, and E. A. Kirchner. A comparison of effective connectivity methods using different performance metrics. In *Proceedings of the 6th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering, NER-2013, San Diego, USA, November 06-08*, pages 823–826, Nov 2013.
- [42] E. A. Kirchner and S. K. Kim. EEG in Dual-Task Human-Machine Interaction: Target Recognition and Prospective Memory. In *Proceedings of the 18th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping*, Beijing, China, Jun 2012.
- [43] E. A. Kirchner and S. K. Kim. Relevance of the Effect of Dual-Task Compared to Simple-Task Behavior on Late Positive Parietal Event-Related Potentials and Performance in their Single-Trial Detection for the Support of Complex Human-Machine Interaction. *in preparation for Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2015.
- [44] E. A. Kirchner, S. K. Kim, S. Straube, A. Seeland, H. Wöhrle, M. M. Krell, M. Tabie, and M. Fahle. On the applicability of brain reading for predictive human-machine interfaces in robotics. *PLoS ONE*, 8(12):e81732, Dec 2013.
- [45] M. Krauledat, M. Tangermann, B. Blankertz, K.-R. Müller, and O. Sporns. Towards zero training for brain-computer interfacing. *PLoS ONE*, 3(8), Aug 2008.
- [46] M. M. Krell. Introduction to the Signal Processing and Classification Environment pySPACE, Jul 2014. PyData Berlin.

- [47] M. M. Krell. *Generalizing, Decoding, and Optimizing Support Vector Machine Classification*. PhD thesis, University of Bremen, Bremen, 2015.
- [48] M. M. Krell, D. Feess, and S. Straube. Balanced Relative Margin Machine — The missing piece between FDA and SVM classification. *Pattern Recognition Letters*, 41:43–52, May 2014.
- [49] M. M. Krell, E. A. Kirchner, and H. Wöhrle. Our tools for large scale or embedded processing of physiological data, Jul 2014. Passive BCI Community Meeting, Delmenhorst, Germany.
- [50] M. M. Krell, S. Straube, A. Seeland, H. Wöhrle, J. Teiwes, J. H. Metzen, E. A. Kirchner, and F. Kirchner. Introduction to pySPACE workflows, Dec 2013. peer-reviewed talk, NIPS 2013 Workshop on MLOSS: Towards Open Workflows, Lake Tahoe, Nevada, USA.
- [51] M. M. Krell, S. Straube, A. Seeland, H. Wöhrle, J. Teiwes, J. H. Metzen, E. A. Kirchner, and F. Kirchner. pySPACE - a signal processing and classification environment in Python. *Frontiers in Neuroinformatics*, 7(40), Dec 2013. <https://github.com/pyspace>.
- [52] M. M. Krell, S. Straube, H. Wöhrle, and F. Kirchner. Generalizing, Optimizing, and Decoding Support Vector Machine Classification. In *ECML/PKDD-2014 PhD Session Proceedings*, Nancy, 2014.
- [53] M. M. Krell, M. Tabie, H. Wöhrle, and E. A. Kirchner. Memory and Processing Efficient Formula for Moving Variance Calculation in EEG and EMG Signal Processing. In *Proc. International Congress on Neurotechnology, Electronics and Informatics (NEUROTECHNIX 2013)*, pages 41–45, Vilamoura, Portugal, 2013. ScitePress.
- [54] M. M. Krell and H. Wöhrle. New one-class classifiers based on the origin separation approach. *Pattern Recognition Letters*, 53:93–99, Dec. 2015.
- [55] M. Kutas, G. McCarthy, and E. Donchin. Augmenting mental chronometry: The P300 as a measure of stimulus evaluation time. *Science*, 197(4305):792–95, 1977.
- [56] R. Leeb, C. Keinrath, D. Friedman, C. Guger, R. Scherer, C. Neuper, M. Garau, A. Antley, A. Steed, and M. Slater. Walking by thinking: the brainwaves are crucial, not the muscles! *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 15(5):500–514, 2006.

- [57] F. Lotte, M. Congedo, A. Lécuyer, F. Lamarche, and B. Arnaldi. A review of classification algorithms for eeg-based brain-computer interfaces. *Neural Engineering*, 4(2), June 2007.
- [58] S. Luck. *An introduction to the event-related potential technique*. MIT Press, Cambridge, Jan 2005.
- [59] A. Magliero, T. Bashore, M. Coles, and E. Donchin. On the dependence of p300 latency on stimulus evaluation processes. *Psychophysiology*, 21(2):171–186, 1984.
- [60] J. H. Metzen and E. A. Kirchner. Rapid adaptation of brain reading interfaces based on threshold adjustment. In *Proceedings of the 2011 Conference of the German Classification Society, (GfKI-2011)*, page 138, Frankfurt, Germany, Aug 2011.
- [61] W. Miltner, C. Braun, and M. Coles. Event-related brain potentials following incorrect feedback in a time-estimation task: Evidence for a "generic" neural system for error detection. *Cognitive Neuroscience*, 9(6):788–798, 1997.
- [62] A. Mognon, J. Jovicich, L. Bruzzone, and M. Buiatti. ADJUST: An automatic EEG artifact detector based on the joint use of spatial and temporal features. *Psychophysiology*, 48(2):229–240, 2011.
- [63] K. Müller, M. Tangermann, G. Dornhege, M. Krauledat, G. Curio, and B. Blankertz. Machine learning for real-time single-trial EEG-analysis: From brain-computer interfacing to mental state monitoring. *Neuroscience methods*, 167(1):82–90, 2008.
- [64] S. Nieuwenhuis, K. Ridderinkhof, J. Blom, G. Band, and A. Kok. Error-related brain potentials are differentially related to awareness of response errors: Evidence from an antisaccade task. *Psychophysiology*, 38(05):752–760, 2001.
- [65] J. Pan, T. Takeshita, and K. Morimoto. P300 habituation from auditory single-stimulus and oddball paradigms. *International Journal of Psychophysiology*, 37(2):149–153, 2000.
- [66] T. Picton. The P300 wave of the human event-related potential. *Clinical Neurophysiology*, 9(4):456–479, 1992.
- [67] J. Polich and M. D. Comerchero. P3a from visual stimuli: typicality, task, and topography. *Brain topography*, 15:141–52, 2003.

- [68] J. Polich and A. Kok. Cognitive and biological determinants of P300: an integrative review. *Biological Psychology*, 41(2):103–146, 1995.
- [69] J. Polich and C. Margala. P300 and probability: comparison of oddball and single-stimulus paradigms. *International journal of psychophysiology*, 25:169–76, 1997.
- [70] Y. W. Qi Xu, Hui Zhou and J. Huang. Fuzzy support vector machine for classification of eeg signals using wavelet-based features. *Medical engineering & physics* 1, 31:858–865, 2009.
- [71] M. B. I. Raez, M. S. Hussain, and F. Mohd-Yasin. Techniques of emg signal analysis: detection, processing, classification and applications. *Biol Proced Online*, 8:11–35, 2006.
- [72] S. Romero, M. Mananas, and M. Barbanoj. Ocular reduction in EEG signals based on adaptive filtering, regression and blind source separation. *Annals of Biomedical Engineering*, 37:176–191, 2009.
- [73] J. Rosen, M. Brand, M. B. Fuchs, and M. Arcan. A myosignal-based powered exoskeleton system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A*, 31(3):210–222, 2001.
- [74] A. Sassaroli, F. Zheng, and L. Hirshfield. Discrimination of mental workload levels in human subjects with functional near-infrared spectroscopy. *Innovative Optical Health Sciences*, Jan 2008.
- [75] A. Seeland, S. Straube, and F. Kirchner. Comparison of distributed source localization methods for EEG data. In *Perception - ECVP Abstract Supplement*, volume 42, page 220, Bremen, Germany, August 2013. Pion Ltd.
- [76] A. Seeland, H. Wöhrle, S. Straube, and E. A. Kirchner. Online movement prediction in a robotic application scenario. In *6th International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering (NER)*, pages 41–44, San Diego, California, Nov 2013.
- [77] P. Shenoy, M. Krauledat, B. Blankertz, R. Rao, and K. Müller. Towards adaptive classification for bci. *Neural Engineering*, 3, 2006.

- [78] P. Shenoy, K. J. Miller, B. Crawford, and R. P. N. Rao. Online electromyographic control of a robotic prosthesis. *IEEE Trans. Biomed. Engineering*, 55(3):1128–1135, 2008.
- [79] K. Spencer and J. Polich. Poststimulus eeg spectral analysis and p300: attention, task, and probability. *Psychophysiology*, 36:220–32, 1999.
- [80] N. Squires, K. Squires, and S. Hillyard. Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 38:387–401, 1975.
- [81] S. Straube and D. Feess. Looking at ERPs from Another Perspective: Polynomial Feature Analysis. *Perception*, 42 ECVF Abstract Supplement:220, 2013.
- [82] S. Straube and M. M. Krell. How to evaluate an agent’s behaviour to infrequent events? – reliable performance estimation insensitive to class distribution. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 8(43), 2014.
- [83] S. Straube, J. H. Metzen, A. Seeland, M. M. Krell, and E. A. Kirchner. Choosing an appropriate performance measure: Classification of EEG-data with varying class distribution. In *Proceedings of the 41st Meeting of the Society for Neuroscience 2011*, Washington DC, United States, Nov 2011.
- [84] S. Straube, A. Seeland, and D. Feess. Striving for better and earlier movement prediction by postprocessing of classification scores. In *Proc. International Congress on Neurotechnology, Electronics and Informatics (NEUROTECHNIX 2013)*, pages 13–20, Vilamoura, Portugal, 2013. ScitePress.
- [85] D. Strüber and J. Polich. P300 and slow wave from oddball and single-stimulus visual tasks: inter-stimulus interval effects. *International journal of psychophysiology*, 45:187–96, 2002.
- [86] S. Sutton, M. Braren, J. Zubin, and E. John. Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*, 150:1187, 1965.
- [87] M. Tabie and E. A. Kirchner. EMG Onset Detection - Comparison of different methods for a movement prediction task based on EMG. In S. Alvarez, J. Solé-Casals, A. Fred, and H. Gamboa, editors, *Proceedings of the 6th International Conference on Bio-inspired*

*Systems and Signal Processing (BIOSIGNALS-13)*, pages 242–247, Barcelona, Feb 2013. ScitePress.

- [88] M. Tangermann, I. Winkler, S. Haufe, and B. Blankertz. Classification of artifactual ica components. *International Journal of Bioelectromagnetism (IJBEM)*, 2009.
- [89] D. Tkach, H. Huang, and T. A. Kuiken. Study of stability of time-domain features for electromyographic pattern recognition. *J Neuroeng Rehabil*, 7:21, 2010.
- [90] H. van Schie, R. Mars, M. Coles, and H. Bekkering. Modulation of activity in medial frontal and motor cortices during error observation. *Nature Neuroscience*, 7(5):549–554, 2004.
- [91] C. Vidaurre, A. Schlögl, B. Blankertz, M. Kawanabe, and K.-R. Müller. Unsupervised adaptation of the lda classifier for brain-computer interfaces. In *Proceedings of the 4th International Brain-Computer Interface Workshop and Training Course 2008*, 2008.
- [92] G. L. Wallstrom, R. E. Kass, A. Miller, J. F. Cohn, and N. A. Fox. Automatic correction of ocular artifacts in the EEG: a comparison of regression-based and component-based methods. *International Journal of Psychophysiology*, 53(2):105–119, 2004.
- [93] H. Wöhrle, M. M. Krell, S. Straube, S. K. Kim, E. A. Kirchner, and F. Kirchner. An Adaptive Spatial Filter for User-Independent Single Trial Detection of Event-Related Potentials. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2015.
- [94] A. Yazdani, U. Hoffmann, and T. Ebrahimi. Classification of EEG Signals Using Dempster Shafer Theory and a K-Nearest Neighbor Classifier. In *The 4th International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering*, pages 327–330. IEEE, 2009.
- [95] J. W. Yoon, S. J. Roberts, M. Dyson, and J. Q. Gan. Adaptive classification by hybrid ekf with truncated filtering: Brain computer interfacing. In *IDEAL '08: Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning*, pages 370–377, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer-Verlag.
- [96] L. Zhang, W. He, C. He, and P. Wang. Improving mental task classification by adding high frequency band information. *Medical Systems*, 2008.
- [97] S. Zhou, D. L. Lawson, W. E. Morrison, and I. Fairweather. Electromechanical delay in

isometric muscle contractions evoked by voluntary, reflex and electrical stimulation. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 70(2):138–145, 1995.

# Anhang A

## Anhang

### A.1 Glossar

aBR	adaptives Brain-Reading (aBR bezeichnet BR-Systeme, die sich selbstständig an veränderte Umgebungen und Benutzer anpassen.)
aBRI-DP	Data Processing for adaptive Brain-Reading Interfaces (aBRI-DP ist eine am DFKI RIC entwickelte Software, die einen RAD-ähnlichen Entwicklungsprozess ermöglicht. Sie ist in der Programmiersprache Python implementiert und basiert auf dem "Modular Toolkit for Data Processing".)
AUC	Area under the ROC (Die AUC beschreibt den Flächeninhalt der ROC-Kurve. Sie kann verwendet werden um die allgemeine Güte eines Klassifikators (unabhängig von dessen Schwellwert) anzugeben.)
BA	Balanced Accuracy (Arithmetisches Mittel der True Positive Rate (TPR) und True Negative Rate (TNR))
BCI	Brain-Computer-Interface (Unter einem BCI (auch MMI) versteht man eine spezielle Schnittstelle, die einen direkten Kommunikationsweg zwischen einem Gehirn und einem technischen Gerät (z. B. Computer oder Maschine) darstellt.)
BOR	Benchmarking On Rails (BOR ist eine am DFKI RIC entwickelte Evaluierungssoftware zur automatischen Durchführung und Auswertung empirischer Untersuchungen im Bereich Maschinelles Lernen und Signalverarbeitung.)
BR	Brain-Reading (BR bezeichnet die Analyse von Gehirnaktivität zum Zwecke einer Zustands- und Verhaltensvorhersage beim Menschen.)
CSP	Common Spatial Pattern (CSP ist eine räumliche Transformation, welche

---

	Informationen klassenabhängig verdichtet.)
<b>EEG</b>	Elektroenzephalographie (EEG bezeichnet eine nicht-invasive Methode zur Bestimmung von Gehirnaktivität basierend auf der Messung von Spannungsschwankungen an der Kopfoberfläche. Die Abkürzung steht ebenfalls für die graphische Darstellung dieser Schwankungen: Elektroenzephalogramm.)
<b>EKP</b>	ereigniskorreliertes Potential (Ein EKP ist eine sichtbare elektrophysiologische Aktivität im EEG, die durch Sinneswahrnehmung ausgelöst werden kann oder mit kognitiven Prozessen (z. B. Aufmerksamkeit) korreliert.)
<b>EMG</b>	Elektromyographie (EMG ist eine Methode zur Identifizierung bzw. Registrierung eines Bewegungsbeginns. Dabei wird eine Potentialänderung aufgrund von Muskelaktivität gemessen. Elektromyogramm, eine graphische Darstellung der Elektromyographie, wird auch als EMG abgekürzt.)
<b>ErrP</b>	error-related potential (ErrP tritt unter anderem nach einer falschen Response sowie nach einem negativen Feedback auf.)
<b>LDA</b>	Lineare Diskriminanzanalyse (LDA ist ein multivariates statistisches Verfahren, bei dem versucht wird, durch eine Raumtransformation eine gute Darstellung der Merkmale zu erreichen und mit Hilfe einer linearen Diskriminanzfunktion zwischen zwei oder mehr Stichprobengruppen zu unterscheiden.)
<b>MMI</b>	Mensch-Maschine-Interface (Unter einem MMI (auch BCI) versteht man eine spezielle Schnittstelle, die einen direkten Kommunikationsweg zwischen einem Gehirn und einem technischen Gerät (z. B. Computer oder Maschine) darstellt.)
<b>P300</b>	P300 ist eine klassische Bezeichnung der P300-Gruppe, die sich in drei untergeordnete Komponenten teilt: P3a, P3b und slow wave. Im klassischen Sinne wird P3b als P300 bezeichnet. Das P3b ist ein Potential, welches auftritt, wenn die Bedeutung einer seltenen, wichtigen Information evaluiert wird.
<b>pySPACE</b>	Signal Processing and Classification Environment written in Python (pySPACE ist ein am DFKI RIC und der AG Robotik entwickeltes Softwareframework, dass die Funktionalitäten von aBRI-DP und BOR in sich vereint. Zudem wurden zahlreiche Erweiterungen vorgenommen.)
<b>RAD</b>	Rapid Application Development
<b>ROC</b>	Receiver Operating Characteristic (ROC ist eine Methode zur grafischen Darstellung der Richtigpositivrate in Abhängigkeit der Falschpositivrate eines Klassifikators. Sie kann verwendet werden, um den bestmöglichen Wert eines Parameters, z. B. des Schwellwertes des Klassifikators, zu finden.)
<b>SVM</b>	Support Vector Machine (SVM bezeichnet ein Verfahren des überwachten Lernens, welche zur binären Klassifikation genutzt wird, wobei die Grenze zwischen den Klassen höchstmöglich frei von Objekten gewählt wird.)

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Verbundvorhaben: IMMI - Intelligentes Mensch-Maschine-Interface - Adaptives Brain-Reading für unterstützende Robotik	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Elsa Andrea Kirchner, Dr. Su-Kyoung Kim, Dr. Mario Michael Krell, Anett Seeland, Hendrik Wöhrle, Marc Tabie	5. Abschlussdatum des Vorhabens April 2015
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation geplant
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Universität Bremen, Fachbereich 03, AG Robotik, Robert-Hooke-Straße 1, D-28359 Bremen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 50RA1011
	11. Seitenzahl 80
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 97
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 5
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
<p>18. Kurzfassung</p> <p>Allgemein gilt die Echtzeitanalyse von Biosignalen wie dem Elektroenzephalogramm (EEG) als wichtiges Referenzproblem auf dem Gebiet der Signalverarbeitung und der Mustererkennung. Eine zuverlässige Verarbeitung nichtstationärer Daten, wie dies beim EEG der Fall ist, ist ein derzeit nicht gelöstes Problem der Grundlagenforschung. Es fehlen außerdem Frameworks, die eine effektive Entwicklung, vergleichende Analyse und Optimierung von Signalverarbeitungs- und Klassifikationsmethoden erlauben. Zudem fehlen Methoden, die sich adaptiv auf die nicht-stationären Eigenschaften von Biosignalen einstellen können. Im Rahmen des Projektes „IMMI“ sollen Schlüsseltechnologien entwickelt werden, die echtzeitfähiges und adaptives „Brain-Reading“ (BR) ermöglichen. BR bezeichnet die Analyse von Gehirnaktivität zum Zwecke einer Zustands- und Verhaltensvorhersage beim Menschen. Systeme, in denen adaptives Brain-Reading (aBR) integriert ist, sind derart gestaltet, dass sie sich darüber hinaus selbstständig an wechselnde Bediener anpassen, um eine größtmögliche Einsatzfähigkeit in der Praxis zu gewährleisten. Der Arbeitsschwerpunkt der Universität Bremen lag in den wissenschaftlichen Zielen des Projektes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>_ Methoden für echtzeitfähiges adaptives Brain Reading (aBR) zur Zustandsbestimmung und Verhaltensvorhersage beim Menschen</li> <li>_ Neue Erkenntnisse über funktionelle Zusammenhänge zwischen Wahrnehmung, sensomotorischer Verarbeitung und Bewegung bzw. Bewegungsplanung</li> <li>_ Erweiterung der methodischen Herangehensweise und Analyse von (Gehirn-)Daten</li> </ul> <p>Zur Umsetzung der Ziele wurden folgende Methoden eingesetzt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Entwicklung eines Signalverarbeitungs- und Klassifikationsframeworks</li> <li>- Aufzeichnung umfangreicher Biosignaldaten in verschiedenen entwickelten Testszenarien</li> <li>- Entwicklung und Optimierung von Klassifikatoren und adaptiven Lernverfahren</li> <li>- Entwicklung eines Anwendungsszenario im Bereich der Welt- und Raumfahrt: Operatorüberwachung und -unterstützung</li> </ul> <p>Als Hauptergebnisse von IMMI sind zu nennen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Entwicklung eines Ansatzes „Embedded Brain Reading“ zur robusten, fehlertoleranten Unterstützung auf Basis der Analyse unsicherer Biosignale mittels des entwickelten Signalverarbeitungs- und Klassifikationsframeworks pySPACE.</li> <li>- Entwicklung einer neuartigen intelligenten Mensch-Maschine-Schnittstelle, die nicht nur die Interaktion ermöglicht, sondern sich auch an die aktuellen Fähigkeiten des Menschen anpasst, um Überforderung zu vermeiden und so eine sichere Interaktion und Steuerung mit geringen Ressourcen an Menschen (z.B. auch aus dem Orbit während einer Mission) zu ermöglichen.</li> </ul> <p>Die Entwicklungen lassen sich potentiell auf eine Reihe von weiteren Anwendungsgebieten übertragen, beispielsweise die adaptive, d.h. situationspezifische, mobile integrierte Echtzeitverarbeitung von Sensorinformationen in Robotern oder die intuitive Unterstützung von Mensch-Maschine-Interaktion in der Produktion sowie der robotisch unterstützten Rehabilitation. Immer wenn eine Unterstützung auf Basis der Intentionen des Menschen notwendig ist, also Intentionen des Menschen automatisch aus unterschiedlichsten Daten über den Menschen, das System und die Interaktionsaufgabe abgeleitet werden müssen, werden mächtige Frameworks zur Signalverarbeitung und Klassifikation als Werkzeug benötigt. Die entwickelten Signalverarbeitungsmethoden und das Framework pySPACE ist demnach weiträumig einsetzbar.</p>	
19. Schlagwörter Elektroenzephalogramm, Elektromyogramm, Embedded Brain Reading, Signalverarbeitung, mobile eingebettete Geräte, FPGA, Maschinelles Lernen	
20. Verlag geplant	21. Preis geplant

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title IMMI - Intelligent Man-Machine Interface	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Elsa Andrea Kirchner, Dr. Su-Kyoung Kim, Dr. Mario Michael Krell, Anett Seeland, Hendrik Wöhrle, Marc Tabie	5. end of project April 2015
	6. publication date planned
	7. form of publication planned
8. performing organization(s) (name, address) University of Bremen, Faculty 03, Robotics Lab, Robert-Hooke- Straße 1, D-28359 Bremen, Germany	9. originator's report no.
	10. reference no. 50RA1011
	11. no. of pages 80
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 97
	14. no. of tables 0
	15. no. of figures 5
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
<p>18. abstract</p> <p>Realtime analysis of biological data like the electroencephalogram (EEG) is a reference benchmark in the field of signal processing and pattern recognition. A reliable processing of non stationary data like the EEG is still an unsolved problem in basic research. Further, there is a lack of frameworks capable of efficient method development and comparative analysis as well as optimization of signal processing and classification methods. Moreover, there is a lack of methods which can adapt to the non stationary properties of biological data.</p> <p>Within the „IMMI“ project key technologies were expected to be developed which enable for realtime capable adaptive „Brain Reading“ (BR). BR is the analysis of brain activity with the aim of predicting mental states and intentions of a human. Systems with incorporated „adaptive Brain Reading“ (aBR) can further do a self adjustment to changing persons, in order to provide the best possible usability in the real world. The University of Bremen focused on the research related goals of the project:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Methods for realtime capable adaptive Brain Reading (aBR) for mental state detection and intention prediction in humans</li> <li>- New findings on functional relationships between perception, sensomotoric processing or movement planning</li> <li>- Extension of methodical approaches for the analysis of (brain-) data</li> </ul> <p>The following methods were used for reaching the goals:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Development of a signal processing and classification framework</li> <li>- Extensive acquisition of biological data within different application scenarios</li> <li>- Development and optimization of classifier and adaptive machine learning methods</li> <li>- Development of application scenarios in the field of space travel: operator observation and support</li> </ul> <p>The main results of IMMI are:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Development of „Embedded Brain Reading“ for robust and fault tolerant operator support based on the analysis of non stationary and non secure biological signals with the developed signal processing and classification framework pySPACE</li> <li>- Development of a novel and intelligent man-machine interface which not only allows interaction, but also adapts to the current abilities of the human in order to reduce overload and therefore enables a secure interaction and control with a low consumption of human resources (e.g. in orbit during a mission).</li> </ul> <p>The developments can potentially be transferred to several application fields, for example situation specific (adaptive) and mobile integrated realtime processing of robot sensor data, intuitive support of man-machine interfaces in manufacturing as well as robotic assisted rehabilitation. Whenever support based on human intentions is needed, the human intention has to be found in different signals from the human, the system and the interaction task. In this case, there is a need for powerful signal processing and classification frameworks. Therefore the developed signal processing methods as well as the pySPACE framework can be used in different fields.</p>	
19. keywords electroencephalogram, electromyogram, Embedded Brain Reading, signal processing, mobile embedded systems, FPGA, machine learning	
20. publisher planned	21. price planned