

Rahmenprogramm Mikrosysteme

Mikrosystemtechnik für Fahrerassistenzsysteme

Daimler AG - Schlussbericht

Beitrag des Zuwendungsempfängers:	Daimler AG Epplestraße 225 70546 Stuttgart
zum Projekt:	Fahrer als Sensor (FaSor): Gewährleistung und Erhöhung der Verkehrssicherheit durch die Berücksichtigung des kognitiven Fahrerzustandes für eine optimale Wirkungsweise von Fahrerassistenzsystemen
zum Teilprojekt:	Aufmerksamkeitszustand und adaptive Fahrerassistenzsysteme: Integration in den Regelkreis Fahrer – Fahrzeug – Umfeld
Laufzeit:	01. November 2005 – 31. März 2009

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16SV2233 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

gefördert vom



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Stuttgart, den 30. Oktober 2009

1 INHALTSVERZEICHNIS

1	INHALTSVERZEICHNIS	2
2	EINLEITUNG	3
2.1	<i>Thema</i>	3
2.2	<i>Zielsetzung</i>	3
2.3	<i>Wissenschaftlicher und technischer Stand</i>	4
3	MOTIVATION UND AUFGABENSTELLUNG	5
4	TEILPROJEKTSTRUKTUR UND ABLAUF DES VORHABENS	6
5	ERZIELTE ERGEBNISSE DER DAIMLER AG	9
5.1	<i>Messtechnik</i>	9
5.2	<i>Neurophysiologische Korrelate von Fahrervigilanz</i>	12
5.3	<i>Messung der Fahrervigilanz im Fahrzeug</i>	22
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	36
7	NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE	38
8	BERICHTE UND VERÖFFENTLICHUNGEN	39

Der Beitrag wurde verantwortlich verfasst von:

Dr. Wilhelm E. Kincses

Dieser Bericht wurde erstellt von der Daimler AG

©2009 Daimler AG

Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlagen, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts sind nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zum Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmustereintragung vorbehalten. Für Fehler oder Auslassungen wird keine Haftung übernommen.

2 EINLEITUNG

2.1 Thema

Verbesserte Fahrerunterstützung durch Fahrerzustandserkennung: Entwicklung und Verifikation eines Systems zur Fahrerzustandserkennung

- (1) zur Erhöhung der Verkehrssicherheit durch eine optimierte Wirkungsweise von Fahrerassistenzsystemen und
- (2) zur aktiven Unfallprävention.

2.2 Zielsetzung

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 zurechtzufinden, komplexe Situationen in Sekundenbruchteilen wahrzunehmen, zu beurteilen und die der Situation angemessenen Schlüsse abzuleiten, so kann man aus regeltechnischer Sicht feststellen, dass der Mensch das komplexeste und zugleich hinsichtlich seiner Erkennungsleistung das beste uns bekannte Sensorsystem ist. Unter realistischen Umfeldbedingungen funktioniert die Perzeptions-Aktions-Schleife des Menschen jedoch keineswegs durchgehend fehlerfrei. Gründe dafür können zum Beispiel Vigilanzminderung, 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. Des Weiteren wurde ein System sowie Analyseverfahren entwickelt, mit denen wir Vigilanzänderungen des Fahrers mit einer hohen zeitlichen Auflösung von wenigen Sekunden erfassen und diese Information für eine Optimierung der Wirkungsweise von Fahrerassistenzsystemen verwenden können.

Um eine bestmögliche Validität und Anwendbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, gehörte zu den Projektzielen auch die Entwicklung einer neuartigen Sensorik, die eine robuste und ergonomische Messung physiologischer und neurophysiologischer Fahrerdaten ermöglicht (EEG, EKG, usw.). Diese Aktivitäten wurden federführend vom Projektpartner Brain Products GmbH durchgeführt, wobei die Anforderungsdefinition und die Testung der Systeme im Rahmen von Langzeituntersuchungen von der Daimler AG durchgeführt wurden.

Die Projektinhalte ordnen sich in das Themenfeld „Verbesserung der Mensch-Maschine-Schnittstelle“ ein. Die Aktivitäten sind durch einen hohen Neuheits- und Innovationsgrad gekennzeichnet und reichen weit über den aktuellen Stand der Technik hinaus. Der Ansatz basiert auf zwei Hauptmerkmalen und wurde unter Verwendung mikrosystemtechnischer Komponenten realisiert (Sensoren, Algorithmen). Zum einen wurden Hardwarekomponenten (Sensoren, (Vor-) Verstärkersysteme etc.) und Software (Algorithmen) entwickelt, die erstmalig erlauben, den Fahrer aufgrund seines aktuellen kognitiven Zustandes in den Fahrer-

Fahrzeug-Umfeld-Regelkreis einzubeziehen. Zum anderen fanden Erkenntnisse, die bislang primär im medizinischen Bereich eingesetzt wurden, eine Anwendung im automobilen Bereich.

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 kann. Denn die Eingriffe solch eines neuen Sicherheitssystems, das sowohl Situations- als auch Fahrer-angepasst ist, sind für den Fahrer nachvollziehbar, was eine erhöhte Akzeptanz und Marktpenetration dieser Systeme ermöglichen sollte.

Durch die Verbindung der medizinischen Grundlagenforschung mit dem automobilen Anwendungsbereich wird gewährleistet, dass Letzterer aus den Erkenntnissen anderer Wissenschaftsbereiche profitiert. Gleichzeitig eröffnet dieser interdisziplinäre Ansatz die Chance eines wechselseitigen Wissenszuwachses aller teilnehmenden Bereiche.

2.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Bisherige Ansätze einer Untersuchung der Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Straßenverkehrssituation basierten vor allem auf indirekte Maße, wie z.B. das 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 bisheriger Verfahren liegt darin, dass neurophysiologische Parameter wesentlich unmittelbarer mit kognitiven Zuständen des Fahrers zusammenhängen als indirekte Verfahren (Verhalten, Lidschluss, etc.), bei denen das Risiko von Fehlinterpretationen folglich größer ist. Wie die Ergebnisse zeigen, ist es uns im Rahmen des Projektes gelungen, mit dem hier verfolgten Ansatz eine verlässlichere Zustandsschätzung als mit den bisherigen Verfahren zu erzielen.

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

In den Vereinigten Staaten sowie Singapur und Japan gibt es bereits seit mehreren Jahren Förderungsinitiativen, die in eine mit dem vorliegenden Projekt vergleichbare Richtung zielen. Das vorliegende Projekt leistete somit einen bedeutenden Beitrag für einen Ausbau wissenschaftlicher und technologischer Kompetenzen am Standort Deutschland – sowohl im universitären als auch im wirtschaftlichen Bereich.

3 MOTIVATION UND AUFGABENSTELLUNG

Im Kontext automobiler Untersuchungen ist die Elektroenzephalographie (EEG) die neurophysiologische Methode der Wahl. Das EEG erlaubt es, mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zentralnervöse Korrelate kognitiver Zustände zu untersuchen und Aussagen über den kognitiven Zustand einer Versuchsperson hinsichtlich Aufmerksamkeit, Beanspruchung und Müdigkeit zu treffen.

Seitens der Daimler AG wurden im Projekt folgende wissenschaftlich-technische Forschungsschwerpunkte bearbeitet:

- Entwicklung von Signalverarbeitungstechniken zur Echtzeitanalyse und -auswertung von Spontan-EEG-Daten außerhalb von Laborumgebungen.
- Entwicklung echtzeitfähiger Algorithmen und entsprechender Software zur Identifikation und Charakterisierung neuronaler Korrelate der Fahrervigilanz. Ziel dabei war es, ein objektives und echtzeitfähiges Vigilanzmaß zu entwickeln, das die Charakterisierung entsprechender kognitiver Zustände unter realen Verkehrsbedingungen ermöglicht.
- Experimentelle Erarbeitung eines Bewertungsschemas für kognitive Parameter aus neurophysiologischen (EEG-) Daten.
- Mitarbeit bei der Entwicklung eines neuartigen, ergonomischen EEG-Systems für den automobilen Anwendungsbereich.
- Exploration und Validierung von Messtechniken zur Messung neurophysiologischer Fahrerparameter im automobilen Anwendungsbereich.

4 TEILPROJEKTSTRUKTUR UND ABLAUF DES VORHABENS

Teilprojekt 0, Projektmanagement. In diesem Arbeitspaket wurden alle organisatorischen und verwaltungstechnischen Arbeiten durchgeführt. Als Konsortialpartner wurden hier neben der Organisation und Durchführung von Meetings und Workshops, der Präsentation und Dokumentation der Ergebnisse, der Berichterstattung und des Controlling auch die Schnittstellen zu anderen Projekten bedient und der Kontakt zur Öffentlichkeit aufrecht erhalten und gepflegt.

Teilprojekt 1, Neurophysiologische Grundlagen: Bei der Entwicklung der psychophysiologischen Paradigmen für die durchgeführten Versuchsreihen und Pilotstudien (vgl. TP2), bestand die Rolle der Daimler AG darin, die Randbedingungen zu spezifizieren, die sich aus den praktischen Erfahrungen mit neurophysiologischen Messungen im Fahrzeug resultierten (AP 1.2.2, 1.4.2, 1.5.2, 1.6.2, 1.7.2, 1.8.2). Des Weiteren wurden gemeinsam mit den Projektpartnern Charité und FIRST die psychophysiologische Interpretationen der Versuchsreihen-Ergebnisse auf ihre Relevanz für den automobilen Anwendungsbereich hin untersucht (AP 1.3.3).

Teilprojekt 2, Physiologische Messungen im Fahrzeug: Kernstück des gesamten Projektes waren drei Versuchsreihen (AP 2.1, 2.3, 2.5) mit jeweils vorangegangenen Pilotstudien (AP 2.2, 2.4). In den Pilotstudien wurden die technischen Komponenten bzw. Elemente des Versuchsablaufs auf ihre Funktions- bzw. Wirkungsweise hin überprüft. Seitens der Daimler AG wurden die Versuchsreihen und Pilotstudien vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet, was im Einzelnen mit folgenden, für jede der Versuchsreihen wiederkehrenden Arbeitsschritten verbunden war:

- 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. (AP 2.1.1, 2.2.1, 2.3.1, 2.4.1, 2.5.1).
- Die jeweils im Vorfeld einer jeden Versuchsreihe gemeinsam mit den übrigen in diesem Arbeitspaket beteiligten Projektpartnern entwickelten psychophysiologischen Paradigmen wurden im Fahrzeug mithilfe verfügbarer bzw. eigens dafür entwickelten Hard- und Software implementiert. Dazu gehörte auch die Erstellung des Stimulus-Materials ebenso wie die Programmierung von Stimulus-Abfolgen und die Protokollierung aller relevanten Ereignisse einschließlich der Verhaltensantworten der Versuchspersonen. (AP 2.1.2, 2.2.2, 2.3.2, 2.4.2, 2.5.2).
- 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 Ablaufs) 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. (AP 2.1.3, 2.2.3, 2.3.3, 2.4.3, 2.5.3).

- Nach Abschluss der Messphase erfolgte in jeder Pilotstudie und Versuchsreihe die Auswertung und Interpretation der erhobenen Daten. (AP 2.1.4, 2.2.4, 2.3.4, 2.4.4, 2.5.4).

Die abschließende Demonstration der Fahrzeugfunktionen (vgl. AP 5.9) wurde von der Daimler AG im Rahmen des vom Projektträger organisierten Cluster-Meetings FAS (Berlin, 04.Mai 2009) organisiert (AP 2.6.1; Anmietung von Räumlichkeiten, Koordination der Projektpartner, usw.), durchgeführt (AP 2.6.2; Leitung der Veranstaltung, Betreuung und Vorführung des Versuchsträgers mit Erläuterungen, Präsentation der Projekt-Ergebnisse, Diskussion der Perspektiven) und nachbereitet (AP 2.6.3; Dokumentation der Projekt-Ergebnisse, Erstellung eines Abschlussberichts).

Teilprojekt 3, Messtechnik und Fahrzeugtauglichkeit: Es wurden die jeweils jüngste Generation der von Brain Products entwickelten Elektrodenhauben in das Versuchsfahrzeug integriert (AP 3.1.1, 3.3.2, 3.5.2), Testmessungen damit durchgeführt (AP 3.3.2, 3.5.2) und anhand der gemeinsam mit Charité, FIRST und TU Berlin ausgewerteten Daten (AP 3.3.3, 3.5.3) beurteilt, an welchen Stellen Nachbesserungen nötig sind (AP 3.4.1, 3.6.1). Die entsprechenden Vorschläge werden dann im Versuchsträger umgesetzt (AP 3.4.2, 3.6.2).

Teilprojekt 4, Algorithmen und Software zur Zustandserkennung: Im Rahmen der Softwareentwicklung für die Online-Signalverarbeitung bestand die Aufgabe für die Daimler AG (neben der Aufbereitung und Bereitstellung der jeweils in einer Versuchsreihe oder Pilotstudie erhobenen Daten) darin, auf der Grundlage einer Analyse des jeweils aktuellen Gesamtsystems (AP 4.5.3, 4.12.1) Anforderungen zu formulieren, die für die jeweils anstehende Iteration im Entwicklungsprozess an die Fähigkeiten der folgenden Software-Generation zu stellen waren (AP 4.1.5, 4.3.6, 4.10.4, 4.11.1, 4.13.6).

Teilprojekt 5, Systemintegration und reale Umsetzung: Gemäß des Projektziels, die Messtechnik nicht nur im Labor, sondern in einem Fahrzeug zu untersuchen, wurde ein Versuchsträger aufgebaut und mit fahrzeugtauglicher Messtechnik ausgerüstet. Dieser musste mehreren Kriterien genügen:

- Die Messtechnik durfte nicht den sicheren Fahrbetrieb beeinträchtigen.
- Die Messtechnik musste für den Probanden möglichst unauffällig installiert sein.
- Alle Fahrzeug-internen Funktionen mussten freigelegt werden.
- Die neu entwickelnde Hard- und Software musste in das Gesamtsystem integriert werden.
- Für den späteren Abgleich mit andere Applikation wurde eine zugehörige Situationserkennung integriert.

Dieser Prozess erfolgte in mehreren Stufen. Im Rahmen des Grundaufbaus wurden keine neuen Funktionen entwickelt, sondern vorhandene Module in das Fahrzeug integriert. Für den weiteren Ausbau des Fahrzeugs mit Messtechnik und durch die Nutzung von verschiedenen Projektpartnern wurden die Schnittstellen genau definiert und dokumentiert. 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 somit die optimale Grundlage für die im Rahmen dieses Projekts zusätzlich integrierten Innovationen bildete (AP 5.1.1–5.1.7).

Als erstes wurden die Schnittstellen an die Sondermesstechnik in Betrieb genommen. Neben der Hardwareintegration wurden eine Synchronisierung und der Datenaustausch zwischen den

einzelnen Modulen etabliert. Zur Validierung der Messung wurden typischerweise Verkehrsszenarien über eine Videoerfassung dokumentiert, die ebenfalls mit der restlichen Datenwelt synchronisiert wurde. Nach der Inbetriebnahme wurden die Versuche technisch betreut, d.h. von der Garantie der Grund-Fahrfunktion bis hin zu Datensicherung wurde ein reibungsloser Versuchsablauf gewährleistet. Die Auswertung des Versuchs bezog sich in diesem TP auf die Analyse der Situationserkennung und die Bereitstellung der Vergleichsdaten aus der Fahrzeugsensorik für die Auswertung der physiologischen Messdaten (AP 5.2.1–5.2.6).

Da in dem Projekt mehrere Generationen von Messsystemen entwickelt wurden, wurde eine ganze Sequenz von Integrationen, Pilotstudien und Versuchsreihen durchgeführt. Die Vorgehensweise war immer ähnlich und entsprach im Wesentlichen der Beschreibung in 5.2. Der Aufwand für die messtechnische Integration der jeweils nächsten Generation von CAP-Varianten war nicht rückläufig, da die Anforderungen der verfeinerten Systeme auch Konsequenzen für die elektromagnetische Verträglichkeit mit der Fahrzeugmesstechnik aufwiesen (AP 5.3–5.8).

Die Messtechnik, die im Rahmen des Projekts entwickelt wurde, musste ihre Tauglichkeit an einer Fahrzeugfunktion beweisen. Daher wurde, aufbauend auf der Situationserkennung aus AP 5.1, eine DEMO-Funktion geplant und in den Versuchsträger integriert. Diese wurde von Experten auf dieses Fahrzeug abgestimmt. Diese Funktion wurde mit dem letzten Stand der physiologischen Messtechnik gekoppelt und bei der Abschlusspräsentation präsentiert (AP 5.9.1–5.9.7).

Teilprojekt 6: Die Leistungen der Daimler AG im Rahmen der Ergonomie- und Akzeptanz-Untersuchungen bestand hauptsächlich in der Nachbesserung der Fahrzeug-Integration des aktuellen Systems unter ergonomischen Gesichtspunkten (AP 6.1.1, 6.2.1).

5 ERZIELTE ERGEBNISSE DER DAIMLER AG

Für eine bessere Verständlichkeit und Übersicht, werden die von der Daimler AG in den einzelnen TPs und APs durchgeführten Aktivitäten und die darin erzielten Ergebnisse in den folgenden drei thematischen Abschnitten zusammengefasst und vorgestellt.

5.1 Messtechnik

Diese Aktivitäten wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Brain Products GmbH (BP) durchgeführt. Der Schwerpunkt lag bei der Entwicklung artefaktarmer Elektroden, die nachweislich für den Einsatz im Fahrzeug über einen längeren Zeitraum (ca. 8 Std.) geeignet sind. Dazu waren an das EEG-Meßsystem folgende Anforderungen formuliert:

Anforderungen allgemein:

Robuste Datenerfassung im KFZ mit minimaler Artefaktanfälligkeit und verbesserter Ergonomie / Akzeptanz sowohl für den Fahrer (Tragekomfort) als auch für die Applizierung der EEG-Sensoren (geringe Vorbereitungszeit und einfache Handhabung).

Anforderungsliste:

- hohe zeitliche Auflösung der zu extrahierenden Fahrerzustandskorrelate (Minutenbereich)
- die Messung interferiert nicht mit der Fahraufgabe (s. Fragebögen, etc.)
- die Messung verändert nicht den zu messenden Fahrerzustand
- kontinuierlich
- objektiv und robust
- generalisierbar

Dazu wurde am 06.04.2006 das für die ersten Messreihen vorgesehen EASY-CAP System (komplett ausgestattet mit 128 EEG Kanälen) von BP geliefert und in enger Zusammenarbeit in die Hard- und Softwareumgebung des Versuchsträgers integriert.



Abbildung 1: Hardwareintegration in Versuchsträger während des Werkstattaufbaus (Innenraum – linkes Bild, Kofferraum – rechtes Bild).

Nach mehreren Testfahrten, in denen Anpassungen der Paradigmen und Nachbesserungen bei der Hard- und Software vorgenommen wurden, wurde eine Pilotstudie (28.06. – 01.08.2007) mit 10 Versuchspersonen (VP) durchgeführt. Die Auswertung der Pilotstudie hat gezeigt, dass der zu untersuchende Fahrerzustand der Monotonie erfolgreich hergestellt werden konnte und zu einer Vigilanzminderung bei den VPn führte.

Am 28.06.2007 wurde von BP die erste Stufe der Entwicklung der aktiven Elektroden (ACTI-CAP System) abgeschlossen. Durch ein neuartiges Verfahren wurde die Vorverstärkereinheit durch die Implementierung mikrosystemtechnischer Ansätze direkt in die Elektrodenunit integriert werden, was u.a. eine erhebliche Reduzierung der Störsignale zur Folge hatte.

Im Zeitraum (17.10. – 28.11.2007) erfolgte die Hauptstudie 1 mit 20 VP. Hierbei wurde zusätzlich eine Durchführung verschiedener Artefakt-routinen (n=24) vorgenommen, um die Reduktion von Störeinflüssen (z.B. Muskelartefakte des Fahrers, äußere Störsignale durch FZG und Messtechnik, Umgebungsrauschen) zu quantifizieren und zu minimieren.

Im Zeitraum (05.12.2007 – 27.02.2008) erfolgte die Hauptstudie 2 mit 30 VP unter der Verwendung von weiter verbesserten Versionen der ActiCap.

Ein ausführlicher Bericht erfolgte im Halbjahresstatusseminar am 31.10.2007 in Stuttgart und im anschließenden 2. Jahresstatusbericht für 2007 (2. Projektjahr) am 14.04.2008.



Abbildung 2: Hardwareintegration in Versuchsträger nach Abschluss der Arbeiten.

Abschließende Arbeiten zur Ergonomie

Im 3. Projektjahr wurden die folgenden Arbeiten wie geplant durchgeführt und abgeschlossen:

- ActiCap 32-Channel System (Lieferung am 20.02.2008) zur Untersuchung der Fahrzeugtauglichkeit und zur Weiterentwicklung des bestehenden Systems. Verbesserungsvorschläge wurden adressiert, Nachbesserungen vorgenommen.
- Acticap 16-Channel System (Lieferung 16.04.2009) zur Untersuchung der Elektrodenreduktion (SLIM Testmessung) und zur Umsetzung ergonomischer Randbedingungen (SLIM Fahrzeugtauglichkeit).



Ins Gehirn geschaut

Wie anstrengend ist Autofahren? Die Antwort gibt eine Testfahrt mit einem speziellen Auto von Daimler – dem Mind-Lab. Damit ist es möglich, die Hirnströme des Fahrers zu messen und daraus die Belastung zu errechnen

„Cosa è successo – was ist passiert?“ Die italienischen Polizisten an der Brenner-Autobahn staren, als der dunkle Mercedes im Stau-Schritttempo an ihnen vorbeifährt. Am Lenkrad sitzt ein Mann mit einer weißen Haube, aus der Kabel herausabhängen. Seine Augen sind halb vier nachmittags. Vor vier Stunden hat der sternen Test in München begonnen: eine Testfahrt, bei der es um die Belastung des Fahrers geht. In dem rollenden Forschungslabor Mind-Lab von Daimler, einem 5-Klasse-Mercedes, werden unter anderem Gehirnströme, Herzfrequenz, Blickbewegungen und jeder seiner Handgriffe aufgezeichnet. Insgesamt weit mehr als 100 verschiedene Parameter, die jede tausendstel Sekunde dieser Reise protokollieren. Die Strecke: München-Vernaa, rund 420 Kilometer. Eine Etappe, die Tausende Urlauber abspulen. Testperson ist Roland Braun, Familienvater, Diplom-Ingenieur, 42 Jahre alt. Ein, zweimal pro



Testfahrer Roland Braun hat eine ganz raffinierte Kappe (a) auf. Ihre 15 Sensoren erfassen die Gehirnströme. Hirnforscher Michael Schrauf (b) kann so am Computer (c) erkennen, wie konzentriert der Fahrer ist. Auf dem rechten Bildschirm ist der Kopf des Fahrers dargestellt. Der rote Bereich steht für Alpha-Wellen, die das Hirn bei Entspannung erzeugt. Links läuft die Aufmerksamkeitskurve

Jahr fahren die Brauns in die Ferien und machen eine Reise wie diese. Im Fond des Mind-Lab sitzt Michael Schrauf, Hirnforscher und Experte bei Daimler für neurowissenschaftliche Untersuchungen. Vor ihm ist ein Monitor installiert, auf dem die Augen von Roland Braun in Großaufnahme zu sehen sind. „Das System erfasst alle Blickbewegungen und registriert zum Beispiel, wie oft der Fahrer zur Seite schaut oder das Display des Navigationssystems bebildert“, sagt Schrauf. Rund 90 Prozent aller Informationen, die für das Autofahren wichtig sind, nimmt der Mensch mit den Augen wahr.

Auf dem Bildschirm neben und über der Fahrbahn zieht den Blick durchschnittlich fünfmal, auf dem Münchner Autobahnring sogar über achtmal pro Minute auf sich. Diese visuellen Eindrücke müssen in Millisekunden verarbeitet und interpretiert werden. Und wenn notwendig muss der Fahrer zum Beispiel mit Bremsen reagieren – während die Augen im selben Augenblick schon wieder jede Menge neue Bilder schicken. Unabhängig trennt das Hirn wichtige von unwichtigen Informationen.

Dieser Stress wird im Mind-Lab durch Messung der Gehirnströme (EEG) analysiert. Michael Schrauf drückt ein paar Tasten, und das Bild auf dem Monitor zeigt einen stillstehenden Kopf. Man sieht von oben drauf, erkennt Ohren und Nase. Die Fläche dazwischen wird durch rote, gelbe und grüne Farbfelder ausgefüllt, die ständig in Bewegung sind. Das sind die Gehirnwellen, gemessen von den 15 Elektroden in der Kopfhaut. „Jedem des EEG erkennen wir zum Beispiel, wenn er besonders konzentriert ist, aber auch, wenn er müde wird“, sagt Schrauf und zeigt auf den Bildschirm, wo jetzt die Farbe Rot dominiert. So werden die Alpha-Wellen dargestellt, die das Gehirn in Phasen gesteigerter Entspannung erzeugt. Links läuft die Aufmerksamkeitskurve. Nur: Zu viele Alpha-Wellen können beim Autofahren schnell zu Unachtsamkeit führen. ➔

Auto

Wir wissen, dass jede Aktion eine Abfolge von mindestens sieben Denkphasen erfordert

Daimler-Forscher Michael Schrauf

Bei solchen und ähnlichen Testfahrten suchen Wissenschaftler Antworten auf Fragen, wie stark Autofahrer beansprucht werden und wie man sie mithilfe technischer Lösungen entlasten kann. Ergebnisse dieser Forschung sind zum Beispiel:

- die automatische Abstandsregelung,
- die sensorgesteuerte Klimakontrolle,
- die Sprachbedienung für Radio und Navigation
- oder der neue Fernlichtassistent, der je nach Verkehrssituation automatisch vom Abblend- auf Fernlicht umschaltet. All diese bereits verfügbaren Systeme entlasten den Fahrer. Bei

der Abstandsregelung muss nicht er den richtigen Sicherheitsabstand achten. Bei der Klimaanlage und der Sprachbedienung entfällt jeweils die Fummel, die vom Verkehr ablenkt. Und auch die Fernlichtautomatik kommt der Konzentration des Fahrers zugute, weil ihm Entscheidungen abgenommen werden.

Jetzt ist das Testteam seit rund einer Stunde unterwegs. Noch hat Roland Braun genügend Reserven, um aus Phasen der Unachtsamkeit rasch wieder in den Normalzustand zurückzufinden. So rollt das Mind-Lab mit Tempo 130 über die österreichische Inn- und Autobahn. Es herrscht wenig Verkehr, und Braun hat wenig zu tun. Er spielt am Navi herum, sucht einen anderen Radionsender und wendet den Blick immer häufiger von der Fahrbahn ab. Die Tour wird langweilig – und Braun immer trüger. Das EEG bestätigt: Fast alle Bereiche des Gehirns erreichen einen so kritischen Alpha-Zustand, dass der gefährliche Sekundenschlaf droht. Höchste Zeit für Michael Schrauf einzugreifen. „Wir sollten eine Pause machen“, sagt er. Kurz vor Innsbruck legt das Team an einer Raststätte 45 Minuten Pause ein.

Danach ist der Testfahrer wieder hellwach. Als er am Brenner die Polizisten passiert, beschleunigt der Fernlichtassistent von 70 Schlägen pro Minute auf rund 80 Schläge – Stress. Weiter Richtung Bozen. Hunderte Lastwagen und Dutzende Tunnels erfordern

fast eine Stunde lang höchste Aufmerksamkeit. Danach ist er geschafft. Das EEG zeigt (helle Grafik), dass die Phasen der Unachtsamkeit wieder häufiger und länger werden. Als er um halb sechs abends Vernaa erreicht, hat sein Gehirn stundenlang mit Höchstfrequenz gearbeitet.

Zahlen kann man die Um-menge von Denkprozessen bei einer solchen Fahrt nicht. Vieles ist ja auch Routine und läuft quasi automatisch ab“, sagt Daimler-Forscher Schrauf. Doch die Routine wird unterbrochen, wenn der Fahrer in Situationen gerät, die ihn zum bewussten Handeln zwingen. Zum Beispiel beim Bremsen, beim Spurwechsel oder beim Überholen. Schrauf: „Wir wissen, dass jede dieser Aktionen eine Abfolge von mindestens sieben komplexen Denkphasen erfordert: Absicht, Wahrnehmung, Beurteilung, Prognose, Entscheidung, Aktion und Überprüfung.“

Da kommt auf der Strecke München-Vernaa neben Zigaretten von Augenbewegungen einiges zusammen. Addiert man die Hirnprozesse, die zu 217 Spurwechseln, 98 Bremsmanövern und 43 Bremsungen von Radio, Navi und Klimaanlage geführt haben, dann hat Brauns Gehirn in vier Stunden und 45 Minuten reiner Fahrzeit mehr als 2500 Entscheidungen getroffen – Schwerearbeit. *Christof Vieweg*

Häufig abgelenkt

Aufmerksamkeitsprobleme einer Testfahrt von München nach Vernaa: Die Messung der Gehirnströme des Fahrers zeigen, dass die Konzentration oft mangelhaft ist

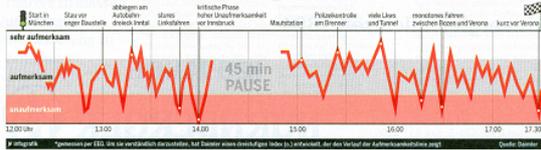


Abbildung 3: Beispiel für die Verwertung der Projektergebnisse (Artikel „Ins Gehirn geschaut“, Zeitschrift STERN Nr. 43, Jahr 2009).

5.2 Neurophysiologische Korrelate von Fahrervigilanz

Einleitung

Um die Fahrsicherheit zu erhöhen, verfolgt die Automobilindustrie unterschiedliche Ansätze. Ziel dabei ist, die nachlassende Vigilanz eines Fahrers zu detektieren und ihn rechtzeitig zu warnen. Die meisten Forschungsansätze gehen davon aus, dass sich das menschliche Fahrverhalten – insbesondere das Bremsen und Beschleunigen (die Längsregelung) sowie das Lenken und Spurhalten (die Querregelung) – mit Einsetzen der Müdigkeit und Schläfrigkeit verschlechtert. Möglicherweise geschieht dies, weil Ereignisse weniger gut vorausschauend erkannt werden und erforderliche Reaktionen, etwa Brems- oder Lenkmanöver, sehr spät und dann entsprechend heftig erfolgen.

Als besonders aussagekräftig hat sich das Lenkverhalten des Fahrers erwiesen, da sich eine voranschreitende Müdigkeit durch häufigere Lenkkorrekturen bemerkbar macht. Die erfasste Veränderung wird mit weiteren Faktoren wie Tageszeit, Fahrtdauer, Bedieneingriffen sowie nicht müdigkeitsbedingten Fahrmanövern kombiniert. Dies ermöglicht es, ein Verfahren zu entwickeln, das müdigkeits- und schläfrigkeitsbedingte Vigilanzeinbrüche erkennt und den Fahrer rechtzeitig warnt. Ergebnisse solcher Forschung sind schon heute auf den Straßen sichtbar: In der aktuellen E- und S-Klasse wurde im Jahr 2009 erfolgreich das Assistenzsystem *Attention Assist* eingeführt. Vergleichbare *Aufmerksamkeitsassistenten* werden zurzeit für den Einsatz in Lastkraftwagen und Bussen angepasst.

Da es sich bei diesen verhaltensbasierten Indikatoren nur um indirekte Müdigkeitsmaße handelt, müssen verlässliche Muster in den entsprechenden Daten bestimmt werden, um die Anzahl von Falsch- oder Fehlalarmen zu minimieren. Das System soll beispielsweise weder Lenkereignisse, die nicht auf Grund von Müdigkeit oder Schläfrigkeit zu Stande kommen, als Gefahr werten noch relevante Ereignisse nicht erfassen. Deshalb muss sowohl die *Spezifität* als auch die *Sensitivität* der Indikatoren maximiert werden.

Dazu ist die Verwendung eines objektiven, validen Außenkriteriums unabdingbar. Anhand dieses Kriteriums ist es möglich zu überprüfen, inwieweit die gewählten verhaltensbasierten Indikatoren einzeln oder in Kombination den tatsächlichen Müdigkeitsgrad getreu widerspiegeln. Das Validerungsmaß muss folgenden Anforderungen genügen:

- Die zeitliche Auflösung sollte im Bereich von wenigen Sekunden liegen, entsprechend der Dynamik des zu messenden Müdigkeitsprozesses. Studien haben gezeigt, dass die Müdigkeit nicht zwangsläufig monoton wächst, sondern meistens fluktuiert, insbesondere wenn ein Fahrer dagegen *ankämpft*.
- Es sollte ein hohes Maß an Objektivität aufweisen, mit dem zu messenden Zustand nicht interferieren und durch subjektive Faktoren nicht beeinflussbar sein. Fragebögen (i.e. Stanford Sleepiness Scale “SSS”, Hoddes et al., 1973; Karolinska Sleepiness Scale “KSS”; Åkerstedt & Gillberg, 1990; Kaida et al., 2006; Epworth Sleepiness Scale “ESS”; Johns, 1991), die zur Müdigkeitsbestimmung entwickelt und auch sehr häufig eingesetzt werden, sind für Akzeptanzstudien von Warnsystemen zwar wichtig, um deren Interaktion mit dem Fahrer zu untersuchen, aber als Außenkriterium nur bedingt geeignet. Zum einen ist ihre zeitliche Auflösung zu gering: Die Befragungen erfolgen in der Regel nur alle 15 bis 20 Minuten und beeinflussen zudem den zu

messenden Zustand. Zum anderen kann sich die Versuchsperson im vigilanzgeminderten Zustand nur eingeschränkt selbst beurteilen, was ihre Angaben verfälscht (Belz et al., 2004; Moller, 2006; Schmidt et al., 2009). Weitere Verfahren verwenden als Validierungskriterium psychophysikalische Leistungsmaße, beispielsweise Reaktionszeiten, Detektions- und Diskriminationsleistungen. Dazu müssen die Testfahrer aber während der Fahrt spezielle Zusatzaufgaben durchführen, was sie ablenken könnte und im Extremfall damit sicherheitskritisch ist. Außerdem folgen diese Maße – wie verschiedene Studien zeigen – dem Verlauf der Vigilanzminderung nur bedingt: Fluktuationen unterhalb einer bestimmten Schwelle werden nicht wiedergegeben, stattdessen bricht die Aufmerksamkeitsleistung ab einem bestimmten Niveau plötzlich ein (Belz et al., 2004; Riemersma et al., 1977).

- Schließlich sollte das von uns gewünschte Validierungsverfahren unabhängig vom Testfahrer, seiner Sitzposition und dessen Physiognomie sein, sich nicht durch äußere Lichtverhältnisse stören lassen und von ihm auch gut akzeptiert werden. Kamerabasierte Verfahren weisen gerade diese und noch weitere Nachteile auf. Im Prinzip beobachtet hier ein auf den Fahrer gerichtetes Kamerasystem seine Augen – insbesondere die Lidschlussdynamik –, um seinen Müdigkeitszustand zu ermitteln. Kameras haben zudem den großen Nachteil, dass sie das Auge nur in einem sehr eingeschränkten Winkel zuverlässig erkennen können (was bei Brillenträgern weiter erschwert wird). Dreht der Fahrer den Kopf oder verändert er seine Sitzposition, sind die Augen oft nicht mehr erfassbar – Anzeichen eines Sekundenschlafs werden nicht registriert. Asiaten besitzen auf Grund ihrer Physiognomie eine besonders enge Lidspalte, was die Detektionsqualität weiter verringert. Außerdem können schnell wechselnde Lichtverhältnisse zu einer von außen getriggerten Lidschlussdynamik führen, die nicht mit nachlassender Vigilanz korreliert. Nicht zuletzt ist ein Lidschluss, der über eine oder mehrere Sekunden andauert, ein Ereignis, das die Müdigkeit eines Fahrers erst in einer Phase erkennen lässt, in dem er längst von der Straße abgekommen sein kann. Auf der Autobahn legt ein Fahrzeug bei 120 km/h in einer Sekunde immerhin 33 Meter zurück (entspricht der mehr als 4-fachen Breite zweier Fahrstreifen auf der Autobahn).

Ziel der von der Daimler AG durchgeführten Projektaktivitäten war, aufbauend auf vorangegangenen Arbeiten und parallel mit Projekt begleitenden Aktivitäten, ein EEG basiertes Außenkriterium zur Bestimmung von Vigilanzeinbrüchen mit den oben genannten Anforderungen weiterzuentwickeln.

Die Spektraldichte des EEG Alpha-Bandes (7 – 13 Hz) wurde bereits in zahlreichen Fahrzeugstudien zur Müdigkeitsmessung sowohl im Simulator als auch unter realen Fahrbedingungen eingesetzt (O’Hanlon & Kelly, 1977; Lemke, 1982; Brookhuis & De Waard, 1993; Lal & Craig, 2002; Campagne et al., 2004; Horne & Baulk, 2004; Otmani et al., 2005). Im Vergleich zur Theta- und Delta-Band Aktivität, die messbare Effekte nur unter fortgeschrittenen Müdigkeitsstadien zeigen, ist die Alpha-Band Aktivität bereits in frühen Müdigkeitsstadien sensitiv (O’Hanlon & Kelly, 1977).

Abgesehen von einem allgemeinen Zusammenhang zwischen Alpha-Band Aktivität und Müdigkeit, wird die Alpha Aktivität auch als Korrelat eines bestimmten Ruherhythmus (idling rhythm) angesehen (Pfurtscheller et al., 1996; Klimesch et al., 2007). So wurde zum Beispiel gezeigt, dass die Detektions- und Reaktionsleistung mit zunehmender parieto-okzipitaler Alpha Aktivität abnimmt (Jung et al., 1997; Hanslmayr et al., 2007; van Dijk et al., 2008). Da das Lenken eines Fahrzeugs hauptsächlich eine visuell-motorische Aufgabe

darstellt (Lansdown, 2001), ist das Alpha Band besonders geeignet für die Untersuchung visueller Performanzänderungen unabhängig von deren Ursache zu sein.

Autofahren ist eine sehr komplexe senso-motorische Aufgabe, die sich in einem dynamischen Umfeld abspielt. Dementsprechend sind EEG Messungen unter realen Fahrbedingungen üblicherweise mit höherem biologischen und technischen Rauschen behaftet als Labormessungen. Diese Artefakte machen sich unter anderem in einem breiten Anstieg der Aktivität in allen Frequenzbänder bemerkbar, so dass ein Anstieg der Energie im Alpha-Band letztendlich nicht ohne weitere Betrachtungen eindeutig auf neurophysiologischer Ursachen zurückzuführen ist. In mehreren Studien konnten allerdings Hinweise auf die Rolle spektraler Mikrostrukturen im Zusammenhang mit kognitiven Funktionen wie Aufmerksamkeit, Müdigkeit und Kurzzeitgedächtnis aufgezeigt werden (Jung et al., 1997; Petsche et al., 1997; Klimesch, 1999; Cantero et al., 2000; Cantero et al., 2002). Durch ihre hohe Spezifität besteht eine geringere Rauschanfälligkeit, so dass eine darauf basierende Zustandsklassifikation auch unter ungünstigen realen Fahrbedingungen möglich ist.

In verschiedenen Studien konnte gezeigt werden, dass unter diesen spektralen Mikrostrukturen so genannte Alpha Spindeln, d.h. kurzzeitige, schmalbandige Signalverstärkungen eine Auftretshäufung mit zunehmender Müdigkeit aufweisen (Kecklund et al., 1993; Tietze et al., 2001; Cantero et al., 2002; Eoh et al., 2005; Papadelis et al., 2007, Shaw, 2003). Aufbauend auf vorausgegangenen Untersuchungen und unterstützt durch Forschungsaktivitäten außerhalb des vorliegenden Vorhabens, wurde ein Verfahren zur echtzeitfähigen Spindelextraktion und anschließender Vigilanzbestimmung unter realen Straßenverkehrsbedingungen implementiert. Durch die Verwendung von individualisierten Alpha-Spindeln konnten wir eine EEG basierte individuelle Vigilanzsignatur entwickeln, die robust gegenüber Störeinflüssen ist und somit geeignet für Untersuchungen im Fahrzeug unter realen Straßenverkehrsbedingungen.

Methoden

Die EEG Daten wurden mit einer Abtastrate von 128 Hz digitalisiert und mit einem Bandpass von 0,5 – 48 Hz gefiltert. Die Datenvorverarbeitung erfolgte in enger Absprache mit den übrigen Projektpartnern, so dass entweder die gleichen Artefaktbereinigungsalgorithmen verwendet wurden, oder uns die Daten seitens der TU Berlin (TUB) in artefaktbereinigter Form zur weiteren Analyse zur Verfügung gestellt wurden. Als eine Vorgehensweise zur Bereinigung von unvermeidbaren Augenbewegungsartefakten, wurde z.B. der *infomax ICA* Algorithmus der Auswertesoftware *EEG Lab* verwendet (Lee et al., 1999; Delorme et al., 2004).

Die Spektralzerlegung des Signals erfolgte mit Hilfe der Fourier-Transformation, die die Vorteile einer ausreichend hohen spektrale Auflösung bietet, dem nicht-stationären Verhalten des EEGs über die gesamte Aufzeichnungsdauer Rechnung trägt und den Vorteil hat, Zeit und Ressourcen sparend für eine echtzeitfähige Umsetzung im Fahrzeug zu sein.

Alternativ dazu wurde auch ein Verfahren basierend auf der Hilbert-Huang-Transform (HHT) getestet, um diesen Ansatz hinsichtlich einer besseren zeitlich-spektralen Auflösung zu untersuchen. Die HHT wurde bisher erfolgreich bei der Analyse von Biosignalen eingesetzt (Yang et al., 2005; Xie et al., 2006; Salisbury et al., 2007) und bietet den Vorteil einer hohen zeitlich-spektralen Auflösung. Dieser Vorteil ist der Tatsache geschuldet, dass die HHT die Berechnung der instantanen Phase und ihrer Ableitung – der instantanen Frequenz – mittels der Hilbert-Transformation erlaubt. Deshalb besteht keine umgekehrt proportionale

Beziehung zwischen der zeitlichen und der spektralen Auflösung, wie im Falle der Fourier-Transformation.

Für die Definition einer Spindel mussten in unserem Ansatz folgende Kriterien erfüllt sein:

- räumliche Stetigkeit, d.h. die Spindelbestimmung erfolgt pro EEG Kanal;
- zeitliche Stetigkeit, d.h. der Spindelprozess ist ein kontinuierlicher Prozess;
- spektrale Stetigkeit, d.h. die Grundfrequenz einer Spindel darf sich innerhalb ihrer Dauer nicht verändern.

Zeitabschnitte, die diese drei Kriterien erfüllten, konnten zu einer durchgehenden Spindel zusammengefügt werden.

Simulierte Daten

Um die Detektionsleistung und den Einfluss von Signalrauschen zu untersuchen, wurden in einem ersten Schritt artifizielle EEG Daten inkl. Spindeln generiert und mit einem definierten Rauschsignal versehen. Dazu wurde als erstes ein Zufallssignal mit einer Spektralverteilung ähnlich dem des EEGs (Wagenmakers et al., 2004) generiert. Zusätzlich dazu wurden Sinussignale mit einer Frequenz um 9,5 Hz erzeugt, deren Eigenschaften den Charakteristiken physiologischer Alpha-Spindeln angepasst wurden. Es wurden insgesamt 300 Alpha-Spindeln simuliert, was einer gesamten Signaldauer von 45 Minuten entsprach.

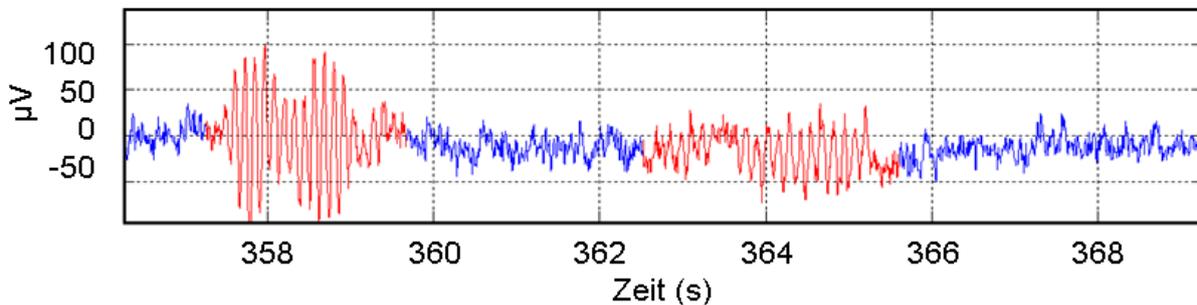


Abbildung 4: Ein Segment simulierter Spindeln (rot) und simuliertes Rauschen (aus Simon et al., in preparation).

Ergebnisse der Auswertung simulierter Daten

Eine Spindel wurde als detektiert gekennzeichnet, wenn eine Überlappung von mindestens 40% zwischen tatsächlicher und detektierter Spindel vorlag. Abbildung 5 zeigt die Receiver Operating Characteristic (ROC) – Kurve für verschiedene Signal-Rausch-Verhältnisse (Signal-to-Noise Ratio, SNR). Es zeigte sich, dass die FFT basierte Methode für alle SNR besser als die HHT basierte Methode war. Der FFT Ansatz liefert für SNR größer als 0 dB eine Sensitivität > 90% und eine Fehlerrate < 10%.

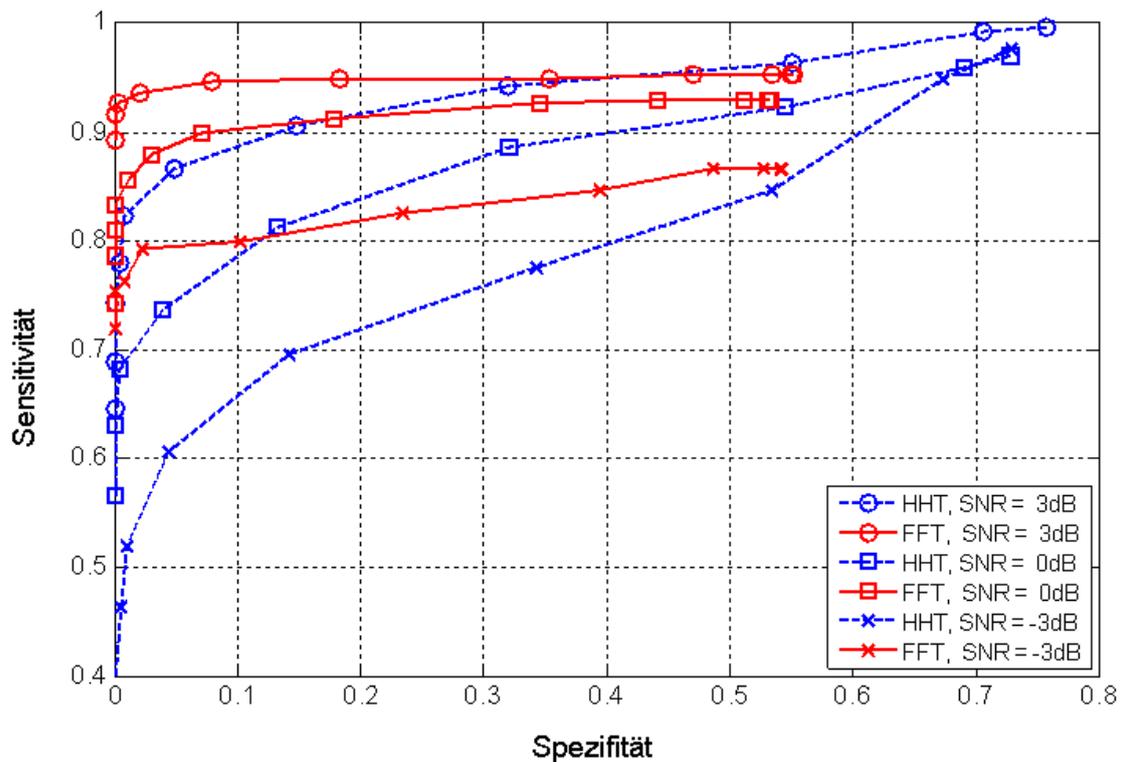


Abbildung 5: ROC-Kurve der Alpha-Spindel Detektionsleistung für FFT und für HHT basierte Detektion. Es werden ROC-Kurven für -3 dB, 0 dB und 3 dB SNRs angezeigt. Sensitivität wird als Verhältnis zwischen Anzahl detektierter und Anzahl der Gesamtspindeln definiert. Spezifität bezeichnet das Verhältnis zwischen Anzahl falsch detektiert Spindeln und der Gesamtzahl detektierter Spindeln.

Aufgrund besserer Detektionsergebnisse beziehen sich die folgenden Ausführungen auf die FFT basierte Spindel-Extraktion.

Reale Daten

Um die Anwendbarkeit des Spindel детектора zu untersuchen, wurden EEG Daten unter realen, monotonen Straßenverkehrsbedingungen aufgezeichnet, ausgewertet und die Ergebnisse mit anderen aus der Fachliteratur bekannten spektralen Maßen verglichen.

Zu Erhebung der EEG Daten wurden mehrere Pilotstudien und anschließende Experimentreihen mit dem Projektversuchsträger Mercedes-Benz S-Klasse (W221) auf der Autobahn A81 durchgeführt. Die Versuchsbedingungen wurden in enger Abstimmung mit den Projektpartnern festgelegt, die u.a. während der Pilotstudien als Versuchspersonen zur Verfügung standen und durch ihre Anmerkungen und Rückmeldung zum Gelingen der Versuche beigetragen haben. Das Ziel der Versuche bestand in der Untersuchung der Vigilanzabnahme des Fahrers unter monotonen Autobahnfahrten bei Tag. Die Strecke war ca. 439 km lang und die Fahrtdauer betrug ca. 3:45 Std. Alle Versuchsfahrten starteten um ca. 12:35. Die Versuchspersonen wurden instruiert ca. 130 km/h schnell zu fahren und keine Zusatzsysteme im Fahrzeug zu verwenden (Radio, Telefon, etc.). Die Fahrer mussten eine zweitrangige akustische Reaktionszeitaufgabe nach dem odd-ball Paradigma durchführen. Der Versuchsleiter begleitete die Versuchsperson über die gesamte Versuchsdauer. Die Versuchspersonen konnten den Versuch jederzeit, ohne jegliche Nachteile abbrechen. Eine ausführliche Beschreibung des Versuchsablaufes erfolgt in Abschnitt 5.3.

Das EEG wurde mit Hilfe eines BrainAmp Systems des Projektpartners Brain Products GmbH (BP) mit 64 Elektroden aufgezeichnet (Abtastrate = 1 kHz). Die Filterung, Artefaktbereinigung und Vorverarbeitung erfolgte wie oben beschreiben.

Ergebnisse der Auswertung realer Daten

10 (3 männliche, 4 weibliche; Alter: $M = 27,5$ Jahre, Altersspanne = 24-36 Jahre) der insgesamt 59 Versuchspersonen mussten die Versuchsfahrt aufgrund zu niedriger Vigilanz / Müdigkeit frühzeitig abbrechen (durchschnittliche Fahrtdauer = $2:23 \text{ h} \pm 0:38 \text{ h}$). Für diese Versuchspersonen konnte somit angenommen werden, dass ein für die Fahraufgabe zu niedriges Vigilanzniveau gegen Ende der abgebrochenen Fahrt vorlag. Des Weiteren ist für diese Versuchspersonen die Bedingungen erfüllt, zu Beginn der Fahrt wach und ein für die Fahraufgabe geeignetes Vigilanzniveau gehabt zu haben; die Versuchspersonen kamen ausgeruht zum Experiment. Dies wird auch durch die Befunde der Selbsteinschätzung untermauert. Die entsprechenden Werte auf der Karolinska Sleepiness Scale (KSS; Åkerstedt et al., 1990) stiegen von $3,3 \pm 1,34$ zu Beginn der Fahrt auf $8,5 \pm 0,53$ kurz vor Fahrabbruch an (Skala von 1 "extreme wach" bis 9 "extrem schläfrig, man kämpft gegen den Schlaf"). Somit liegen bei diesen 10 Versuchspersonen die beiden Bedingungen „hohe Vigilanz“ und „niedrige Vigilanz“ mit maximalem Kontrast vor. Um die entsprechenden EEG Korrelate dieser beiden Zustände genauer zu präzisieren wurden deshalb die ersten und die letzten 20 Fahrminuten dieser 10 Versuchspersonen verwendet.

Für jede dieser 20 Minuten wurde die Rate, Frequenz, Amplitude und Dauer der Alpha-Spindeln berechnet, sowie die absolute und die relative Alpha-Band Leistung. Letztere bezieht die Leistung im Alpha-Band auf die gesamte Leistung im Bereich 0,5 – 50,0 Hz. All diese spektralen Merkmale wurden an 43 von 62 EEG Kanälen berechnet; von der Analyse ausgeschlossen wurden Kanäle mit hohem Anteil an Muskelartefakten.

Die Ergebnisse der Auswertung sind in Abbildung 6 dargestellt und zeigen, dass die Spindel-Rate die größten Änderungen aufweist.

Um die statistische Aussagefähigkeit der neuen EEG Merkmale zu untersuchen, wurde eine messwiederholte multivariate Varianzanalyse (MANOVA) für die betrachteten EEG Merkmale durchgeführt. Als Maß für statistische Signifikanz und Effektstärke werden im Folgenden die p und die η^2 Werte berichtet; in Abbildung 7 sind die topgraphischen Verteilungen dieser Maße dargestellt (graphische Darstellung mit EEGLab, Delorme et al., 2004).

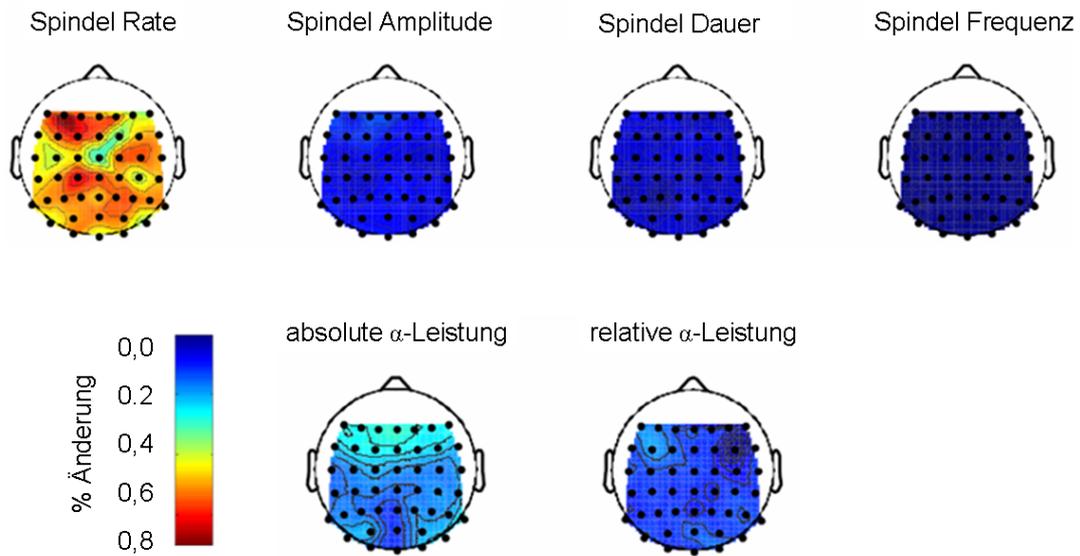


Abbildung 6: Prozentuale Änderung der Spindel sowie der spektralen Parameter zwischen den ersten (hohe Vigilanz) und den letzten (sehr niedrige Vigilanz) 20 Minuten Zeitabschnitten.

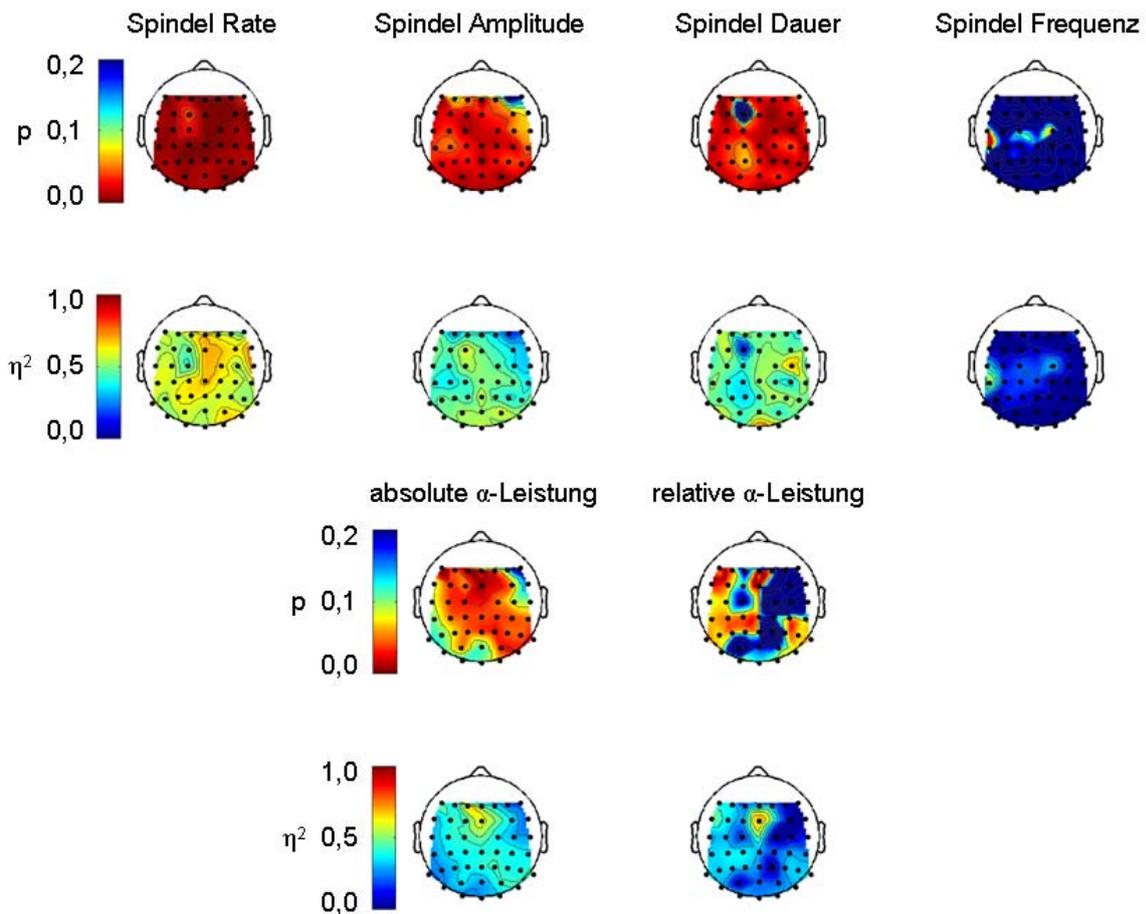


Abbildung 7: Topographie der p und η^2 Werte für messwiederholte MANOVA für jedes EEG-Merkmal und jeden Kanal. Die Farbskalen sind für die p und partiellen η^2 Werte umgekehrt, so dass rot höhere Signifikanz und eine stärkere Effektstärke darstellt.

Auch im Falle der statistischen Auswertung zeigt die Spindelrate die besten Ergebnisse. Da für dieses Merkmal alle Kanäle zu signifikanten und reliablen Aussagen führen, ist dieses EEG Merkmal besonders für die praktische Anwendung im Fahrzeug von Bedeutung. Insbesondere aufgrund der Tatsache, dass für dieses Merkmal alle Elektroden eine ähnliche Aussagefähigkeit aufweisen, kann die Anzahl notwendiger Elektroden auf ein Minimum reduziert werden und folglich die Präparationszeiten von Probanden erheblich reduziert werden.

Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass es gelungen ist, mit Hilfe der Alpha-Spindel Rate ein EEG-basiertes Maß abzuleiten, das auch unter realen Straßenverkehrsbedingungen eine zuverlässige Schätzung der Fahrervigilanz mit hoher zeitlicher Auflösung ermöglicht.

Zurzeit ist kein direkter Einsatz eines EEG Systems als Endprodukt im Fahrzeug absehbar, jedoch bietet das abgeleitete Vigilanzmaß ein wertvolles objektives Außenkriterium bei der Entwicklung und Validierung von Fahrerassistenzsystemen. Des Weiteren erlaubt das Vigilanzmaß Faktoren zu identifizieren, die sich negativ und positiv auf den Fahrervigilanzzustand auswirken.

Dadurch wird eine optimale Auswirkung von Fahrerassistenzsystemen gewährleistet, was eine Erhöhung der Fahrersicherheit zur Folge hat.

Literaturverzeichnis

Åkerstedt T & Gillberg M (1990). Subjective and objective sleepiness in the active individual. *International Journal of Neuroscience*, 52: 29-37.

Belz SM, Robinson GS & Casali JG (2004). Temporal separation and self rating of alertness indicators of driver fatigue in commercial motor vehicle operators. *Human Factors*, 46(1): 154-69.

Brookhuis KA & de Waard D (1973). The use of psychophysiology to assess driver status. *Ergonomics* 1993;36:1099–110. Hoddes E, Zarcone V, Smythe H, Phillips R, Dement WC. Quantification of sleepiness: a new approach. *Psychophysiology*, 10:431-6.

Cantero JL & Atienza M (2000). Spectral and Topographic Microstructure of Brain Alpha Activity During Drowsiness at Sleep Onset and REM Sleep. *Journal of Psychophysiology* 13(3): 151-8.

Cantero JL, Atienza M & Salas RM (2004). Human alpha oscillations in wakefulness, drowsiness period, and REM sleep: different electroencephalographic phenomena within the alpha band. *Clinical Neurophysiology*, 32(1): 54-71.

Campagne A, Pebayle T & Muzet A (2004). Correlation between driving errors and vigilance level: influence of the driver's age. *Physiology & Behavior*, 80: 515-24.

Delorme A & Makeig S (2004): EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *J Neurosci Methods*, 134: 9-21.

Eoh HJ, Chung MK & Kim SH (2005). Electroencephalographic study of drowsiness in simulated driving with sleep deprivation. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35: 307-20.

- Hanslmayr S, Aslan A, Staudigl T, Klimesch W, Herrmann CS & Bäuml KH (2007). Prestimulus oscillations predict visual perception performance between and within subjects. *Neuroimage*, 37: 1465-73.
- Horne JA & Baulk SD (2004). Awareness of sleepiness when driving. *Psychophysiology*, 4: 97-110.
- Johns MW (1991). A new method for measuring daytime sleepiness: the Epworth sleepiness scale. *Sleep*, 14:540-5.
- Jung T-P, Makeig S, Stensmo, M & Sejnowski TJ (1997). Estimating alertness from the EEG power spectrum. *IEEE Trans Biomed Eng*, 44(1): 60-9.
- Kaida K, Takahashi M, Åkerstedt T, Nakata A, Otsuka Y, Haratani T & Fukasawa K (2006). Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables. *Clinical Neurophysiology*, 117:1574-81.
- Kecklund G & Åkerstedt T (1993). Sleepiness in long distance truck driving: an ambulatory EEG study of night driving. *Ergonomics*, 36:1007-17.
- Klimesch W (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Research Reviews*, 29: 169-95.
- Klimesch W, Sauseng P & Hanslmayr S (2007). EEG alpha oscillations: the inhibition-timing hypothesis. *Brain Research Reviews*, 53: 63-88.
- Lal SKL & Craig A (2002). Driver fatigue: electrophysiology and psychological assessment. *Psychophysiology*, 39:1-9.
- Lansdown TC (2001). Causes, measures and effects of driver visual workload. In Hancock PA, Desmond PA, eds. *Stress, Workload and Fatigue*. Lawrence Erlbaum: London, 351-69.
- Lee TW, Girolami M & Sejnowski TJ (1999). Independent component analysis using an extended infomax algorithm for mixed sub-Gaussian and super-Gaussian sources. *Neural Computation*, 11: 417-41.
- Lemke M (1982). Correlation between EEG and driver's actions during prolonged driving under monotonous conditions. *Accident Analysis and Prevention*, 14: 7-17.
- Moller HJ, Kayumov L, Bulmash EL, Nhan J & Shapiro CM (2006). Simulator performance, microsleep episodes, and subjective sleepiness: normative data using convergent methodologies to assess driver drowsiness. *Journal of Psychosomatic Research*, 61: 335-42.
- O'Hanlon JF & Kelly GR (1977). Comparison of performance and physiological changes between drivers who perform well and poorly during prolonged vehicular operation. In Mackie R, editor. *Vigilance*. Plenum Press, New York, 87-109.
- Otmani S, Pebayle T, Roge J (2005). Muzet A. Effect of driving duration and partial sleep deprivation on subsequent alertness and performance of car drivers. *Physiology & Behavior*, 84:715-24.
- Papadelis C, Chen Z, Kourtidou-Papadeli C, Bamidis PD, Chouvarda I, Bekiaris E & Maglaveras N (2007). *Clinical Neurophysiology*, 118: 1906-22.
- Petsche H, Kaplan S, von Stein A & Filz O (1997). The possible meaning of the upper and lower alpha frequency ranges for cognitive and creative tasks. *Int J. Psychophysiology*, 26 (1-3): 77-97.

- Pfurtscheller G, Stancák A & Neuper C (1996). Event-related synchronization (ERS) in the alpha band - An electrophysiological correlate of cortical idling: a review. *International Journal of Psychophysiology*, 24: 39-46.
- Riemersma JBJ, Sanders AF, Wildervanck C & Gaillard AW (1977). Performance decrement during prolonged night driving. In *Vigilance Theory, Operational Performance, and Physiological Correlates*, Mackie, RR eds., Plenum Press, New York, pp 41-58.
- Salisbury J & Sun Y (2007). Rapid screening test for sleep apnea using a nonlinear and nonstationary signal processing technique. *Medical Engineering & Physics*, 29: 336-43.
- Schmidt EA, Schrauf M, Simon M, Fritzsche M, Buchner A & Kincses WE (2009). Drivers' misjudgement of vigilance state during prolonged monotonous daytime driving. *Accident Analysis and Prevention*, 41: 1087-93.
- Shaw JC (2003). *The Brain's Alpha Rhythms and the Mind*. Elsevier New York, 2003
- Tietze H & Hargutt V (2001). Zweidimensionale Analyse zur Beurteilung des Verlaufs von Ermüdung. 43. Tagung experimentell arbeitender Psychologen, Regensburg Germany.
- Van Dijk H, Schoffelen JM, Oostenveld R & Jensen O (2008). Prestimulus oscillatory activity in the alpha band predicts visual discrimination ability. *The Journal of Neuroscience*, 28(8): 1816-23.
- Wagenmakers EJ, Farrell S & Ratcliff R (2004). Estimation and interpretation of $1/\alpha$ noise in human cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(4), 59-615.
- Xie H & Wang Z (2006). Mean frequency derived via Hilbert-Huang transform with application to fatigue EMG signal analysis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 82(2), 114-20
- Yang Z, Yang L & Qi D (2005). Detection of spindles in sleep EEGs using a novel algorithm based on the Hilbert-Huang transform. 4th Int. Conf. on Wavelet Analysis and its Applications, Macau SRA, China

5.3 Messung der Fahrervigilanz im Fahrzeug

Einleitung

Ausgehend von der Tatsache, dass 15-20% aller tödlichen Unfälle Fahrermüdigkeit bedingte Vigilanzeinbrüche als Ursache haben (Hell & Langwieder, 2001; CARE, EU Straßenunfall Datenbank, 2009), was allein im Jahr 2007 europaweit mindestens 6.000 Todesfällen im Straßenverkehr durch vigilanzgeminderte Zustände entspricht.

Mackworth (1957) definierte Vigilanz als den Zustand der Bereitschaft, spezifische, kleine und in zufälliger Abfolge erscheinende Änderungen in der Umgebung wahrzunehmen und darauf zu reagieren. Insbesondere unter monotonen Fahrbedingungen kann die Fahraufgabe folglich als eine Vigilanzaufgabe betrachtet werden, was auch der etwas weiter gefassten Vigilanzdefinition nach Parasuraman (1998) entspricht, der zufolge Vigilanz der Fähigkeit entspricht, die Aufmerksamkeit auf eine Aufgabe über eine bestimmte Zeitspanne hinweg aufrecht zu erhalten. Veränderungen der Vigilanz, insbesondere Vigilanzabnahmen gehen daher mit einem erhöhten Unfallrisiko einher.

Bisherige Studien und Untersuchungen zur negativen Auswirkungen von Vigilanzeinbrüchen und Müdigkeit auf die Fahrsicherheit wurden hauptsächlich nachts, im Fahr Simulator und mit schlafdeprivierten Probanden durchgeführt, wobei der Großteil dieser Studien das Auftreten von Mikroschlaf untersuchte (Boyle et al., 2008; Moller et al., 2006; Papadelis et al., 2007). Sowohl Unfalldaten (Folkard, 1997) als auch experimentelle Studien (Thiffault and Bergeron, 2003) liefern jedoch Hinweise dafür, dass auch tagsüber und insbesondere unter monotonen Fahrbedingungen (Dinges, 1995) fahrsicherheitskritische Vigilanzeinbrüche auftreten können. Untersuchungen zur Fahrervigilanz bei monotonen Tagfahrten existieren hingegen sehr wenige, wobei auch nur ein sehr geringer Anteil dieser Studien unter realen Fahrbedingungen durchgeführt wurde (Brookhuis and DeWaard, 1993; Tejero and Choliz, 2002).

Ausgehend von Befunden, dass Müdigkeit unter realen Bedingungen einen unterschiedlichen Verlauf aufweist als unter realen Fahrten (Belz et al., 2004; Philip et al., 2005) und um eine erhöhte ökologische Validität zu gewährleisten, wurden die von uns im vorliegenden Projekt durchgeführten Untersuchungen unter realen Fahrbedingungen durchgeführt.

Vigilanz beeinflussende Faktoren

In Abhängigkeit davon, ob sie ihren Ursprung innerhalb oder außerhalb des Körpers (in der Umwelt) haben, können laut Thiffault and Bergeron (2003) Vigilanz beeinflussende Faktoren in interne und in externe Faktoren unterteilt werden.

Die Monotonie der Fahraufgabe ist somit ein exogener Faktor, der einen wesentlichen Einfluss auf die Fahrervigilanz hat und auch bei der Entstehung von Müdigkeit und Schläfrigkeit eine maßgebende Rolle spielt (Dinges, 1995; Thiffault and Bergeron, 2003). Im Sinne von Wertheim's (1991) Definition, wird Monotonie beim Autofahren nicht nur durch eine reizarme Umgebung sondern auch durch die Vorhersagbarkeit der Fahrsituation hervorgerufen. Weitere vigilanzmindernde Faktoren, die in unseren Untersuchungen eine Rolle spielten waren Müdigkeit und Schläfrigkeit (Philip et al., 2005).

Unabhängig davon, welcher dieser Faktoren oder welche Kombination dieser Faktoren letztendlich zu einer Vigilanzabnahme führt, ist die Fähigkeit des Fahrers, seinen eigenen Vigilanzzustand einzuschätzen für die Verkehrssicherheit von größter Bedeutung.

Selbsteinschätzung von Vigilanz

Die in der Fachliteratur berichteten Ergebnisse über die Zuverlässigkeit der Selbstschätzung von Vigilanz sind zum Teil sehr widersprüchlich. Mehrere Studien konnten zeigen, dass die Selbsteinschätzung kein zuverlässiger Indikator für Reaktionszeiten, Fahrperformanz oder Einschlafneigung darstellt (Belz et al., 2004; Lenné et al., 1997; Moller et al., 2006; Philip et al., 1997, 2003, 2005).

In anderen Studien hingegen, die hauptsächlich mit schlafentzogenen Probanden oder unter Nachtfahrtbedingungen gemacht wurden, erwies sich die Selbsteinschätzung der Vigilanz als geeignetes Maß, um eigene Verhaltensperformanzeinbrüche, wie im Falle einer Fahraufgabe, zu beurteilen (Baranski, 2007; Horne and Baulk, 2004; Lisper et al., 1986; Nordbakke and Sagberg, 2007).

Eine mögliche Erklärung für diese widersprüchlichen Ergebnissen kann die Tatsache sein, dass den Fahrern ihr eigener Vigilanzzustand im Allgemeinen bewusst ist, dass frühe Warnungen oder Hinweise bzgl. einer geminderten Vigilanz meistens jedoch entweder ignoriert oder falsch interpretiert werden. Ein weiterer Grund für die widersprüchlichen Ergebnisse dieser Studien könnte in den unterschiedlichen Vigilanzmaßen liegen, die in diesen Studien verwendet wurden. Um ein ganzheitliches Bild über den Vigilanzzustand des Fahrers zu erhalten und um die einzelnen Maße miteinander besser verglichen zu können, haben wir uns entschieden, in unseren Studien objektive und subjektive Vigilanzmaße gleichzeitig zu verwenden.

Objektive Vigilanzmaße und ihre Verwendung in monotonen Fahrbedingungen

Performanzmaße

Gemäß Ihrer Definition (Mackworth, 1957) haben Performanzmaße eine hohe ökologische Validität. Aus Gründen der Verkehrssicherheit wurden allerdings Zustände geminderter Fahrervigilanz vermieden, die zu einer gefährlichen Abnahme der Fahrperformanz geführt hätten, wie z.B. sicherheitskritische Fehler der Querregelung (Abkommen von der Fahrbahn) und der Längsregelung (Auffahrunfälle, etc.). Da wir allerdings auch kleinste Performanzänderungen detektieren wollten, um die Dynamik von Vigilanzänderungen auch zeitlich bestmöglich zu beschreiben, wurde eine von der Fahraufgabe unabhängige und mit dieser nicht interferierende auditorische Reaktionszeitaufgabe implementiert, die als erste auf kleinste Vigilanzveränderungen reagieren sollte. Um sicherzustellen, dass die Fahrer diese Zweitaufgabe nachrangig behandeln (O'Donnell and Eggemeier, 1986), wurden sie explizit darauf hingewiesen und instruiert, die Fahraufgabe als vorrangige Erstaufgabe zu bearbeiten. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass aufgrund der persönlichen Betroffenheit der Fahrer im Falle von Fahrfehlern, der Fahraufgabe die höchste Priorität zugeordnet wurde.

Unterstützt wird dieser Ansatz durch die Ergebnisse der Studie von Laurell and Lisper (1978), die zeigt, dass Zweitaufgaben unter realen Fahrbedingungen sowohl sensitiv gegenüber Vigilanzänderungen als auch prädiktiv hinsichtlich Bremsreaktionen sind. Des Weiteren wurde in anderen Studien gezeigt (Graw et al., 2004; Williams et al., 1959), dass langsame

Reaktionszeiten, im Gegensatz zu schnellen, besonders gute Indikatoren für geminderte Vigilanz sind.

Physiologische Maße

Ein zentraler und innovativer Aspekt des vorliegenden Projektes ist die Verwendung des EEGs als neurophysiologische Messmethode zur Bestimmung kognitiver Fahrerzustände unter realen Fahrbedingungen. Ausgehend von Untersuchungen, die gezeigt haben, dass das Alpha-Band (6-13 Hz) mit Fahrervigilanz korreliert (Kecklund and Akerstedt, 1993; Papadelis et al., 2007; Tietze and Hargutt, 2001), wurde das im Rahmen dieses Projektes weiterentwickelte Verfahren eingesetzt, das einerseits an die im Laufe des Projekts durchgeführten Studien aufbaut und andererseits sensitiver mit Vigilanzschwankungen einhergeht. Des Weiteren wurden auch die P3 Amplituden der von der Zweitaufgabe ausgelösten ereigniskorrelierten Potentiale aufgezeichnet und ausgewertet (z.B. Polich, 2007). Gemäß diesem, aus der Literatur bekannten Ansatzes, widerspiegelt die P3 Amplitude ein Maß für die kognitive Verarbeitungstiefe eines auditorischen Reizes, d.h die P3 Amplitude ist umgekehrt proportional zum Umfang kognitiver Ressourcen, die für die entsprechende sensorische Reizverarbeitung zur Verfügung steht. Um den Erkenntnissen Rechnung zu tragen, die einen Zusammenhang zwischen Herzrate und physischer Aktivierung aufzeigen (z.B. O'Hanlon and Kelly, 1977), wurde als weitere physiologische Kenngröße das Elektrokardiogramm (EKG) aufgezeichnet und ausgewertet. Für eine umfassende Übersicht objektiver Ansätze zur Fahrerzustandbestimmung empfiehlt sich der Artikel von Tejero Gimeno et al. (2006).

Methoden

Versuchspersonen

An der Studie nahmen 29 freiwillige Versuchspersonen teil (Rechtshänder, 20 männlich, 9 weiblich, Durchschnittsalter = 29,2 Jahre, Altersspanne: 23 – 49), die eine umfangreiche Fahrpraxis (durchschnittliche jährliche Fahrleistung = 20.500 km) aufwiesen.

Die Versuchspersonen wurden auf eine Reihe von Ausschlusskriterien untersucht (Händigkeit, Seh- und Hörbehinderung, diverse Krankheiten) und instruiert, die Nacht vor der Experimentteilnahme auszuschlafen und am Morgen des Experimenttages auf den Konsum koffeinhaltiger Getränke zu verzichten. Die Teilnahme am Experiment wurde mit einem Geschenk im Wert von ca. 25,00 EUR belohnt. Aufgrund technischer Schwierigkeiten, die zu unvollständigen Datenaufzeichnungen führten, mussten 6 Datensätze verworfen werden. Weitere 2 Datensätze mussten aufgrund der Nichterfüllung der Versuchspersonenkriterien von der weiteren Datenanalyse ausgeschlossen werden, während drei weitere Datensätze verworfen werden mussten, weil die Versuchspersonen aufgrund erhöhter Müdigkeit den Versuch verfrüht abbrechen mussten. Somit standen für die weitere Datenanalyse insgesamt 19 Datensätze zur Verfügung (14 männliche VPs, 5 weibliche VPs; Alter: Mittelwert= 29,4 Jahre, Altersspanne: 23–49 Jahre).

Material und Versuchsablauf

Am Tag des Experiments kamen die Versuchspersonen um 10:30 im EEG Labor der Daimler AG an, wo sie nach der Inempfangnahme die Einverständniserklärung für die Experimentteilnahme unterzeichneten. Während des Anbringens der physiologischen Messsensoren, füllten die Versuchspersonen die deutsche Version des Morningness–

Eveningness Fragebogens (D-MEQ; Griefahn et al., 2001) sowie den Edinburgh Händigkeitsbogen aus (Oldfield, 1971). Um mögliche zirkadiane (Folkard, 1997; Lenné et al., 1997) oder ernährungsbedingte (Smith and Miles, 1986) Effekte zu kontrollieren, wurde allen Versuchspersonen das Mittagessen um 11:30 serviert, bevor anschließend im Fahrzeug in einer EEG-Baseline typische fahrbedingte Bewegungsartefakte und ein Ruhe-EEG aufgezeichnet wurden.

Die in der Baseline aufgezeichneten Daten wurden den Projektpartner CHARITE, TUB, IDALAB und FIRST zur Verfügung gestellt, um daraus typische Artefaktmerkmale und entsprechende Klassifikation für spätere Datenanalyse bereitzustellen.

In Anlehnung an die Vorschriften der Straßenverkehrsordnung für Lastkraftwagenfahrer, der zufolge die LKW Fahrer nach spätestens 4,5 Fahrzeit Stunden eine Pause von mindestens 45 Minuten einlegen müssen, wurde auf der Autobahn A81 eine Strecke zwischen der Ausfahrt Ehingen und der Ausfahrt Gottmadingen gewählt, die eine Länge von ca. 428 km hatte und einer Fahrdauer von ca. 4,0 Stunden entsprach. Die Strecke war in 4 Abschnitten je 107 km unterteilt, die jede einer Fahrdauer von ca. 1 Stunde entsprach. Eine höchstmögliche Fahrmonotonie wurde dadurch gewährleistet, dass das Experiment auf einer relativ wenig befahrenen Autobahn außerhalb der Berufsverkehrszeiten stattfand. Der erste (1) und der letzte (4) Fahrtabschnitt befanden sich in der Nähe dicht besiedelter Gebiete und enthielten Schnellstrassenabschnitte. Gemäß einer Studie der Bundesanstalt für Straßenwesen (Fitschen et al., 2007) ist die Verkehrsdichte in den Abschnitten 1 und 4 deshalb höher als in den Abschnitten 2 und 3 (Abbildung 8). Der Versuch startete um 12:45 Uhr und dauerte im Schnitt 3:45 Stunden; mit Ausnahme jener Fälle, in denen die Fahrt Müdigkeitsbedingt früher abgebrochen werden musste. Aufgrund des Streckenverlaufs wurde die Monotonie der Fahrt durch drei festgelegte Wendepunkte unterbrochen, die im Schnitt nach 01:00, 01:40 und 02:20 Stunden Fahrdauer durchfahren wurden.

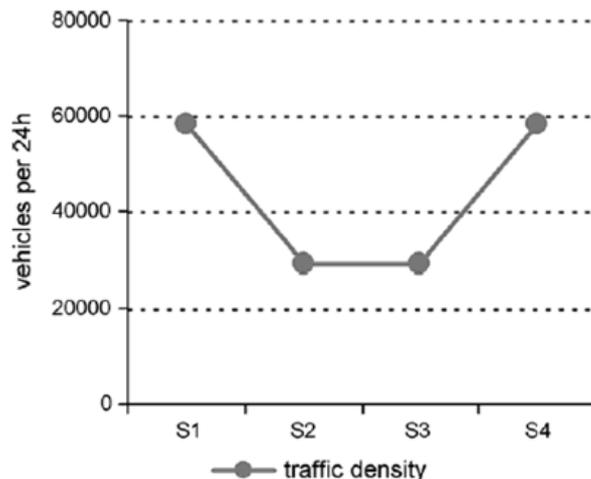


Abbildung 8: Durchschnittliches 24-Std. Verkehrsaufkommen (aus Schmidt et al., 2009).

Die Versuchspersonen wurden instruiert, ausreichend ausgeruht zum Experiment zu erscheinen. Des Weiteren wurden sie darüber unterrichtet, das Experiment jederzeit, ohne jegliche Benachteiligung und ohne Verlust der Aufwandsentschädigung unterbrechen zu können. Von dieser Möglichkeit wurde in drei Fällen Gebrauch gemacht. Als Versuchsfahrzeug wurde das projekteigene Versuchsfahrzeug verwendet (W221). Die

Versuchspersonen hatten die Aufgabe, verkehrsgerecht und den Regeln der Straßenverkehrsordnung konform mit einer Maximalgeschwindigkeit 130 km/h zu fahren, was der Autobahn-Richtgeschwindigkeits-Verordnung des Bundesverkehrsministeriums entspricht. Um Muskelartefakte durch Schaltvorgänge zu vermeiden, wurden die Versuchspersonen angewiesen im Automatikmodus zu fahren. Des Weiteren durfte während der Fahrt das Autoradio nicht verwendet und auch keine sonstigen Geräte bedient werden, die nicht für eine sichere Fahraufgabe erforderlich waren.

Subjektive Maße zur Vigilanzmessung

Als Kompromiss zwischen einer hohen zeitlichen Auflösung und einer minimalen Störung des zu messenden Zustandes durch die Befragung, wurde die Abfrage zur retrospektiven Vigilanzeinschätzung alle 20 Minuten durchgeführt. Als subjektive Vigilanzindikatoren verwendeten wir den gut etablierte single-item Indikator für Müdigkeit KSS (Karolinska Sleepiness Scale (KSS); Åkerstedt and Gillberg, 1990) sowie zwei ähnliche, eigens für diesen Versuch entwickelte Skalen zur Messung der Unaufmerksamkeit (ATT) und der Monotonie (MON) (Tabelle 1). Der Versuchsleiter, der die Versuchsperson über die gesamte Dauer des Experiments begleitete, befragte den Fahrer alle 20, eine retrospektive Abschätzung der letzten 20 Minuten bezüglich Müdigkeit, Unaufmerksamkeit sowie Monotonie den jeweiligen Skalen entsprechend abzugeben.

Concerning the time period since the last prompting. . .									
KSS	. . .how would you describe your predominant state?								
	Extremely alert 1	2	Alert 3	4	Neither alert nor sleepy 5	6	Sleepy, but no difficulty remaining awake 7	8	Extremely sleepy, fighting sleep 9
ATT	. . .how attentively have you been driving?								
	Extremely attentively 1	2	Attentively 3	4	Neither attentively nor inattentively 5	6	Inattentively 7	8	Extremely inattentively 9
MON	. . .how did you perceive the drive?								
	Extremely varied 1	2	Varied 3	4	Neither varied nor monotonous 5	6	Monotonous 7	8	Extremely monotonous 9

Tabelle 1: Subjektive Maße (aus Schmidt et al., 2009).

Performanzmaße zur Vigilanzmessung

Die Versuchspersonen wurden angewiesen, die auditorische Reaktionszeitaufgabe (Zweitaufgabe) nur dann auszuführen, wenn es die Sicherheit der Fahraufgabe zuließ. Die Versuchspersonen mussten mit dem Drücken eines Tasters, der am rechten Daumen des Probanden angebracht war, auf den seltenen Zielton (500 Hz) reagieren, der mit einer 20% Auftrittswahrscheinlichkeit in einer zufälligen Folge mit einem häufigen Distraktorton (400 Hz, 80%) dargeboten wurde. Das Interstimulusintervall variierte zufällig zwischen 4 und 6 Sekunden. Eine konstante, relativ geringe Lautstärke reduzierte die Warnwirkung der Töne auf ein Minimum.

Nur Tastendrucke mit einer Reaktionszeit zwischen 200 – 4000 ms nach Stimuluspräsentation wurden als valide Reaktionen gewertet und für die Auswertung verwendet. Als Maß langsamer, bzw. schneller Reaktionszeiten wurde entsprechend für jede einzelne Versuchsperson und für jeden der entsprechenden vier 107 km Fahrtabschnitte der Mittelwert der Reaktionszeiten des 20%, bzw. des 80% Perzentsils der Reaktionszeiten berechnet.

Ausgehend von den Erkenntnissen, dass langsame Reaktionszeiten besonders gut geeignet sind, um Vigilanzänderungen zu quantifizieren (Williams et al., 1959), wurde der Mittelwert des 80% Perzentils der langsamsten Reaktionszeiten als Performanzmaß verwendet.

Physiologische Maße

Das EEG wurde mit 128 Elektroden und das Elektrokardiogramm (EKG) mit einer Elektrode (1 kHz Abtastrate, low cut-off bei 0,016 Hz, high cut-off bei 250 Hz) eines EEG Verstärkersystems des Projektpartners BP (BrainProducts GmbH) aufgezeichnet. Das EEG Signal wurde anschließend auf eine Abtastrate von 250 Hz reduziert und im Bereich 0,5 – 50 Hz Bandpass gefiltert. Artfakt behaftete Kanäle wurden aus der weiteren Analyse entfernt. Um den Einfluss von Augenbewegungs- sowie Muskelartefakte zu minimieren, wurden mit Hilfe des „Independent Component Analysis“ Verfahrens (Jung et al., 2000) nur jene Komponente für weitere EEG Analyse zugelassen, die die räumlich-zeitliche Charakteristik neuronaler Aktivität aufwies.

Als neurophysiologisches Vigilanzmaß verwendeten wir die Alpha-Spindelrate. Um die Vergleichbarkeit mit den anderen Vigilanzmaßen zu gewährleisten, wurde für jede Versuchsperson und für jeden der vier Streckenabschnitte die mittlere Spindelrate an der Elektrode Pz berechnet. Die Aufzeichnung mit 128 Elektroden wurde den übrigen Projektpartnern zur Verfügung gestellt, um das EEG auf weitere Korrelate der Vigilanzänderungen zu untersuchen. Für eine interindividuelle Vergleichbarkeit wurde pro Versuchsperson die prozentuale Änderung der Alpha-Spindelrate in den einzelnen Fahrstreckenabschnitten relativ zum ersten Streckenabschnitt berechnet.

Für die Berechnung der P3- Amplitude wurde das vorverarbeitete EEG Signal an der Elektrode CPz auf den Zielton stimulusbezogen gemittelt und eine auf das Prestimuluszeitfenster -200 – 0 ms bezogene Baselinekorrektur durchgeführt. Als P3 Amplitude wurde die Differenz zwischen dem Signalmaximum zwischen 300 – 600 ms und dem Signalminimum zwischen 0 – 300 ms definiert („peak-to-peak amplitude“).

R-Zacken wurden im EKG mit Hilfe eines selbst entwickelten und in MATLAB implementierten Algorithmus' identifiziert. Die mittlere Herzrate wurde für jede Versuchsperson und für jeden Streckenabschnitt berechnet.

Datenreduktion

Um einen bestmöglichen Vergleich der subjektiven, physiologischen und performanzbasierten Korrelate zu gewährleisten, wurden alle Fahrtepochen ermittelt, in denen keine monotone Fahrbedingung herrschte (Kommunikation zwischen Versuchsleiter und Versuchsperson, Wendemanöver, beanspruchende Verkehrssituationen, Staus, kurze Pausen, etc.). Diese Situationen wurden vom Versuchsleiter durch Marker im EEG protokolliert, so dass die entsprechenden Daten anschließend aus der Analyse ausgeschlossen werden konnten. Durch diese Datenbereinigung wurden im Durchschnitt 11,9% der Daten entfernt (SD = 2,9).

Versuchsplan

Als unabhängige Variable ging in die Auswertungen die zurückgelegte Fahrstrecke ein (4 Fahrabschnitte je 107 km). Abhängige Variablen waren:

- (a) subjektive Vigilanzmaße (Müdigkeit (KSS), Unaufmerksamkeit (ATT), Monotonie (MON));
- (b) Performanzmaße (langsame und schnelle Reaktionszeiten);
- (c) physiologische Vigilanzmaße (Alpha-Spindelrate (ASR), P3 Amplitude (P3A) und Herzrate (HR)).

Um den Effekt der zurückgelegten Fahrstrecke auf alle abhängigen Variablen zu untersuchen, wurde auf alle Intrasubjektvergleiche eine multivariate Analyse (MANOVA) angewandt. Alle multivariaten Tests entsprechen der gleichen F-Statistik wie berichtet. Das α Niveau wurde für alle Analysen auf 0,05 gesetzt. Wann immer die Nullhypothese (H_0) abgelehnt werden musste, wird das partielle η^2 als Maß für relative Effektstärke angegeben. Statistisch signifikante Ergebnisse wurden einer post hoc Trendanalyse unter Verwendung eines polynomialen Kontrastes unterzogen. Nur lineare und quadratische signifikante Trends werden berichtet.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der MANOVA Testung bezüglich des Effekts der Variablen „zurückgelegte Fahrstrecke“ (Abschnitte 1 – 4) auf die oben genannten abhängigen Variablen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Signifikante quadratische Trends für die KSS und ATT sind ein Hinweis auf einen besseren subjektiven Zustand zu Beginn und am Ende der Fahrt im Vergleich zu den beiden mittleren Abschnitten (Abbildung 9). Der gleiche Verlauf wurde auch für die abhängige Variable MON gefunden, allerdings wurde kein Signifikanzniveau erreicht.

	Main effect			Trend analysis			
	F(3,15)	p	η^2	Type	F(1,17)	p	η^2
Subjective							
MON	3.23	.053	.392	Quadratic	9.19	.008	.351
KSS	8.49	.002	.629	Quadratic	9.99	.006	.370
ATT	4.47	.020	.472	Quadratic	10.06	.006	.372
Performance							
Fast reactions	1.74	n.s.					
Slow reactions	6.38	.005	.561	Linear	13.36	.002	.440
Physiology							
ASR	5.05	.013	.503	Linear	9.77	.006	.365
P3A	3.74	.035	.428	Linear	10.25	.005	.376
Heart rate	11.86	<.001	.703	Linear	17.83	.001	.512

Tabelle 2: Zusammenfassung der Ergebnisse (aus Schmidt et al., 2009).

Wie erwartet, änderte sich die mittlere schnelle Reaktionszeit nicht im Verlaufe der Fahrt. Im Gegensatz dazu zeigte die mittlere langsame Reaktionszeit einen linearen Anstieg im Laufe der Fahrt von Fahrtabschnitt 1 bis 4 (Abbildung 10).

Einen ähnlichen Verlauf zeigen auch die physiologischen Maße Alpha-Spindelrate, P3 Amplitude und Herzrate (Abbildung 11, Abbildung 12, Abbildung 13). Es zeigte sich ein linearer Anstieg der Alpha-Spindelrate und ein lineares Abnehmen der P3 Amplitude sowie der Herzrate.

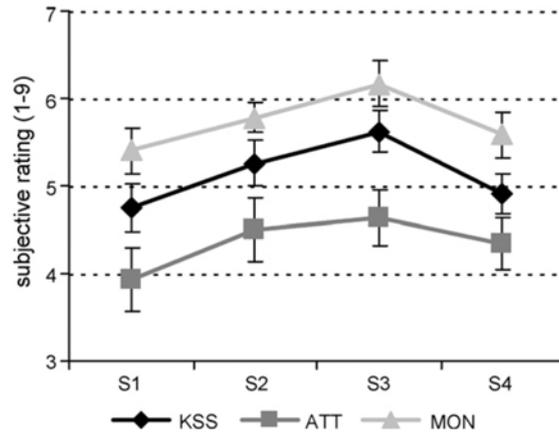


Abbildung 9: Subjektive Maße (Skala: 1–9). Fehlerbalken stellen den Standardfehler der Mittelwerte dar (aus Schmidt et al., 2009).

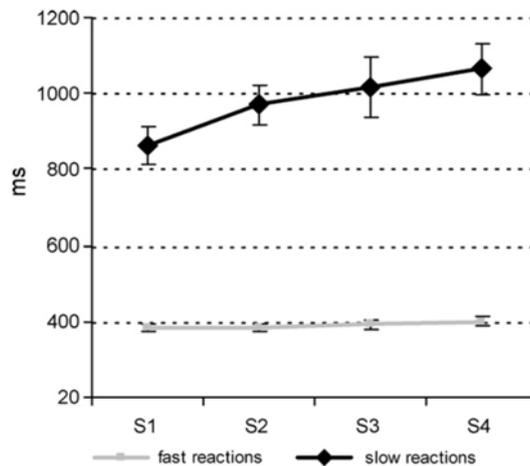


Abbildung 10: Reaktionszeiten. Fehlerbalken stellen den Standardfehler der Mittelwerte dar (aus Schmidt et al., 2009).

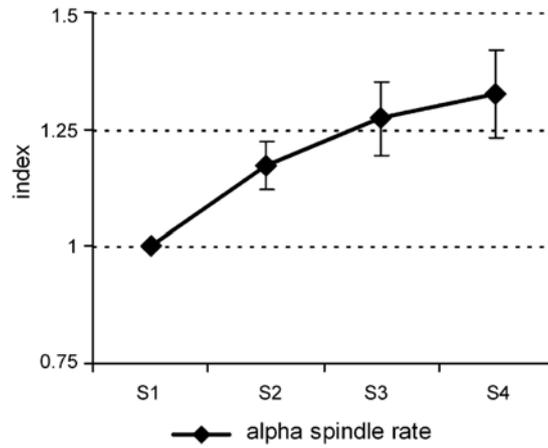


Abbildung 11: Alpha-Spindelrate an der Elektrode CPz (relative Werte bezüglich Abschnitt 1). Fehlerbalken stellen den Standardfehler der Mittelwerte dar (aus Schmidt et al., 2009).

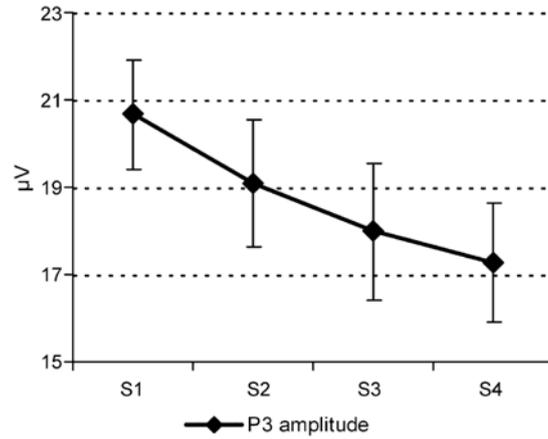


Abbildung 12: P3 Amplitude an Elektrode CPz. Fehlerbalken stellen den Standardfehler der Mittelwerte dar (aus Schmidt et al., 2009).

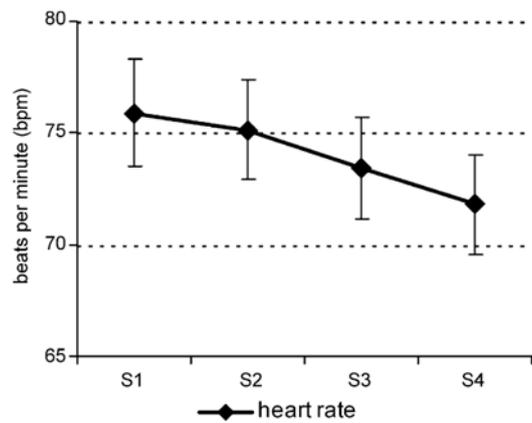


Abbildung 13: Herzrate. Fehlerbalken stellen den Standardfehler der Mittelwerte dar (aus Schmidt et al., 2009).

Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der subjektiven Selbsteinschätzung zeigen, dass der Zustand der Monotonie erfolgreich induziert werden konnte. Es zeigt sich auch, dass die quasi-experimentelle Variation der Verkehrsdichte zu einer niedrigeren Monotonie am Anfang und am Ende der Fahrt geführt hat. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass – wie die subjektive Selbsteinschätzung der eignen Müdigkeit sowie der Aufmerksamkeit zeigen – die Fahrer eine Vigilanzverbesserung gegen Ende der Fahrt berichteten. Diese Einschätzung widerspricht allerdings allen Ergebnissen der objektiven Vigilanzmaße. Reaktionszeiten, Alpha-Spindelrate, P3 Amplitude und Herzrate deuten in konsistenter Weise auf eine Vigilanzabnahme über die vier Streckenabschnitte hinweg, selbst im letzten Fahrtabschnitt hin. Dies ist ein Beleg dafür, dass Fahrer, die sich aufgrund langer monotoner Fahrten in einem geminderten Vigilanzzustand befinden, anfällig sind für eine Fehleinschätzung ihres eigenen Vigilanzzustandes, was negative Folgen auf ihre Fahrtauglichkeit und auf die Verkehrssicherheit hat.

Gründe für die subjektive Fehleinschätzung

Es lässt sich nicht abschließend klären, ob der subjektiv empfundene Vigilanzanstieg während des letzten Streckenabschnitts durch zirkadiane Effekte, durch eine höhere Verkehrsdichte, durch die freudige Erwartung der Beendigung des Experiments oder durch eine Kombination dieser Ursachen hervorgerufen wurde. Diese Sachlage mindert jedoch nicht im Geringsten die Relevanz der Erkenntnis, dass sich die subjektive Einschätzung des eigenen Vigilanzzustandes erheblich von den Werten objektiver Vigilanzmaße unterscheiden kann, was eine Gefahr für Fahrtauglichkeit und für die Verkehrssicherheit darstellt.

Reaktionszeiten

Der Anstieg der langsamen Reaktionszeiten im Vergleich zu den gleichbleibenden Mittelwerten der schnellen Reaktionszeiten spricht für die Validität der Annahmen bezüglich der unterschiedlichen Bedeutung dieser beiden Reaktionszeitmodi als Vigilanzindikatoren und der daraus resultierenden unterschiedlichen Betrachtungsweise. Ein möglicher unerwünschter Grund für den Anstieg der langsamen Reaktionszeiten könnte allerdings auch durch die erhöhte Verkehrsdichte im letzten Streckenabschnitt zustande kommen, die zu einer Erhöhung der Fahrerbeanspruchung geführt hätte, mit der entsprechenden Auswirkung auf die Reaktionszeiten. Diese alternative Begründung ist allerdings sehr unwahrscheinlich, weil eine Erhöhung visueller Aufmerksamkeit mit einer Verringerung der Alpha-Spindelrate einhergehen musste, was nicht festgestellt wurde. Interpretiert man die Zunahme der Alpha-Spindelrate aus Sicht der Aufmerksamkeitstheorie, so würde dies ein Umlenken der gerichteten Aufmerksamkeit aus dem visuellen in den auditorischen Bereich bedeuten, was schneller Reaktionszeiten zur Folge hätte (Gladwin and de Jong, 2005) – was ebenfalls nicht den Beobachtungen entspricht. Ein Anstieg der Fahrerbeanspruchung hätte allerdings auch zu einem Anstieg der Herzrate geführt, was ebenfalls nicht beobachtet wurde. Schlussendlich, da die Verkehrsdichte in den Abschnitten 1 und 4 nahezu identisch waren, hätten auch die Reaktionszeiten – falls Verkehrsdichte abhängig – nahezu gleiche Werte aufweisen müssen, was offensichtlich nicht der Fall war.

Unter der Annahme der Übertragbarkeit unserer Ergebnisse auf unerwartete Verkehrseignisse, die ebenfalls eine schnelle und angemessene Reaktion des Fahrers erfordern (Laurell and Lisper, 1978), kann die von uns gefundene Monotonie induzierte

Reaktionszeitverlängerung von durchschnittlich 200 ms in 7 m Bremswegverlängerung bei 130 km/h Fahrgeschwindigkeit übersetzt werden, was die Tragweite und die Bedeutung dieser Forschungsuntersuchungen für die Erhöhung der Fahrsicherheit mehr als verdeutlicht.

Fazit

Alle subjektiven und objektiven Vigilanzmaße zeigen für das erste $\frac{3}{4}$ einer langen und monotonen Fahrt eine kontinuierliche Vigilanzabnahme. Im letzten $\frac{1}{4}$ der Fahrtstrecke allerdings zeigt sich eine deutliche Dissoziation zwischen subjektiven und objektiven Vigilanzmaßen. Da alle objektiven Vigilanzmaße übereinstimmend eine Vigilanzabnahme zeigen, ist davon auszugehen, dass die Fahrer ihre eigene Vigilanz eindeutig überschätzen. Aufgrund unserer Ergebnisse kann diese Fehleinschätzung – wenn überhaupt – nur zum Teil durch die Faktoren höhere Verkehrsdichte, Erwartungshaltung und zirkadianem Rhythmus verursacht werden. Der Hauptgrund ist auf den verminderten Vigilanzzustand selber zurückzuführen, der die Fähigkeit, seinen eigenen Vigilanzzustand richtig einzuschätzen, beeinträchtigt, was negative Auswirkungen auf die Fahrtüchtigkeit der Fahrer und dadurch auf die Verkehrssicherheit hat.

Die Ergebnisse verdeutlichen auch die Bedeutung und den Nutzen von Fahrerassistenzsystemen, die den Fahrerzustand kontinuierlich überwachen, insbesondere Systeme, die bereits frühzeitig erste Anzeichen unaufmerksamen Fahrens erkennen. Diese Systeme eröffnen die Möglichkeit, die Fahrer frühzeitig über Veränderungen in ihrem Fahrverhalten zu informieren und sie dazu zu bewegen, Maßnahmen zur Vigilanzsteigerung zu ergreifen, was letztendlich die Wahrscheinlichkeit für unaufmerksamkeits- und müdigkeitsbedingte Unfälle reduziert.

Literaturverzeichnis

- Åkerstedt T & Gillberg M (1990). Subjective and objective sleepiness in the active individual. *International Journal of Neuroscience* 52: 29-37.
- Baranski JV (2007). Fatigue, sleep loss, and confidence in judgment. *Journal of Experimental Psychology: Applied* 13(4): 182-96.
- Belz SM, Robinson GS & Casali JG (2004). Temporal separation and self rating of alertness as indicators of driver fatigue in commercial motor vehicle operators. *Human Factors* 46 (1): 154-69.
- Boyle LN, Tippin J, Paul A & Rizzo M (2008). Driver performance in the moments surrounding a microsleep. *Transportation Research Part F* 11: 126-36.
- Brookhuis K & DeWaard D (1993). The use of psychophysiology to assess driver status. *Ergonomics* 36(9): 1099–110.
- CARE, road accidents database (2009). Road Safety Evolution in EU., http://ec.europa.eu/transport/road_safety/observatory/doc/historical_evol.pdf.
- Desmond PA & Hancock PA (2001). Active and passive fatigue states. In: Hancock, P.A., Desmond PA (Eds.), *Stress, Workload, and Fatigue*. LEA Publishers, London, pp 455-65.
- Dinges DF (1995). An overview of sleepiness and accidents. *Journal of Sleep Research* 4: 4-14.

- Faul F, Erdfelder E, Lang A-G & Buchner A (2007). G*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods* 39: 175-91.
- Fitschen A & Koßmann I, Bundesanstalt für Straßenwesen (2007). BAST-Bericht V 160: Traffic Development on Federal Trunk Roads in 2005.
- Folkard S (1997). Black times: temporal determinants of transport safety. *Accident Analysis and Prevention* 29(4): 417-30.
- Gladwin TE & de Jong R (2005). Bursts of occipital theta and alpha amplitude preceding alternation and repetition trials in a task-switching experiment. *Biological Psychology* 68: 309-29.
- Graw P, Kräuchi K, Knoblauch V, Wirz-Justice A & Cajochen C (2004). Circadian and wake-dependent modulation of fastest and slowest reaction times during the psychomotor vigilance task. *Physiology and Behavior* 80: 695-701.
- Griefahn B, Künemund C, Bröde P & Mehnert P (2001). Zur Validität der deutschen Übersetzung des Morningness-Eveningness-Questionnaires von Horne und Östberg. *Somnologie* 5: 71-80.
- Hell W & Langwieder K (2001). Einschlafunfälle im Straßenverkehr—Eine bisher oft verkannte Unfallursache. *Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft*.
- Horne J & Reyner L (1999). Vehicle accidents related to sleep: a review. *Occupational and Environmental Medicine* 56: 289-94.
- Horne JA & Baulk SD (2004). Awareness of sleepiness when driving. *Psychophysiology* 4: 97-110.
- Jung TP, Makeig S, Humphries C, Lee T-W, McKeown MJ, Iragui V & Sejnowski TJ (2000). Removing electroencephalographic artifacts by blind source separation. *Psychophysiology* 37: 163-78.
- Kecklund G & Akerstedt T (1993). Sleepiness in long distance truck driving: an ambulatory EEG study of night driving. *Ergonomics* 36(9): 1007-10017.
- Koelega HS, Verbaten MN, van Leeuwen TH, Kenemans JL, Kemner C & Sjouw W (1992). Time effects on event-related brain potentials and vigilance performance. *Biological Psychology* 34: 59-86.
- Laurell H & Lisper HO (1978). A validation of subsidiary reaction time against detection of roadside obstacles during prolonged driving. *Ergonomics* 21: 81-8.
- Lenné MG, Triggs TJ & Redman JR (1997). Time of day variations in driving performance. *Accident Analysis and Prevention* 29(4): 431-7.
- Lisper HO, Laurell H & van Loon J (1986). Relation between time to falling asleep behind the wheel on a closed track and changes in subsidiary reaction time during prolonged driving on a motorway. *Ergonomics* 29(3): 445-53.
- Mackworth NH (1957). Vigilance. *The Advancement of Science* 53 389-93.
- Moller HJ, Kayumov L, Bulmash EL, Nhan, J & Shapiro CM (2006). Simulator performance, microsleep episodes, and subjective sleepiness: normative data using convergent methodologies to assess driver drowsiness. *Journal of Psychosomatic Research* 61: 335-42.

- Nordbakke S & Sagberg F (2007). Sleepy at the wheel: knowledge, symptoms and behaviour among car drivers. *Transportation Research Part F* 10: 1-10.
- O'Donnell R & Eggemeier FT (1986). Workload assessment methodology. In: Boff KR; Kaufman L, Thomas JP (eds), *Handbook of perception and human performance*. Wiley, New York, pp 42-1-42-49.
- O'Hanlon JF & Kelly GR (1977). Comparison of performance and physiological changes between drivers who perform well and poorly during prolonged vehicular operation. In: Mackie, R. (ed.), *Vigilance*. Plenum Press, New York, pp 87-109.
- Oldfield RC (1971). The assessment and analysis of handedness. The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9: 97-113.
- Papadelis C, Chen Z, Kourtidou-Papadeli C, Bamidis PD, Chouvarda I, Bekiaris E & Maglaveras N (2007). Monitoring sleepiness with on-board electrophysiological recordings for preventing sleep-deprived traffic accidents. *Clinical Neurophysiology* 118: 1906-22.
- Parasuraman R (1998). In: Parasuraman R (ed.), *The Attentive Brain*. The MIT Press, Cambridge, MA.
- Philip P, Ghorayeb I, Leger D, Menny JC, Bioulac B, Dabadie P & Guilleminault C (1997). Objective measurement of sleepiness in summer vacation long-distance drivers. *EEG Journal of Clinical Neurophysiology* 102: 383-9.
- Philip P, Sagaspe P, Taillard J, Guilleminault C, Sanchez-Ortuno M, Åkerstedt T & Bioulac B (2003). Fatigue, sleep restriction, and performance in automobile drivers: a controlled study in a natural environment. *Sleep* 26(3): 277-80.
- Philip P, Sagaspe P, Taillard J, Valtat C, Moore N, Åkerstedt T, Charles A & Bioulac B (2005). Fatigue, sleepiness, and performance in simulated versus real driving conditions. *Sleep* 28(12): 1511-6.
- Polich J (2007). Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology* 118(10): 2128-48.
- Schmidt EA, Schrauf M, Simon M, Fritzsche M, Buchner A & Kincses WE (2009). Drivers' misjudgement of vigilance state during prolonged monotonous daytime driving. *Accident Analysis and Prevention* 41: 1087-93.
- Smith AP & Miles C (1986). The effects of lunch on cognitive vigilance tasks. *Ergonomics* 29(10): 1251-61.
- Tejero P & Choliz M (2002). Driving on the motorway: the effect of alternating speed on driver's activation level and mental effort. *Ergonomics* 45(9): 605-18.
- Tejero Gimeno P, Pastor Cerezuela G & Chóliz Montagnés M (2006). On the concept and measurement of driver drowsiness, fatigue and inattention: implications for countermeasures. *International Journal of Vehicle Design* 42: 67-86.
- Thiffault P & Bergeron J (2003). Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study. *Accident Analysis and Prevention* 35: 381-91.
- Tietze H & Hargutt V (2001). Zweidimensionale Analyse zur Beurteilung des Verlaufs von Ermüdung. 43. Tagung experimentell arbeitender Psychologen, Regensburg., http://www.psychologie.uni-wuerzburg.de/methoden/texte/2001_tietze_hargutt_Zweidimensionale_Analyse.pdf.

Wertheim AH (1991). Highway hypnosis: a theoretical analysis. In: Gale, A.D., et al. (eds), *Vision in Vehicle III*. Elsevier, North-Holland, pp 467-72.

Williams HL, Lubin A & Goodnow JJ (1959). Impaired performance with acute sleep loss. *Psychological Monographs: General and Applied* 73(14): 1-26.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Als Pionier zum Thema Fahrzeugsicherheit verfolgt die Daimler AG ihre „Vision vom unfallfreien Fahren“. Ein Kernstück der Verwirklichung dieser Vision ist ein auf reale Verkehrs- und Unfallgeschehen abgestimmtes integrales Sicherheitskonzept, in dem alle einzelnen Komponenten der Fahrzeugsicherheit sowohl in den PKWs als auch in den Nutzfahrzeugen miteinander vernetzt und aufeinander abgestimmt sind. Die Vision vom unfallfreien Fahren beruht auf drei Säulen:

- Den Fahrer permanent entlasten: Dabei unterstützen und entlasten leistungsfähige Systeme den Fahrer bei seinen Fahraufgaben.
- Schwierige Situationen aktiv mit dem Fahrzeug meistern: Unfallvermeidung ist das oberste Ziel. Assistenzsysteme können frühzeitig Gefahrenmomente erkennen, den Fahrer darauf hinweisen und helfend eingreifen, um Unfälle und deren Folgen zu verhindern oder zumindest zu reduzieren. Das Fahrzeug wird zum mitdenkenden Partner.
- Die Verkehrsteilnehmer optimal schützen. Innovative Fahrzeugkonzepte und intelligente Schutzsysteme helfen seit über 50 Jahren, Unfallfolgen für alle Verkehrsteilnehmer zu minimieren.

Der Fahrer spielt in diesem Ansatz eine zentrale Rolle, so dass ein besseres Verständnis seiner kognitiven Fähigkeiten in verschiedenen Situationen des Straßenverkehrs von zentraler Bedeutung für eine optimale Auslegung von Fahrerassistenz- und Fahrerkomfortsystemen ist.

Bisherige Ansätze zur Untersuchung der Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeug(systeme) und Straßenverkehrssituationen basieren vor allem auf indirekte Maße, wie z.B. Fahrerverhalten, Fragebögen, 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 durch ein Fehlen an neurophysiologischem Wissen bzgl. kognitiver Fahrerzustände unter realen Straßenverkehrsbedingungen geschuldet. Im vorliegenden Projekt sind wir deshalb beide Ursachen angegangen.

Innerhalb des ersten Projektschwerpunktes wurde die vom Projektpartner Brain Products GmbH entwickelten artefaktarmen Elektroden auf ihre Eignung für einen längeren Einsatz im Fahrzeug (ca. 8 Std.) getestet. 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 Nach- und Verbesserungsvorschläge zügig umsetzen konnte. Zu Projektende stand schließlich eine neue EEG-Elektroden-Generation zur Verfügung, die die zu Projektbeginn formulierten Anforderungen erfüllte. Die neue Elektroden-Generation erlaubt eine robuste Datenerfassung im Fahrzeug mit minimaler Artefaktanfälligkeit und bietet eine deutlich verbesserte Ergonomie und Akzeptanz sowohl für den Fahrer (Tragekomfort) als auch für die Applizierung der EEG-Sensoren (geringe Vorbereitungszeit und einfache Handhabung). Dadurch ist ein intensiver Einsatz dieses Systems im Rahmen der Entwicklung und Validierung von Fahrerassistenzsystemen möglich.

Der zweite Projektschwerpunkt adressierte die Identifikation neuronaler Korrelate von Fahrervigilanz. Dazu wurde eine Reihe von Fahrversuchen durchgeführt in denen das Fahrer-EEG während längerer, monotoner Tagfahrten auf einer verkehrsarmen Autobahn aufgezeichnet wurde. Zusätzlich zur Aufzeichnung des EEGs wurden auch psychophysikalische und subjektive Fahrermaße erhoben sowie Fahrzeugdaten synchron zu den andern Datenströmen aufgezeichnet. Dabei ist es uns gelungen, spektrale Mikrostrukturen im EEG zu identifizieren, die mit hoher Zuverlässigkeit Änderungen der Fahrervigilanz nachbilden.

Aufgrund der Tatsache, dass die Projektergebnisse unter realen Straßenverkehrsbedingungen zustande gekommen sind, bieten die vorliegenden Projektergebnisse im Vergleich zu bisherigen Ansätzen den wesentlichen Vorteil einer hohen ökologischen Validität.

Obwohl zurzeit noch kein direkter Einsatz eines EEG Systems als Endprodukt im Fahrzeug absehbar ist, bietet das abgeleitete Vigilanzmaß zusammen mit der neu entwickelten EEG Sensorgeneration ein wertvolles objektives Außenkriterium bei der Entwicklung und Validierung von Fahrerassistenzsystemen. Des Weiteren erlaubt das Vigilanzmaß Faktoren zu identifizieren, die sich negativ und positiv auf den Fahrervigilanzzustand auswirken.

Dadurch wird ein besseres Verständnis der Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Fahrsituation ermöglicht, was eine Erhöhung der Fahrersicherheit zur Folge hat und einen wesentlichen Beitrag zur Verwirklichung unserer „Vision vom unfallfreien Fahren“ leistet.

7 NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE

Ein Verstehen der kognitiven Fahrerzustände in verschiedenen Verkehrssituationen im realen Straßenverkehr betrachten wir als großen wissenschaftlichen Erfolg. Gleiches gilt für die Erarbeitung weiteren Grundlagenwissens und von Methoden, um Fahrerassistenzsysteme nutzergerecht und verkehrssicher zu gestalten. Fahrerassistenzsysteme zur Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr haben einen hohen volkswirtschaftlichen Nutzen und daher hohe Priorität für die Automobilindustrie. Unter anderem hat der Vorstand für Forschung und Technologie der DaimlerChrysler AG bereits im November 2000 im Rahmen des Innovationssymposiums über die Vision des „unfallfreien Fahrens“ referiert und aktiven Sicherheitssystemen höchste Priorität zuerkannt. Die volkswirtschaftlichen Schäden und die Einzelschicksale durch Verkehrsunfälle generieren diesbezüglich einen hohen Bedarf.

Durch die Entwicklung und Bereitstellung der neuen, fahrzeugtauglichen EEG Sensorik des Projektpartners BP, die eine ergonomische Fahrerzustandserkennung erlaubt, sowie durch die Ergebnisse der Felduntersuchungen wurde ein maßgeblicher Beitrag für das Verstehen der kognitiven Fahrerzustände in verschiedenen Verkehrssituationen im realen Verkehr geleistet.

Dieser Erfolg wird auch durch den schnellen Transfer der Forschungsergebnisse in die Entwicklung ab dem 2. Jahr der Projektlaufzeit verdeutlicht, bei dem das neue Messsystem ActiCAP verstärkt zum Einsatz kam.

Die neue EEG Sensorik wird aktuell auch zur Identifikation kritischer Situationen eingesetzt, die für die Aufmerksamkeit des Fahrers besonders beanspruchend sind und in denen der Fahrer durch Assistenzsysteme unterstützt werden soll. Diese Art von Situationserkennung wird als Werkzeug bei der Entwicklung und Validierung von Fahrerassistenz- und auch Fahrerinformationssystemen verwendet.

Die im Projekt entwickelte neurophysiologische Methodik wird zunächst als Versuchsmessinstrument bei der Evaluation von Prototypen neuer Fahrerassistenzsysteme eingesetzt. Die Vorteile gegenüber etablierten Verfahren bestehen vor allem darin, dass die Messtechnik ein objektives Maß über den Fahrerzustand liefert und darüber hinaus den Probanden nicht zusätzlich beansprucht, wie es bisher der Fall ist.

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden auf internationalen Konferenzen und Messen vorgestellt und in Fachpublikationen veröffentlicht, wie im folgenden Abschnitt 8 verdeutlicht wird. Eine wichtige Rolle kam auch der Zusammenarbeit mit dem BMBF-geförderten Projekt Fahrerassistenzsysteme (FAS) im Rahmen der BMBF-Forschungsinitiative ACTIV zu. Im Rahmen dieses Projektes konzentriert sich die Daimler AG gemeinsam mit einer Vielzahl anderer Partner auf aktive Sicherheitssysteme zur Unfallvermeidung im Kreuzungs- und Stadtbereich. Die Grundlagenerkenntnisse des vorliegenden Projektes FaSor lassen sich unmittelbar in das Projekt FAS wie auch in das bereits geplante Nachfolgeprojekt einbringen.

8 BERICHTE UND VERÖFFENTLICHUNGEN

- [1] Schmidt EA, Schrauf M, Simon M, Fritzsche M, Buchner A & Kincses WE (2009). Drivers' misjudgement of vigilance state during prolonged monotonous daytime driving. *Accident Analysis and Prevention* 41: 1087–1093.
- [2] Kincses WE & Rothe S (2009). Schlaf und Mobilität. 13. Berliner Kolloquium der Gottlieb Daimler- und Karl Benz-Stiftung. Konferenz Schlaf Somnologie - Erkenntnisse einer neuen Wissenschaft. 27. Mai 2007, Berlin, Germany.
- [3] Kincses WE, Hahn S, Schrauf M & Schmidt EA (2008). Measuring Driver's Mental Workload Using EEG. *Automobiltechnische Zeitschrift Worldwide Edition* 110(3): 12-17.
- [4] Kincses WE, Hahn S, Schrauf M & Schmidt EA (2008). Mobiles EEG zur Messung der mentalen Fahrerbeanspruchung. *Automobiltechnische Zeitschrift* 110(3): 204-209.
- [5] Kincses WE (2008). Effizienz für Mobilität - Strategien im globalen Markt - Impulse von außen. *Zulieferer Innovativ*, 2. July 2008, Audi Forum Ingolstadt, Germany.
- [6] Schubert R, Tangermann M, Haufe S, Sannelli C, Simon M, Schmidt EA, Kincses WE & Curio G (2008). Parieto-occipital alpha power indexes distraction during simulated car driving. *International Journal of Psychophysiology*, Volume 69 (3): 214.
- [7] Kincses WE (2007). Neurophysiologische Messungen der Müdigkeit im Fahrzeug. 15. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Schlafforschung und Schlafmedizin, 12. October 2007, Heinrich-Heine-University Düsseldorf, Germany.
- [8] Kincses WE (2007). Neurophysiologische Indikatoren zur Bestimmung von Fahrerbeanspruchung. "Moderne Zeiten" - Psychophysiology zur Evaluation menschlicher Informationsverarbeitung in technischen Umgebungen, 06. June 2007, Westfalenhalle Dortmund, Germany.
- [9] Schmidt EA, Kincses WE, Schrauf M, Schubert R & Curio G (2007). Assessing driver's vigilance state during monotonous driving. 4th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design, Stevenson, WA, USA.
- [10] Simon M, Schmidt EA, Fritzsche M, Kincses WE, Aufmuth C, Bruns A, Bogdan M, Rosenstiel W & Schrauf M (in preparation). EEG alpha spindles as indicators of driver drowsiness under real traffic conditions.