

Fahrer als Sensor (FaSor)

Gewährleistung und Erhöhung der Verkehrssicherheit durch
die Berücksichtigung des kognitiven Fahrerzustandes
für eine optimale Wirkungsweise von Fahrerassistenzsystemen

Ein interdisziplinäres Projekt zum Rahmenprogramm Mikrosysteme,
mit dem thematischen Schwerpunkt
„Mikrosystemtechnik für Fahrerassistenzsysteme“

Laufzeit: 1. November 2005 bis 31. März 2009

Schlussbericht des Fraunhofer-Instituts FIRST

Fraunhofer FIRST, Kekuléstr. 7, 12489 Berlin

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums
für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16SV2231 gefördert.



Inhaltsverzeichnis

Einleitung und Problemstellung.....	3
Thema des Verbundprojekts.....	3
Aufgabenstellung.....	3
Voraussetzungen.....	4
Planung und Ablauf.....	6
Teilprojekt 1: Neurophysiologische Grundlagen.....	6
Teilprojekt 2: Physiologische Messungen im Fahrzeug.....	6
Teilprojekt 3: Entwicklung der Messtechnik und Test der Fahrzeugtauglichkeit	7
Teilprojekt 4: Auswertung und Software zur Zustandserkennung.....	7
Teilprojekt 5: Systemintegration und reale Umsetzung.....	7
Teilprojekt 6: Ergonomie und Akzeptanz.....	7
Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	8
Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
Erzielte Ergebnisse.....	9
Datenanalyse und Methoden.....	10
Vorfilterung basierend auf Markern.....	11
Algorithmische Vorfilterung basierend auf ICA.....	12
Ereigniskorrelierte Potenziale (EKP).....	13
Analyse des Phasenraums.....	14
Ergebnis der Experimentreihen.....	15
Reaktionsverhalten auf visuelle Stimuli.....	16
Voraussichtlicher Nutzen.....	18
Fortschritt bei anderen Stellen.....	19
Projektbezogene Veröffentlichungen.....	20
Abbildungsverzeichnis.....	20
Tabellenverzeichnis.....	20

Einleitung und Problemstellung

Thema des Verbundprojekts

Das Thema des Verbundprojekts FaSor (Fahrer als Sensor) ist die verbesserte Fahrerunterstützung durch Fahrerzustandserkennung, genauer: die Entwicklung und Verifikation eines Systems zur kognitiven Fahrerzustandserkennung

- zur Erhöhung der Verkehrssicherheit durch eine optimierte Wirkungsweise von Fahrerassistenzsystemen und
- zur aktiven Unfallprävention.

Durch die zeitnahe Bestimmung des kognitiven Fahrerzustandes lässt sich ein gezielter situations- und fahrerangepasster Einsatz von Assistenzsystemen erreichen. Dadurch ergibt sich eine neue Qualität der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, die zu einem Paradigmenwechsel beim Einsatz von Fahrerassistenzsystemen führen könnte. Denn die Eingriffe solch eines neuen Sicherheitssystems, das sowohl situations- als auch fahrerangepasst ist, sind für den Fahrer besser nachvollziehbar, was eine erhöhte Akzeptanz und Marktpenetration dieser Systeme ermöglichen sollte.

Aufgabenstellung

Im Fokus unseres Forschungsvorhabens stand die Entwicklung von Systemen, Verfahren und Algorithmen zur Verbesserung der Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umfeld. Betrachtet man die Fähigkeiten des Menschen, sich in seiner Umwelt zurecht zu finden, komplexe Situationen in Sekundenbruchteilen wahrzunehmen, zu beurteilen und die der Situation angemessenen Schlüsse abzuleiten, so kann man aus regeltechnischer Sicht feststellen, daß der Mensch der komplexeste und zugleich der beste uns bekannte Sensor ist. Unter realistischen Umfeldbedingungen funktioniert die Perzeptions-Aktions-Schleife des Menschen jedoch keineswegs durchgehend fehlerfrei. Gründe dafür können zum Beispiel Ermüdung, hohe Beanspruchung u.ä. sein. Im automobilen Anwendungsbereich sind es die Fahrerassistenzsysteme, die die Aufgabe haben, kritische Situationen zu erkennen und unterstützend einzugreifen, um einem Fehlverhalten des Fahrers entgegenzuwirken und Fahrerdefizite zu kompensieren. Dabei spielt die Angemessenheit und die Art des Eingreifens eine zentrale Rolle.

Im vorliegenden Projekt wurde paradigmatisch das Ziel verfolgt, den Fahrer sowohl als Sensor als auch als Nutzer zu betrachten und ihn als solchen im Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umfeld optimal zu integrieren. Insbesondere sollte ein System entwickelt werden, mit dem der kognitive Zustand des Fahrers bestimmt werden kann, um anhand dieser Information die Wirkungsweise von Fahrerassistenzsystemen optimieren zu können. Dazu sollte eine neuartige Sensorik zur Bio-Signalerfassung entwickelt werden (ACTI-CAP des Projektpartners Brain Products GmbH), die eine robuste und ergonomische Messung neurophysiologischer Fahrerdaten (EEG) *im fahrenden Fahrzeug* ermöglicht. Die Elektroenzephalographie (EEG) erlaubt es dabei, mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zentralnervöse Korrelate kognitiver Zustände zu untersuchen. Mit diesem Verfahren ist es daher prinzipiell möglich, Aussagen über den kognitiven Fahrerzustand hinsichtlich Aufmerksamkeit, Beanspruchung

und Müdigkeit zu treffen. Eine zentrale Frage dieses Projekts war es, ob und mit welcher Aussagekraft eine Hirnstrommessung zur Fahrerzustandserkennung in der Praxis eingesetzt werden kann.

Das Projekt war auf folgende, wissenschaftlich-technische Forschungsschwerpunkte ausgerichtet:

- Entwicklung eines neuartigen, ergonomischen EEG-Systems für den automobilen Anwendungsbereich (ACTI-CAP).
- Exploration und Validierung von Meßtechniken zur Messung neurophysiologischer Fahrerparameter im automobilen Anwendungsbereich.
- Entwicklung von echtzeitfähigen Algorithmen und entsprechender Software zur Identifikation und Charakterisierung neuronaler Aktivitätsmuster und deren Zuordnung zu kognitiven Komponenten der Fahraufgabe. Ziel dabei war es, eine echtzeitfähige Merkmalsextraktion mit anschließender Charakterisierung kognitiver Zustände unter realen Verkehrsbedingungen zu realisieren.
- Entwicklung von Signalverarbeitungstechniken zur Analyse von Spontan-EEG-Daten außerhalb von Laborumgebungen.
- Experimentelle Erarbeitung eines Bewertungsschemas für kognitive Parameter aus neurophysiologischen Daten.
- Adaptive Signalverarbeitung und der Einsatz von Techniken des maschinellen Lernens zur Bestimmung des Fahrerzustandes.

Eine wichtige Aufgabe von Fraunhofer FIRST im Verbundprojekt FaSor war es, den anderen Projektpartnern (Brain Products GmbH, Idalab GmbH, Daimler AG, TU Berlin, Charité Universitätsmedizin Berlin) beim Einsatz moderner Verfahren der Merkmalsextraktion und des maschinellen Lernens zur Analyse von EEG-Daten beratend und unterstützend zur Seite zu stehen. Fraunhofer FIRST konnte auf diesem Gebiet eine umfangreiche Expertise aus Vorprojekten in das FaSor-Projekt einbringen. In den Bereichen EEG single-trial Analysetechnik, Signalverarbeitung und EEG-spezifische Merkmalsextraktion gehört FIRST seit vielen Jahren zu den international führenden Forschungsgruppen. Weitere Aufgaben von Fraunhofer FIRST im Projekt FaSor waren die Beratung bei der Entwicklung von Paradigmen für die psychophysiologischen Experimente, insbesondere im Hinblick auf ihre Auswertbarkeit mit maschinellen Methoden, sowie die Unterstützung der Projektpartner bei der Auswertung der Ergebnisse.

Voraussetzungen

Das Projekt wurde im Verbund mit anderen Projektpartnern durchgeführt. Diese waren die Brain Products GmbH, die Idalab GmbH, die Daimler AG, die TU Berlin und die Charité Universitätsmedizin Berlin. Voraussetzung für die Durchführung der Experimente war die Beschaffung eines Versuchsträgers (PKW) mit den entsprechenden Meßeinrichtungen auf Seiten der Daimler AG, sowie die Zurverfügungstellung eines EEG-Meßsystems mit aktiven Elektroden seitens der Brain Products GmbH. Hinsichtlich des zu entwickelnden EEG-Systems (ACTI-CAP) war es das Ziel, mit Hilfe eines neuen mi-

krosystemtechnischen Ansatzes (aktive Elektroden) und unter Berücksichtigung ergonomischer und automobiler Randbedingungen, eine bestmögliche Qualität und Robustheit der neurophysiologischen Signalmessung im automobilen Anwendungsbereich bereitzustellen.

Planung und Ablauf

Das Projekt wurde gemeinsam mit den anderen Partnern in Teilprojekte und in eine Vielzahl von Arbeitspakete unterteilt. Diese wurden auch im Wesentlichen wie geplant umgesetzt. Allerdings hat sich während der Projektdurchführung herausgestellt, dass deutlich mehr Zeit für die Experimentreihen und die Datenanalyse benötigt wird, als ursprünglich geplant war. Deshalb wurde auf die Umsetzung eines Demonstrators verzichtet. Stattdessen wurden zwei zusätzliche Laborexperimentreihen durchgeführt. Insgesamt wurden im Rahmen des Projekts damit drei Experimentreihen im Fahrzeug (bei der Daimler AG) und zwei Experimentreihen im Labor (bei der TU Berlin) durchgeführt. Die Auswertung der dabei anfallenden Daten fiel in das Arbeitsgebiet der Partner TU Berlin und Idalab GmbH, die dabei von Fraunhofer FIRST einerseits beratend und andererseits durch eigene Auswertungen unterstützt wurden.

Teilprojekt 1: Neurophysiologische Grundlagen

Bei der Entwicklung der psychophysiologischen Paradigmen für die durchgeführten Versuchsreihen, bestand die Rolle von Fraunhofer FIRST darin, die Randbedingungen im Hinblick auf die Auswertbarkeit mit maschinellen Methoden zu spezifizieren. Des Weiteren wurde, gemeinsam mit den Projektpartnern Charité, TU Berlin und Daimler AG, die Auswertung der Versuchsreihenergebnisse durchgeführt und das Ergebnis auf seine Relevanz für den automobilen Anwendungsbereich hin untersucht.

Teilprojekt 2: Physiologische Messungen im Fahrzeug

Kernstück des gesamten Projekts waren drei Versuchsreihen im Fahrzeug mit jeweils vorangegangenen Pilotstudien. In den Pilotstudien wurden die technischen Komponenten bzw. Elemente des Versuchsablaufs auf ihre Funktions- bzw. Wirkungsweise hin überprüft. Die Durchführung der Versuchsreihen und Pilotstudien oblag federführend der Daimler AG und war mit folgenden, für jede der Versuchsreihen wiederkehrenden Arbeitsschritten verbunden:

- Rekrutierung der Versuchspersonen. Hierzu zählte das eigentliche Anwerben durch Aushänge, anschließend das Probanden-Screening, das der Auswahl einer homogenen Stichprobe diente, sowie die Datenverwaltung der Versuchsteilnehmer und das Anberaumen von Terminen für die Versuchsdurchführung.
- Die jeweils im Vorfeld einer jeden Versuchsreihe gemeinsam mit den in diesem Arbeitspaket beteiligten Projektpartnern entwickelten psychophysiologischen Paradigmen wurden im Fahrzeug mithilfe verfügbarer bzw. eigens dafür entwickelten Hard- und Software implementiert. Dazu gehörte die Erstellung des Stimulus-Materials ebenso wie die Programmierung von Stimulus-Abfolgen und die Protokollierung aller relevanten Ereignisse, einschließlich der Verhaltensantworten der Versuchspersonen.
- Die eigentliche Durchführung des Experiments im Feld beinhaltete die Betreuung der Versuchspersonen vor, während und nach der Messung, die Leitung des Versuchs (Instruktion der Versuchspersonen, Bestimmung und Überwachung des zeitlichen und technischen Ab-

laufs) und die Erhebung, Sicherung, Aufbereitung und Archivierung der Daten. Teil der Versuchsdurchführung war auch das Erkennen von Nachbesserungsbedarf bei der praktischen Durchführung und das Erstellen entsprechender Verbesserungsvorschläge.

- Nach Abschluss der Messphase erfolgte die maschinelle Auswertung, sowie die Interpretation und Diskussion der erhobenen Daten und Ergebnisse gemeinsam mit allen Projektpartnern.

Teilprojekt 3: Entwicklung der Messtechnik und Test der Fahrzeugtauglichkeit

Es wurde die jeweils jüngste Generation der von Brain Products entwickelten Elektrodenhauben in das Versuchsfahrzeug integriert, Testmessungen damit durchgeführt und anhand der gemeinsam ausgewerteten Daten beurteilt, an welchen Stellen Nachbesserungen nötig sind. Die entsprechenden Vorschläge wurden dann im Versuchsträger umgesetzt.

Teilprojekt 4: Auswertung und Software zur Zustandserkennung

Bei der Softwareentwicklung für die Datenanalyse und Signalverarbeitung, sowie bei der Auswertung der Daten, bestand die Aufgabe für Fraunhofer FIRST darin, die anderen Projektpartner beim Einsatz von Verfahren des maschinellen Lernens und der Merkmalsextraktion zu beraten und zu unterstützen. Es wurden robuste maschinelle Lernmethoden und Signalverarbeitungstechniken eingesetzt und an die Problemstellung adaptiert, so dass komplexe, unstrukturierte und multivariate Sensordaten effizient analysiert werden konnten. Darüber hinaus wurden von FIRST auch eigene Auswertungen der Daten vorgenommen, mit denen klassische neurophysiologische Effekte nachgewiesen werden konnten.

Teilprojekt 5: Systemintegration und reale Umsetzung

Gemäß des Projektziels, die Messtechnik nicht nur im Labor, sondern in einem Fahrzeug zu untersuchen, wurde ein Versuchsträger (PKW) seitens der Daimler AG aufgebaut und mit fahrzeugtauglicher Messtechnik ausgerüstet. Als Versuchsträger wurde eine Mercedes-Benz S-Klasse (W221) verwendet, da in diesem Modell alle bereits serienmäßig verfügbaren technischen Lösungen der Daimler AG Fahrzeugflotte vorhanden sind und es somit die optimale Grundlage für die im Rahmen dieses Projekts zusätzlich integrierten Innovationen bildete.

Teilprojekt 6: Ergonomie und Akzeptanz

Auf Seiten der Brain Products GmbH wurden kontinuierliche Nachbesserungen des ACTI-CAP Systems hinsichtlich Ergonomie und Robustheit aufgrund von Nachbesserungsvorschlägen gemacht, die sich aus der Benutzung des Systems während der Projektlaufzeit ergaben.

Wissenschaftlicher und technischer Stand

Bisherige Ansätze einer Untersuchung der Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Straßenverkehrssituation basierten vor allem auf indirekten Maßen, wie z.B. dem Fahrerverhalten (insbesondere Lenkrad-, Gaspedal-, Bremspedalaktivitätsmuster, etc.). Grund dafür ist das Fehlen geeigneter Sensorik, die es erlauben würde, zuverlässig, robust, kontaktfrei und ergonomisch kognitive Fahrerzustände zu messen. Des Weiteren fehlt allerdings auch das Wissen hinsichtlich echtzeitfähiger kognitiver Zustandsindikatoren im EEG in Echtwelt-Fahrszenarien. Der Vorteil des im Projekt erarbeiteten Ansatzes gegenüber bisherigen Verfahren liegt darin, dass neurophysiologische Parameter wesentlich unmittelbarer mit kognitiven Zuständen des Fahrers zusammenhängen als indirekte Verfahren (Verhalten, Lid-schluss, etc.), bei denen das Risiko von Fehlinterpretationen folglich größer ist.

Bisherige neurophysiologische Studien sind zumeist auf eine Laborumgebung beschränkt. Vorexperimente der Daimler AG zeigten, dass Ergebnisse von Laborexperimenten auf praktische Szenarien, etwa in Fahrzeugen, nur bedingt übertragbar sind. Deshalb bieten die vorliegenden Projektergebnisse im Vergleich zu bisherigen Ansätzen den wesentlichen Vorteil einer hohen ökologischen Validität, da sie aus Studien unter realen Fahrbedingungen stammen.

Die Ausgangslage für die Datenanalyse bildeten unsere Vorarbeiten im Bereich des maschinellen Lernens und der Analyse von EEG-Daten. In gemeinsamen Studien mit der Daimler AG konnte im Herbst 2004 erstmalig gezeigt werden, daß sich kognitive Fahrerzustände (in dem Fall ging es um die mentale Belastung) mittels EEG unter realen Fahrbedingungen und in Echtzeit identifizieren und hinsichtlich ihrer Qualität differenzieren lassen. Besondere Bedeutung für das FaSor Projekt haben auch unsere Vorarbeiten auf dem Forschungsgebiet der Brain-Computer Interfaces (BCI), welche die single-trial Analyse von EEG-Daten wesentlich vorangetrieben haben (Projekt Berlin Brain-Computer-Interface (BBCI)). Zum Projektstart betrat das FaSor Verbundprojekt aus technischer Sicht jedoch Neuland - auch international war kein vergleichbares Vorhaben bekannt, das mit EEG-Experimenten im Fahrzeug die FaSor-Fragestellungen nach einer EEG-basierten Analyse von Aufmerksamkeits- und Reaktionsfähigkeiten des Fahrers behandelte. Schutzrechte wurden dabei nicht verwendet. Die relevante Fachliteratur wurde während der Projektlaufzeit vorwiegend aus Internetdatenbanken wie citeseer und Google Scholar bzw. direkt bei den Onlineangeboten der relevanten Fachzeitschriften eingeholt (z.B. IEEE, Springer, Elsevier).

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen als den Projektpartnern hat nicht stattgefunden.

Erzielte Ergebnisse

Die Erkennung von attentiven vs. nicht-attentiven Fahrerezuständen aus dem EEG des Fahrers stellt eine große Herausforderung dar, da in diesem “real life” Szenario eine große Menge von technischen Artefakten und auch Bewegungsartefakten zu kompensieren sind, die in Standardaufnahmen im EEG-Labor nicht vorkommen. Diese Aufgabenstellung wurde in einer Reihe von drei Versuchen im Fahrzeug (Season 1, 2, 3) und zwei Laborexperimenten (LCT1 und LCT2) schrittweise konkretisiert, um möglichst spezifische, aber auch anwendungsrelevante Probleme untersuchen zu können. Die Versuchsaufbauten erfuhren dabei eine schrittweise Verfeinerung, die auf den Ergebnissen der vorangegangenen Reihen basierten. Einen wesentlichen Beitrag zur Verfeinerung der Experimente hatten statistische Auswertungen und Auswertungen mit Methoden des maschinellen Lernens, die konsequent nach jeder Versuchsreihe angewendet und kontinuierlich algorithmisch verbessert wurden. Hier ein Überblick über die fünf wichtigsten Versuchsaufbauten:

Ver-suchsauf-bau	Durchfüh-rung	Beschreibung	Bewertung, Verbesserung gegen-über dem vorherigem Ver-suchsaufbau
Season 1	Fahrzeug	Allgemeine Aufmerksamkeitsunter-suchungen. Visuelle Primäraufgabe, häufige auditorische sekundäre Re-aktionszeitaufgabe (RZA) erfordert Fingerbewegung	Untersuchung zweier konkurrieren-der Modalitäten (visuell / audito-risch).
Season 2	Fahrzeug	Allgemeine Aufmerksamkeitsunter-suchungen. Visuelle Primäraufgabe, häufige auditorische sekundäre RZA	Verwendung eines neuartigen EEG Elektrodentyps (ACTI-CAP) mit akti-ven Elektroden zur Reduktion von Bewegungsartefakten
LCT1	Labor	3 Konditionen mit 1) Rein auditorischer RZA 2) audit. RZA und visueller Hinter-gundtask 3) Visuelle Primäraufgabe und selte-ner auditorischer sekundärer RZA	Reduktion der Aufgabenkomplexität und der Bewegungsartefakte durch Übergang ins EEG-Labor. Verstär-kung des Odball-Effekts der auditori-schen RZA durch Verringerung der Reizhäufigkeit
Season 3	Fahrzeug	3 Konditionen mit 1) Rein auditorischer RZA 2) audit. RZA und visueller Hinter-gundtask 3) Visuelle Primäraufgabe und selte-ner auditorischer sekundärer RZA	Übertragung der LCT1 ins Fahr-zeug, mit seltenen auditorischen RZA.
LCT2	Labor	2 Konditionen mit: 1) Rein visueller RZA, erfordert Bremsbewegung des Fußes 2) Kombination aus visueller RZA und visueller Spurhalte- und -wech-selaufgabe	Übertragung auf visuell-visuell kon-kurrenzierende Aufgabenstellungen, wie sie in Echtfahrsituationen auftreten: langzeitige visuelle Fahraufgabe (Spurhaltung und -wechsel), sowie seltene RZA bei Bremslichtreiz.

Tabelle 1: Übersicht über die durchgeführten Experimentreihen

Fraunhofer FIRST hat seine langjährige Expertise im Bereich EEG-Analyse und Brain-Computer-Interfaces in die Planung der Experimentreihen und in die Analyse der in den Experimenten erhobenen EEG-Daten eingebracht. Zur Analyse der Daten wurden den Projektpartnern eigenentwickelte Software-Tools zur Benutzung zur Verfügung gestellt. Diese haben eine zielgerichtete Datenanalyse im Hinblick auf die Erkennung fahrerzustandsbezogener EEG-Korrelate wesentlich erleichtert. Vorhandenes Know-how über die methodisch korrekte Auswertung von EEG-Daten wurde ebenso in das Projekt eingebracht. Darüber hinaus wurden eigenentwickelte Datenanalysemethoden auf die Daten der ersten zwei Experimentreihen angewandt. Es konnte dabei gezeigt werden, dass die effektive Dimensionalität der aufgenommenen EEG-Daten vergleichsweise klein ist und der restliche Datenraum im wesentlichen aus nichtdiskriminativen Komponenten („Rauschen“) besteht. Dies rechtfertigt die Verwendung von Modellen mit niedriger Komplexität (also ggf. auch lineare Modelle) zur Erkennung des Fahrerzustands. Diese Analyse bestätigte auch die empirische Erfahrung der Projektpartner, dass häufig lineare Modelle zur EEG-Datenanalyse ausreichen und dass sich die Ergebnisse oftmals nicht durch komplexere, nichtlineare Modelle weiter verbessern lassen. Dennoch gelang es uns in diesem Projekt auch nichtlineare Modelle erfolgreich einzusetzen (ICA Artefaktbereinigung, siehe weiter unten).

Datenanalyse und Methoden

Das Ziel der Datenanalyse war es, die im Experimentaufbau provozierten, unterschiedlichen Fahrerzustände (z.B. die Fähigkeit zu schnellen Reaktionen vs. zu langsame Reaktionen) im EEG der Versuchspersonen zu erkennen. Deskriptive Merkmale des EEGs sind bei solch neuartigen Fragestellungen a priori nicht bekannt und müssen aus dem hochdimensionalen Signalgemisch des EEGs so extrahiert werden, dass sich damit quantitative Aussagen in der Gruppenstatistik ableiten lassen oder gar die Vorhersage im Single-Trial möglich wird. Dafür wurde im Laufe des Verbundprojekts die Menge an algorithmischen Methoden stückweise erweitert, um deskriptive Merkmale aus sehr verschiedenen EEG-Repräsentationen ableiten zu können. Dies umfasst u.a. die Analyse von ereigniskorrelierten Potentialen (EKP) des EEG, genauso wie Frequenzanalysen in spezifischen sensorischen Arealen, allgemeine Frequenzanalysen wie ERD (Event-related Desynchronization), sowie die Schärfung räumlicher Filter durch Methoden des maschinellen Lernens (insbesondere durch Varianten der CSP Methode (Common Spatial Patterns)).

Besonders hervorzuheben sind Methoden, um der diversen Artefakte im EEG Herr zu werden, die bei Messungen insbesondere im Fahrzeug in den Daten präsent sind, die aber auch für Laborexperimente in verminderter Form auftraten. Es hat sich im Laufe des Projekts herausgestellt, dass dazu ein vorangehender zusätzlicher Vorverarbeitungsschritt eingeführt werden musste. Als bestmögliche Artefaktbereinigung hat sich im Laufe der Studie eine Kombination aus zwei Techniken herauskristallisiert:

1. eine Vorfilterung basierend auf einer Analyse der Fahrstrecke anhand von Markern, der EMG-Signale, etc., und
2. eine algorithmische Filterung der Daten basierend auf einer Independent Component Analysis (ICA). Es wurde eine Unterscheidung von physiologisch plausiblen und unplausiblen Quellen und Frequenzbereichen getroffen. Nur die plausiblen Quellen des EEG wurden für die weitere Analyse betrachtet.

Vorfilterung basierend auf Markern

Die folgende Abbildung 1 zeigt repräsentativ für eine Versuchsperson und etwas mehr als 200 Minuten Aufnahmedauer (horizontale Achse) die Markierung von zur Auswertung ungeeigneten Zeitabschnitten anhand von 8 verschiedenen Merkmalen. Einige der Markierungen wurden vom Versuchsleiter manuell während des Experiments gesetzt. Sie zeigen besondere, von der normalen, intendierten Versuchsumgebung abweichende Ereignisse an. Dies sind zum Beispiel das Verlassen der Autobahn („off_hw“) oder ein Verkehrsstau („t_jam“). Andere Markierungen wurden automatisch durch die maschinelle Erkennung von überschrittenen Toleranzwerten („var_threshold“, „ica_threshold“) generiert.

In der Abbildung wird deutlich, dass substantziell lange Zeitabschnitte der Messung im Fahrzeug nicht zur Analyse der Daten herangezogen werden konnten. Diese Vorfilterung der Daten wurde für alle durchgeführten Fahrexperimente ausgeführt.

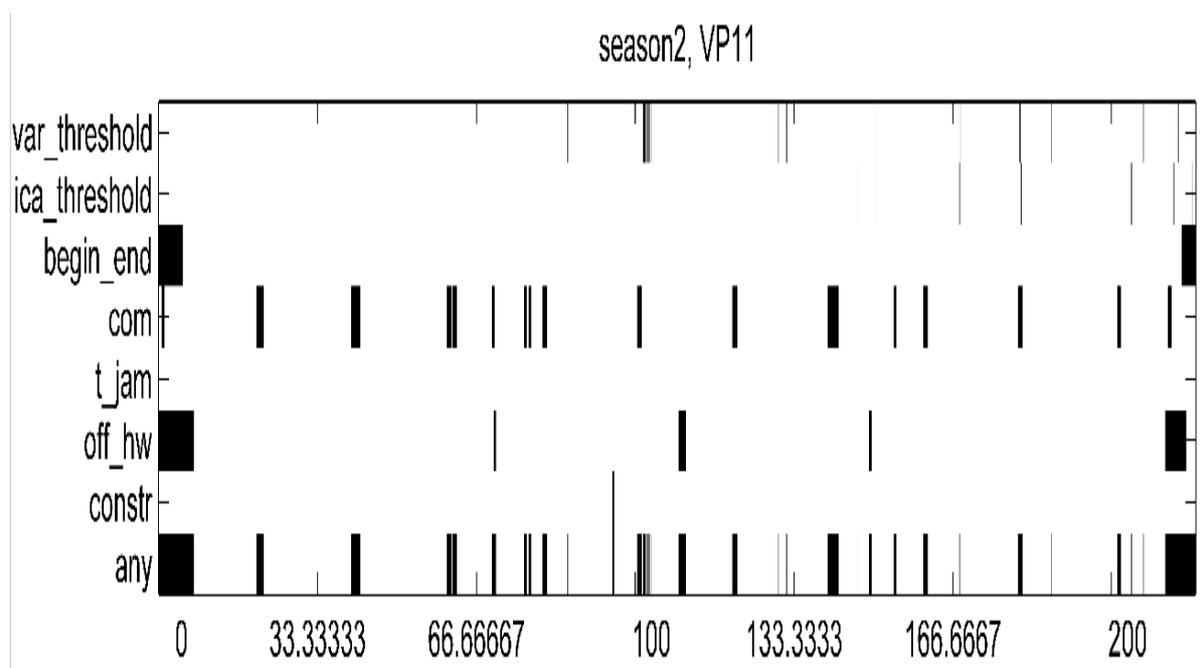


Abbildung 1: Beispiel für eine durch automatische und von Hand gesetzte Marker strukturierte EEG-Messfahrt von etwas mehr als 200 Minuten. Schwarze Abschnitte stellen das Auftreten eines bestimmten Ausnahmeereignisses dar, die unterste Zeile („any“) stellt die Zusammenfassung aller aufgetretenen Ausnahmeereignisse dar.

Algorithmische Vorfilterung basierend auf ICA

Für diesen Vorverarbeitungsschritt wurden Varianten der ICA (Independent Component Analysis) herangezogen, die in unserer Arbeitsgruppe entwickelt worden sind. Sie erlauben die Aufteilung des EEG-Signalraums in unabhängige Unterräume, in denen dann sowohl Artefakte als auch neuronale EEG-Signale erkannt und entsprechend entweder herausgefiltert (im Fall von Artefakten) oder im Gesamtsignal erhalten werden können (im Fall neuronaler Aktivität). Dabei wurde im Rahmen des FaSor-Projekts eine automatisierte Klassifikationsmethode entwickelt, welche die zeitraubende manuelle Auswertung der oft mehrere hundert Unterräume umfassenden ICA-Zerlegung in Artefakte und Nichtartefakte durch einen Experten unnötig macht. Abbildung 2 zeigt beispielhaft drei Unterräume, die per ICA aus insgesamt 30 Dimensionen gewonnen wurden. Basierend auf Trainingsdaten, die manuell von Experten ausgewertet worden waren, konnte ein Klassifikator entwickelt werden, der Artefaktkomponenten mit der gleichen Zuverlässigkeit (automatisch) erkennt, wie ein Experte (manuell). Für die Klassifikation wurde eine nichtlineare Support Vektor Maschine (SVM) trainiert, die auf Merkmalen der Zeit- und Frequenzdomäne, auf geschätzten Verteilungen der Quellen und auf räumlichen Musterverteilungen basiert. Diese allgemein verwendbare Methode wurde im Sommer 2009 erfolgreich publiziert (Tangermann et al., 2009).

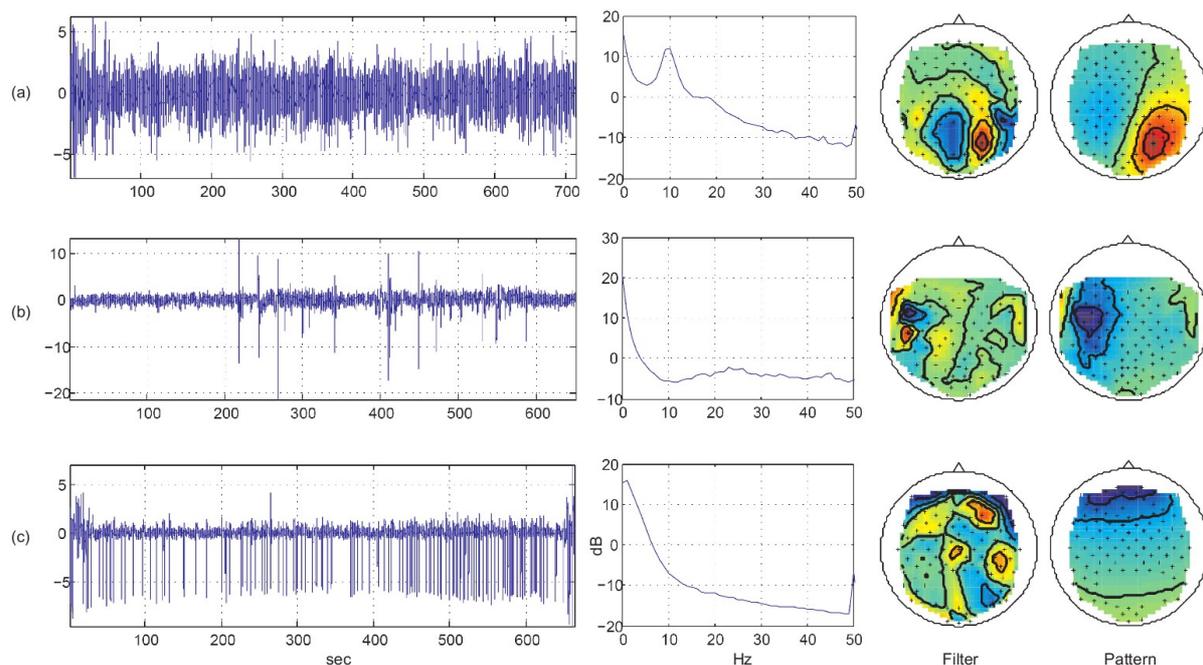


Abbildung 2: Signal (erste Spalte), Spektrum (zweite Spalte), Filterkarte (dritte Spalte) und Muster (vierte Spalte) von drei ICA Komponenten. Die erste Reihe (a) zeigt eine neurophysiologisch bedeutsame Alpha-Quelle des Okzipitallappens (Nutzsignal). Die zweite Reihe (b) zeigt eine seltene, aber starke Muskelartefaktkomponente mit erhöhter spektraler Energie in hohen Frequenzen. Die dritte Zeile (c) zeigt eine Augenartefaktkomponente, die regelmäßig auftritt, in niederen Frequenzen erhöhte Aktivität aufweist und ein typisches Muster mit frontalem Schwerpunkt aufweist.

Ereigniskorrelierte Potenziale (EKP)

Zur Validierung des experimentellen Designs der Laborexperimente wurden von Fraunhofer FIRST ereigniskorrelierte Potenziale im EEG untersucht (P300 Amplitude und Latenz, sowie N100, siehe Abbildung 3). Dabei konnte, wie erwartet, eine (Anti-)Korrelation zwischen gemittelten P300 Amplituden und der Reaktionszeit festgestellt werden: je größer die gemessene P300 Amplitude, desto schneller war die Reaktionszeit (Abbildung 4). Dieser Zusammenhang lässt sich jedoch zur Fahrerzustandsüberwachung in der Praxis nicht verwenden, da im Auto auf künstlich induzierte Stimulus-Ereignisse verzichtet werden muss. Das Ergebnis zeigt jedoch, dass sich dieser bekannte Effekt in unserem Laborexperiment reproduzieren ließ. Damit wurde bestätigt, dass der Experimentaufbau prinzipiell geeignet ist, Reaktionszeitveränderungen des Probanden allein aus dem EEG zu erkennen. (Anm.: Korrelationen bezüglich der *P300 Latenz* oder der *N100* waren nur sehr schwach oder nicht vorhanden.)

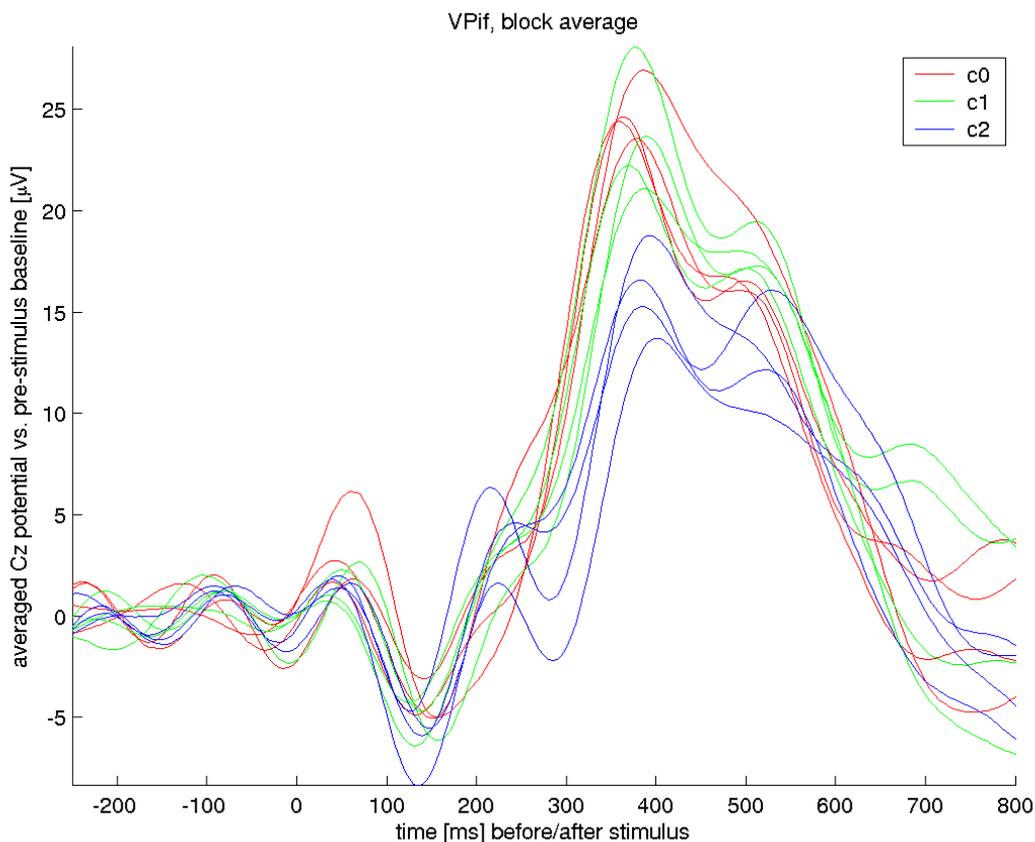


Abbildung 3: Über einzelne Versuchsabschnitte gemittelte EEG-Amplitude (stimulus-aligned), gemessen an der zentralen Cz-Elektrode einer Versuchsperson. Klar zu erkennen ist die typische N100 Negativierung nach 100 ms, sowie die positive P300 Amplitude nach 300 ms.

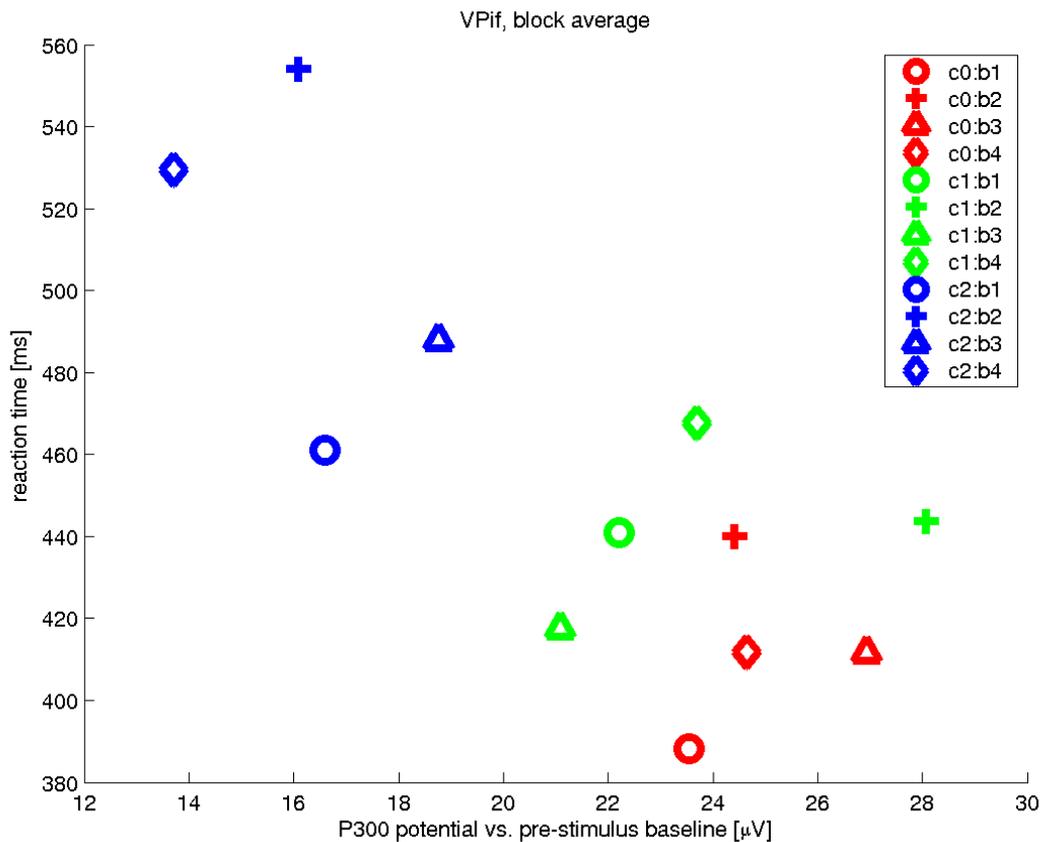


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen P300 Amplitude und Reaktionszeit eines Probanden. In der Tendenz ergibt sich folgender Zusammenhang: Je größer die P300, desto kürzer die Reaktionszeit. Blaue Symbole bezeichnen das Ergebnis aus vier Versuchsblöcken mit erhöhter Aufmerksamkeitsbelastung bei der Fahrsimulation, grüne Symbole bezeichnen eine mittlere Belastung und rote eine geringe Belastung.

Analyse des Phasenraums

Von Fraunhofer FIRST wurde ein eigenentwickelter Algorithmus zur Datensegmentation auf die Daten der Experimentreihen angewendet, der Veränderungen im Phasenraum der EEG-Zeitreihen selbstständig detektiert und segmentiert. Damit konnte gezeigt werden, dass es keine signifikanten Langzeit-Veränderungen der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion im Phasenraum der untersuchten EEG-Zeitreihen gibt (Abbildung 5). Aus diesem Resultat ergibt sich, dass man nur mit einer möglichst spezifischen Betrachtung von

1. ausgewählten (neurophysiologisch sinnvollen) Frequenzbändern (wie sich herausstellte insbesondere dem Alpha-Band zwischen 7 und 14 Hz) in
2. räumlich eingegrenzten Hirnarealen

einen EEG-basierten Indikator für Veränderungen des Fahrerzustands erhalten kann. Dieser Ansatz führte schliesslich zu dem im folgenden beschriebenen Ergebnis.

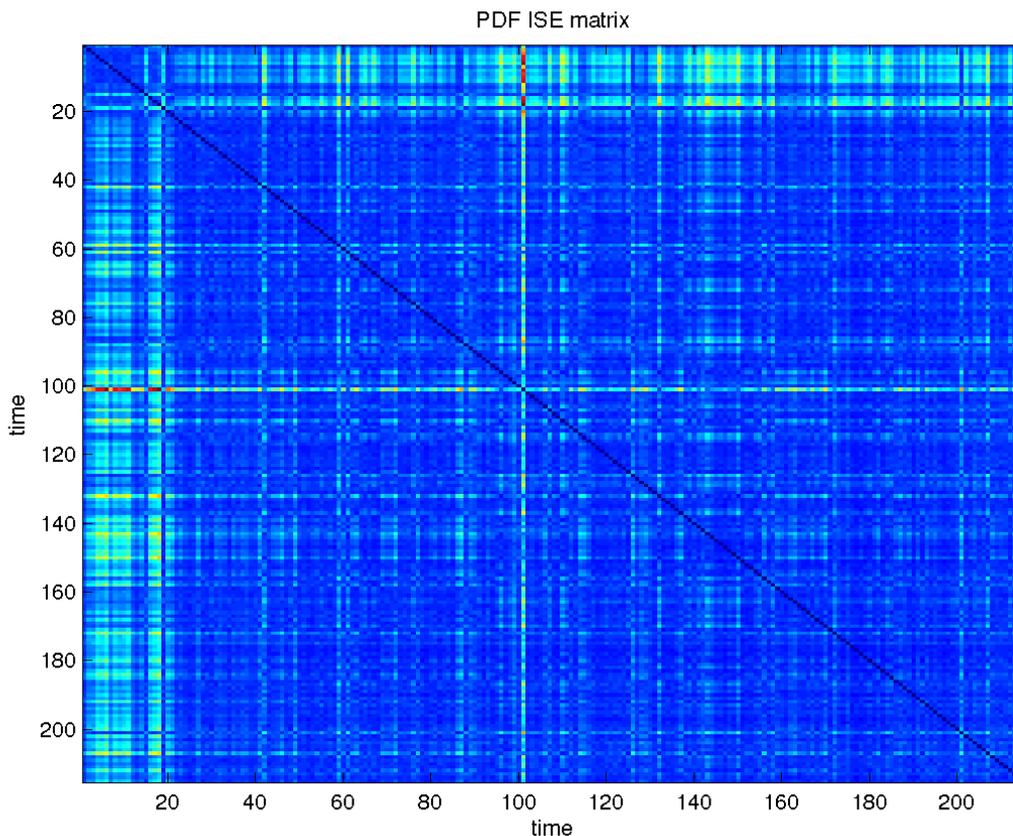


Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung der Veränderung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des EEGs im Phasenraum. Dargestellt ist der paarweise Abstand aller geschätzten Dichtefunktionen in einem Zeitraum von etwas mehr als 200 Minuten einer Messfahrt der Season 2. Die Farbe blau zeigt einen geringen Abstand, d.h. eine große Ähnlichkeit und damit wenig Veränderung, rot einen großen Abstand an. Nur zu Beginn der Fahrt (und kurzzeitig nach 100 Minuten) wird eine Veränderung der EEG Dynamik angezeigt, während eines Großteils des Fahrexperiments wird jedoch keine signifikante Veränderung der EEG Dynamik festgestellt.

Ergebnis der Experimentreihen

Die statistische Analyse ergab einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Reaktionszeit der Probanden und der Prä-Stimulus Alpha-Aktivität im Band zwischen 7 und 14 Hz im parieto-okzipitalen Bereich (Abbildung 6). Eine schnelle Tastenreaktion auf den auditiven Stimulus konnte im Mittel dann erfolgen, wenn dem Stimulus eine Phase von ca. 3 Sekunden mit vergleichsweise höherer Alpha-Aktivität vorangeht, während langsameren Reaktionen im Mittel eine niedrigere Alpha-Aktivität vorangeht. Dieser durch statistische Mittelung gefundene Effekt wurde im Grand-Average über alle 11 Versuchspersonen (eine Ausreißer-VP wurde in der Vorverarbeitung entfernt) als statistisch signifikant nachgewiesen und in (Schubert et al., 2008) publiziert. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass schnelle Reaktionen auf auditorische Reize möglicherweise nur bei einer reduzierten visuellen Verarbeitungsleistung möglich sind, wie sie durch die höhere Alpha-Aktivität angezeigt wird.

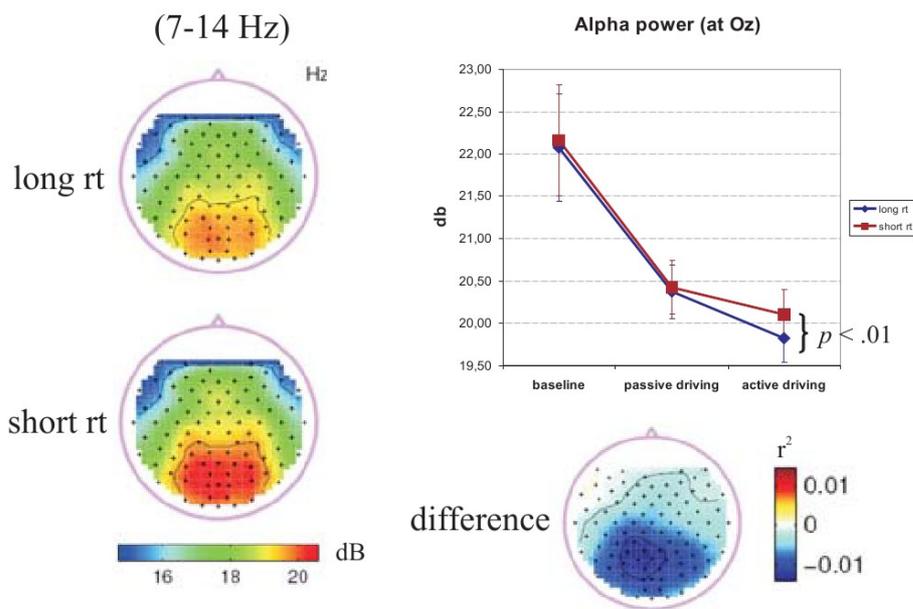


Abbildung 6: Vergleich der Alpha-Aktivität für Situationen mit langen Reaktionszeiten und Situationen mit kurzen Reaktionszeiten. Schnelle Reaktionen auf auditorische Reize gehen mit erhöhter okzipitaler Alpha-Aktivität einher, was auf eine geringere visuelle Reizverarbeitung hindeutet.

Die Analyse der Variabilität der Reaktionszeiten im zeitlichen Verlauf durch eine Kreuzkorrelation zeigt, dass im Mittel die Reaktionszeiten schon zwischen zwei benachbarten Stimuli stark unterschiedlich ausfallen. Die neurologischen Prozesse, welche zu dem oben beschriebenen Effekt führen, werden aufgrund dieses Ergebnisses als sehr transient und kurzlebig angesehen. Diese Erkenntnis sollte im Design von nachfolgenden Experimentreihen berücksichtigt werden.

Reaktionsverhalten auf visuelle Stimuli

Basierend auf den Ergebnissen von LCT1 und Season 3 wurde eine weitere Verbesserung des Versuchsparadigmas vorgenommen. Im Design des Laborversuchs LCT2 wurden zusätzlich zu den fahrrelevanten visuellen Stimuli im Fahrsimulator (Spurwechselanweisungen) nun die Reaktionsfähigkeit der Probanden auf ebenfalls *visuelle Stimuli* (simuliertes Bremsleuchten eines voranfahrenden Fahrzeugs) untersucht. Diese Aufgabe ersetzte das in allen bisherigen Studien genutzte auditorische oddball-Paradigma, d.h. anstatt der bisher auftretenden Konkurrenz zwischen visuellen und auditorischen Reizen wurde nun eine Konkurrenzsituation zwischen zwei visuellen Reizen induziert, von denen nur einer (Bremslicht) wirklich sicherheitsrelevant ist. Da beide Reize vom gleichen kognitiven System (visueller Kortex) verarbeitet werden müssen, ist dieser Ansatz eine interessante Abgrenzung zum bisher verwendeten Paradigma. Auch eine Validierung der zuvor erzielten Ergebnisse war möglich. Diese besagten, dass langsame Reaktionszeiten (auf den auditorischen Reiz hin) mit einem stärker suprimierten okzipitalen alpha-Rhythmus (Prä-Stimulus) einhergehen, was durch eine starke Konzentration auf parallel stattfindende visuelle Eindrücke erklärt werden kann. Dieser Effekt kann im rein visuellen Setting aber ausgeschlossen werden. Vielmehr würde eine starke Fokussierung auf den visuellen Eingabekanal hier eine beschleunigte Reaktionszeit

begünstigen. Als Hypothese für LCT2 konnte somit eine Umkehr des zuvor gefundenen Zusammenhangs zwischen Reaktionszeit und okzipitalem alpha-Rhythmus formuliert werden. Tatsächlich zeigte dann eine Gruppenanalyse der in LCT2 gewonnenen Daten deutlich den vorhergesagten Effekt: die Reaktionszeit (bezogen auf das Aufleuchten des Bremslichtes) war positiv mit der Stärke des EEG alpha-Rhythmus korreliert.

Voraussichtlicher Nutzen

Bisherige Ansätze zur Untersuchung der Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeugsystemen und Straßenverkehrssituationen basieren vor allem auf indirekte Maße, wie, z.B., dem Fahrerverhalten, Fragebögen, der Performanz von Zweitaufgaben, etc. Die Untersuchung kognitiver Prozesse als Grundlage des Fahrerverhaltens (sensorische Verarbeitung, Entscheidungsfindung, Müdigkeit, Vigilanz, etc.) scheiterten zum einen am Fehlen geeigneter Sensorik, die es erlauben würde, zuverlässig, robust und ergonomisch kognitive Fahrerzustände unter realen Straßenverkehrsbedingungen zu messen. Zum anderen war dieses Scheitern einem fehlenden neurophysiologischen Wissen bezüglich kognitiver Fahrerzustände unter realen Straßenverkehrsbedingungen geschuldet. Im vorliegenden Projekt sind wir deshalb beide Ursachen angegangen.

Innerhalb des ersten Projektschwerpunkts wurden die vom Projektpartner Brain Products GmbH entwickelten, artefaktarmen EEG-Elektroden auf ihre Eignung für einen längeren Einsatz im Fahrzeug hin getestet (ca. acht Stunden). Das Ergebnis der Testmessungen, die in einem eigens für diese Zwecke aufgebauten Versuchsträger durchgeführt wurden, wurde in einem iterativen Ansatz dem Projektpartner zurückgemeldet, der die Verbesserungsvorschläge zügig umsetzen konnte. Zum Projektende stand schließlich eine neue EEG-Elektroden-Generation zur Verfügung, die die zu Projektbeginn formulierten Anforderungen erfüllte. Die neue Elektroden-Generation erlaubt eine robustere Datenerfassung im Fahrzeug mit reduzierter Artefaktanfälligkeit und bietet eine deutlich verbesserte Ergonomie sowohl für den Fahrer (Tragekomfort) als auch bezüglich der Anbringung der EEG-Sensoren (geringe Vorbereitungszeit und einfache Handhabung). Dadurch ist ein intensiver Einsatz dieses Systems im Rahmen der Entwicklung und Validierung von Fahrerassistenzsystemen möglich. Die neue EEG-Sensorik wird von der Daimler AG auch nach Ende des Projekts zur Identifikation kritischer Situationen eingesetzt, die für die Aufmerksamkeit des Fahrers besonders beanspruchend sind und in denen der Fahrer durch Assistenzsysteme unterstützt werden soll.

Der zweite Projektschwerpunkt befasste sich mit der Identifikation neurophysiologischer Korrelate der Aufmerksamkeit des Fahrers. Dazu wurde neben Laborversuchen auch eine Reihe von Fahrversuchen durchgeführt, in denen das Fahrer-EEG während längerer, monotoner Tagfahrten auf einer verkehrsfreien Autobahn aufgezeichnet wurde. Zusätzlich zur Aufzeichnung des EEGs wurden dabei auch psychophysikalische und subjektive Fahrermaße erhoben, sowie Fahrzeugdaten synchron zu den anderen Datenströmen aufgezeichnet. Zusammengefasst weisen die Ergebnisse darauf hin, dass ein Zusammenhang zwischen den Reaktionszeiten und dem im prä-stimulus-EEG ablesbaren alpha-Rhythmus des Fahrers existiert, der grundsätzlich für die Nutzung in Fahrerassistenzsystemen herangezogen werden kann. Allerdings ist dieser Zusammenhang abhängig von der Art des Reizes, sowie von der momentanen Aufmerksamkeitsfokussierung des Anwenders. Grundsätzlich gilt, dass ein bereits bestehender Aufmerksamkeitsfokus die Verarbeitung von Stimuli der entsprechenden Modalität begünstigt. Unter der Annahme, dass das Gros der sicherheitsrelevanten Informationen beim Autofahren über den visuellen Kanal übertragen wird, birgt somit ein hoher okzipitaler alpha-Rhythmus die Gefahr einer verminderten Reaktionsfähigkeit auf diese visuellen Reize, vor der ein Fahrerassistenzsystem in geeigneter Weise warnen könnte.

In der automatisierten ICA Komponentenklassifikation, publiziert in (Tangermann et al., 2009), sehen wir einen wichtigen methodischen Beitrag zum Umgang mit EEG-Artefakten, wie sie nicht nur in

Laborsituationen, sondern insbesondere auch bei "real-life" Messungen vorkommen. Das entsprechende Software-Tool wird auch in Zukunft zur EEG-Analyse benutzt werden.

Die Ergebnisse des FaSor-Projekts werden aktuell im BMBF-geförderten Verbundprojekt Brain@Work - "Entwicklung von Neurotechnologie-basierten Mensch-Maschine Interaktions-Applikationen für das industrielle Umfeld" (BMBF, 2008-2011) - weiter verwendet. Sie lassen sich auch unmittelbar in das BMBF-geförderte Projekt Fahrerassistenzsysteme (FAS), wie auch in dessen bereits geplantes Nachfolgeprojekt einbringen.

Fortschritt bei anderen Stellen

Ein Ziel des FaSor-Projekts war es, eine Aufmerksamkeitsdetektion aus dem EEG abzuleiten. Aufmerksamkeitsdefizite dürfen hierbei nicht mit extremer Müdigkeit verwechselt werden. Letztere war schon vor Projektbeginn sowohl aus dem EEG als auch durch Verwendung anderer physiologischer Signale detektierbar. Unter anderem stellte Volvo bereits 2001 ein Eye-Tracking-basiertes System vor. Der von uns untersuchte Zustand der Vigilanzminderung durch Konzentrationsschwäche bzw. Monotonie der Fahrsituation ist im Allgemeinen schwieriger zu detektieren, stellt aber nichtsdestotrotz eine Hauptursache für Unfälle im Straßenverkehr dar.

Soweit uns bekannt ist, wurden innerhalb der FaSor-Projektlaufzeit keine Studien veröffentlicht, welche den Einfluss von Aufmerksamkeitsmodulation bzw. Monotonie auf die Fahrleistung im realen Straßenverkehr anhand von EEG untersuchen. Damit ist diese Fragestellung weiterhin ein Alleinstellungsmerkmal von FaSor.

Verwandte, neuere Studien unterscheiden sich in mindestens einer der beiden Kriterien (1.) reales Fahrszenario und (2.) Fokussierung auf die Aufmerksamkeitsvorhersage von unserem Ansatz. In die erste Kategorie fallen hier z.B. die Arbeiten von Rosipal et al., 2007, sowie Lei et al., 2009, welche beide Fahrsimulatoren einsetzen. Rosipal et al. finden einen Zusammenhang zwischen spektralen EEG-Merkmalen und dem von Experten geschätzten Müdigkeitslevel des Fahrers. Lei et al. untersuchen lediglich den Zusammenhang evozierter (auf gewisse Stimuli bezogene) Komponenten auf die allgemeine Fahrleistung. Diese sind aber für ein Fahrerassistenzsystem nicht hilfreich, da sie ohne Kenntnis des Stimulus nicht im EEG detektiert werden können. Schliesslich stellen Papadelis et al., 2007, eine Studie vor, welche einen schwachen Zusammenhang zwischen gewissen EEG- bzw. EOG-Merkmalen (Augenbewegungen) und Fahrfehlern herstellt. Dieser Befund ist aber beschränkt auf lange Nachtfahrten mit entsprechend extremer Müdigkeitsentwicklung.

Rosipal R., Peters B., Kecklund G., Åkerstedt T., Gruber G., Woertz M., Anderer P., Dorffner G. *EEG-based Drivers' Drowsiness Monitoring using a Hierarchical Gaussian Mixture Model*. In: Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction, Schmorow D.D., Reeves L.M.(eds.): Augmented Cognition, HCII 2007, Beijing, China, Springer, pp. 294-303, 2007.

S. Lei, S. Welke, M. Rötting. *Driver's Mental Workload Assessment Using EEG Data in a Dual Task Paradigm*. In: Proceedings of the 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV) - International Congress Center Stuttgart, Germany, June 15–18, 2009.

C. Papadelis, Z. Chen, C. Kourtidou-Papadeli, P. Bamidis, I. Chouvarda, E. Bekiaris, N. Maglaveras. *Monitoring sleepiness with on-board electrophysiological recordings for preventing sleep-deprived traffic accidents*. In: *Clinical Neurophysiology*, Volume 118, Issue 9, Pages 1906-1922, 2007.

Projektbezogene Veröffentlichungen

Schubert, R., Tangermann, M., Haufe, S., Sannelli, C., Simon, M., Schmidt, E.A., Kincses, W.E., Curio, G. *Parieto-occipital alpha power indexes distraction during simulated car driving*. Abstracts of the 14th World Congress of Psychophysiology - The Olympics of the Brain - of the International Organization of Psychophysiology (I.O.P.) Associated with the United Nations. In: *International Journal of Psychophysiology*, 69(3): 214, Elsevier, 2008.

Tangermann, M., Winkler, I., Haufe, S., Blankertz, B. *Classification of artifactual ICA components*. In: *International Journal of Bioelectromagnetism*, 11(2):110-114, 2009.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.....	11
Abbildung 2.....	12
Abbildung 3.....	13
Abbildung 4.....	14
Abbildung 5.....	15
Abbildung 6.....	16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.....	9
----------------	---