

Erfassung der Fahrerermüdigkeit

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 89

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page, partially overlapping a vertical white line that runs down the right edge of the cover.

Erfassung der Fahrermüdigkeit

von

Christina Platho
Anna Pietrek
Harald Kolrep

HFC Human-Factors-Consult GmbH
Berlin

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 89

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die Berichte der BAST zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de/>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 82.513/2010
Erfassung der Fahrerschläfrigkeit

Fachbetreuung
Dr. Eike Schmidt
Ariane von Below

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9307
ISBN 978-3-95606-029-8

Bergisch Gladbach, Juli 2013

Kurzfassung – Abstract

Erfassung der Fahrmüdigkeit

10 % bis 20 % der Straßenverkehrsunfälle werden auf Müdigkeit am Steuer zurückgeführt. Es steht eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden zur Verfügung, um Müdigkeit beim Fahrer zu erkennen. Ziel des vorliegenden Projekts war es, die Stärken und Schwächen der verschiedenen Müdigkeitsmessverfahren vergleichend zu beschreiben und existierende Müdigkeitsmess- und Müdigkeitswarnsysteme im Überblick darzustellen. Die Ergebnisse beruhen auf folgender Verknüpfung von Literaturanalysen, Experten- und Nutzerbefragungen:

- Literaturanalyse und zusammenfassende Darstellung von Müdigkeitsmessverfahren, die auf physiologischen und leistungsbezogenen Messgrößen beruhen.
- Literaturanalyse zu Müdigkeitsmess- und Warnsystemen, Befragung der Systemhersteller und zusammenfassende Darstellung der identifizierten Systeme.
- Befragung von 20 Nutzern von den in Mittel- und Oberklassefahrzeugen implementierten Müdigkeitswarnsystemen zur Beurteilung der wahrgenommenen Detektionsgüte, Akzeptanz und Compliance.
- Erarbeitung eines Gütekriterienkatalogs als Grundlage für die Bewertung und den Vergleich ausgewählter Müdigkeitsmessverfahren.
- Zweistufige Befragung von 12 Experten aus Industrie- und Hochschulforschung nach der Delphi-Methode. Ziel war die Auswahl und Bewertung der validesten Verfahren zur Erfassung der Fahrmüdigkeit, begründeter Zweitbewertungen bei abweichenden Urteilen und der Beurteilung ihrer Eignung für verschiedene Einsatzgebiete.
- Workshop mit den Delphi-Teilnehmern zur Diskussion und Ergänzung der Delphi-Ergebnisse.

Die 70 in der Fachliteratur identifizierten Müdigkeitsmesssysteme unterscheiden sich in den zugrunde liegenden Müdigkeitsmessverfahren, dem Vorliegen und der Gestaltung von Warnfunktionen und ihrer Verbreitung. Nur selten werden überzeu-

gende Validierungsbelege oder Angaben zur Anzahl falscher und ausbleibender Alarme angeführt.

Aus Nutzersicht bieten die derzeit in Mittel- und Oberklassemodellen verfügbaren Müdigkeitswarnsysteme oftmals keine zufriedenstellende Detektionsgüte. Vielfach wird die Fahrt trotz detektierter und selbst eingestandener Müdigkeit fortgesetzt. Ca. die Hälfte der Fahrer sieht in der Nutzung der Müdigkeitswarnsysteme einen Zuwachs an Sicherheit.

Zu den validesten Müdigkeitsmessverfahren gehören aus Expertensicht die Erfassung der Fahrperformanz (Lenkverhalten und Spurhaltung) und des Lidschlussverhaltens, das videobasierte Expertenrating, das EEG und der Pupillografische Schläfrigkeitstest. Die unterschiedlichen Stärken und Schwächen der sechs ausgewählten Messverfahren werden im Bericht detailliert aufgeführt.

Nach wie vor existiert kein Goldstandard zur Müdigkeitserfassung. Je nach Einsatzgebiet sind entweder alle sechs ausgewählten Messverfahren (Forschung & Entwicklung), nur einige (Müdigkeitswarnsystem im Fahrzeug) oder kein einziges (Verkehrskontrolle) geeignet. Die Auswahl der Messverfahren sollte daher in Abhängigkeit des jeweiligen Ziels und Kontexts der Müdigkeitserfassung erfolgen und die spezifischen Stärke-Schwächenprofile berücksichtigen. Eine valide Müdigkeitserfassung bedarf der Kombination von mindestens zwei Messverfahren.

Bedarf besteht in der Optimierung und der begleitenden Evaluierung der Müdigkeitswarnsysteme im Fahrzeug und der vielversprechendsten Messverfahren. Weitere Maßnahmen zur wirksamen Reduzierung müdigkeitsbedingter Unfälle wurden im Rahmen des Expertenworkshops diskutiert und im Bericht dargelegt.

Assessment of driver fatigue

Driver fatigue is a contributing factor in an estimated 10-20% of road accidents. A huge number of different methods is available to assess driver fatigue. The project's goal was to describe and compare the strengths and weaknesses of different methods to assess driver fatigue and to present an overview of the existing fatigue detection and fatigue warning systems. The evaluation of these methods and systems is based on literature analysis and interviews with experts and users. The following procedures were taken:

- Literature analysis and overview of physiological and performance-based methods to assess driver fatigue.
- Literature analysis of fatigue detection and warning systems, interviews with their manufacturers and overview of the identified systems.
- Interviews with 20 users of currently in middle- and upper-class cars implemented fatigue warning systems to assess the perceived quality of fatigue detection, driver acceptance and compliance.
- Development of a list of criteria to assess and compare the quality of the most valid methods to assess driver fatigue.
- Two-stage survey (Delphi-Study) with 12 experts from academic and industrial research areas. It was aimed at the selection and evaluation of the most valid methods to assess driver fatigue, their subsequent re-evaluation providing explanatory statements in case of contradicting opinions, and the assessment of the methods' suitability for different fields of application.
- Workshop with the experts that participated in the Delphi-Study to discuss and complement the obtained results.

70 fatigue detection systems were identified. They differ in their underlying methods to assess fatigue, their availability and design of driver feedback, and in their prevalence. Convincing evidence of their validity or the percentage of false and missed alarms are rarely reported. The fatigue warning systems that are more and more implemented in middle- and upper-class cars often fail to provide a satisfying fatigue detection performance from a

users' point of view. Several drivers continue to drive even despite of a system's warning that they perceive as accurate. About half of them perceive fatigue warning systems as a gain in safety.

The most valid methods to assess driver fatigue selected by the 12 experts are the assessment of driving performance (steering behaviour and lane keeping) and eyelid closure, video-based expert assessments, EEG and (quite controversial) the Pupillographic Sleepiness Test. Their differing strengths and weaknesses are extensively described in the report at hand.

There is still no gold standard of fatigue assessment. Depending on the fields of application all six of the selected methods (research & development), only a few (fatigue warning systems) or none of them (traffic controls) are applicable. When choosing a method the goal and context of fatigue assessment and the strengths and weaknesses of the respective methods should be considered. The combination of at least two different methods is recommended to achieve a valid assessment of driver fatigue.

Fatigue detection systems and the most promising methods to assess driver fatigue should be further optimized and accompanying studies need to be conducted. Further measures to effectively reduce the number of accidents were discussed during the workshop and presented in the report at hand.

Inhalt

Danksagung	7	5.4	Einschränkungen	40
1 Ausgangslage und Aufgabenstellung	11	5.5	Fazit	40
2 Vorgehen	12	6 Delphi-Studie		41
3 Literaturanalyse: Messverfahren zur Erfassung der Fahrmüdigkeit	13	6.1	Vorgehen	42
3.1 Arbeitsdefinition	13	6.2	Kriterienkatalog zur Gütebewertung ...	42
3.2 Klassifikation der Messverfahren	13	6.3	Bewertung der validesten Müdigkeitsmessverfahren	42
3.3 Subjektive Messverfahren	14	6.3.1	Lenkverhalten	44
3.4 Verhaltensbasierte Messverfahren	15	6.3.2	Spurhaltung	45
3.4.1 Fahrperformanz	15	6.3.3	EEG	46
3.4.2 Verhaltensbeobachtung	17	6.3.4	Lidschlussverhalten	54
3.4.3 Testperformanz	17	6.3.5	Videobasierte Expertenbeurteilung	55
3.5 Physiologische Messverfahren	18	6.3.6	Pupillografischer Schläfrigkeitstest	56
3.5.1 Augenaktivität	18	6.4	Eignung der Messverfahren für unterschiedliche Einsatzgebiete	58
3.5.2 EEG-basierte Messverfahren	20	6.4.1	Vorgehen	58
3.5.3 Peripherphysiologie	21	6.4.2	Eignung für Forschung und Entwicklung	58
3.6 Fazit	23	6.4.3	Eignung als Müdigkeitswarnsystem im Fahrzeug	59
4 Übersicht bestehender Müdigkeitsmesssysteme	24	6.4.4	Eignung zum Einsatz bei Verkehrskontrollen	60
5 Müdigkeitswarnsysteme aus Nutzersicht	37	6.5	Fehlender Goldstandard zur Müdigkeitserfassung	60
5.1 - Vorgehen	37	6.6	Einschränkungen	61
5.2 - Stichprobe	37	6.6.1	Fazit	61
5.3 - Ergebnisse	37	7 Überarbeiteter Gütekriterienkatalog		62
5.3.1 Aktuelles Nutzungsmotiv	37	8 Zusammenfassung		63
5.3.2 Wahrgenommene Güte der Müdigkeitsdetektion	38	9 Ausblick		66
5.3.3 Wahrgenommener Nutzen	39	10 Literatur		67
5.3.4 Reaktion auf Systemwarnungen	39			
5.3.5 Verhaltensanpassungen	40			
5.3.6 Soziodemografische Unterschiede	40			

Danksagung

Für ihre wertvolle Mitarbeit an den zwei umfangreichen Delphi-Befragungen und auch für die spannenden Diskussionen im Rahmen des Abschlussworkshops danken wir:

Nico Bogner

Nico Bogner absolvierte das Studium der Elektrotechnik an der TU Braunschweig. Seine Schwerpunkte liegen im Bereich Mess- und Regelungstechnik und Fahrzeugelektronik. Derzeit arbeitet er bei Volkswagen als Projektleiter im Bereich Müdigkeitserkennung/Fahrerzustandserkennung.

Dr. Christhard Gelau

Studium der Psychologie an der WWU Münster, Dipl.-Psych. 1990, Promotion zum Dr. phil an der TU Chemnitz 1996, Habilitation an der Fakultät für Human- und Sozialwissenschaften der TU Chemnitz 2012. Seit 1998 Mitarbeiter der Bundesanstalt für Straßenwesen, zuletzt Referat „Kooperative Fahrassistenten- und Verkehrssysteme“, Tätigkeitsschwerpunkt Mensch-Maschine-Interaktion, Ergonomie. Seit April 2012 abgeordnet in das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Referat „Innovative und kommunikative Fahrzeugtechnologie, Fahrzeugtechnik (Fahrzeugsicherheit)“.

Prof. Dr. Martin Golz

Prof. Dr. rer. nat. Martin Golz hat an der Technischen Universität Ilmenau Physik und Technik der Mikroelektronik studiert und anschließend auf dem Gebiet der optischen Oberflächenwellen promoviert. Danach wechselte er das Fachgebiet und forschte in Berlin/Ost von 1988-1992 auf dem Gebiet der Biomedizintechnik in einem Labor für evoked Potenziale und anschließend in einem Schlafpolygrafielabor. Im Oktober 1992 nahm er einen Ruf auf eine Professur für Physik und Messtechnik an der Fachhochschule Schmalkalden, Freistaat Thüringen, an. Hier begann er sich intensiv mit der adaptiven Biosignalanalyse zu beschäftigen. Sein erstes Forschungsfreiemester (1997/98) führte ihn zu Circadian Technologies, Arlington MA, USA. Dort leitete er 5 Monate lang Sekundenschlafuntersuchungen im Fahrsimulationlabor und entwickelte Methoden für ihre automatische Detektion. Seit 1998 betreibt er in Schmalkalden ein eigenes Fahrsimulation-

labor und seit 2008 ein Vigilanztestlabor. 2001 erfolgte die Denomination der Professur in Signalverarbeitung & Neuroinformatik.

Seine Forschungsgruppe hat eine Video- und Biosignal-Datenbank mit ca. 30.000 Sekundenschlafbeispielen aufgebaut. Diese wurden mit verschiedenen Methoden im Zeit-, Spektral- und Wavelet-Bereich sowie im Zustandsraum analysiert. Automatisch lernende Algorithmen werden eingesetzt, um Diskriminanz-, Cluster- oder nichtlineare Regressionsanalysen durchzuführen. Neben der Biosignalanalyse zur Überwachung der Fahrerschläfrigkeit wurden seit 2005 auch Forschungen zu Vigilanztests und seit 2007 zur Modellierung und Simulation von Vigilanzveränderungen über Zeiträume von Tagen und Wochen unternommen [WS].

Dr. Wolfgang Gottlieb

Er studierte Fahrdynamik bei Professor Mitschke in Braunschweig und war dann Diplomingenieur Maschinenbau. Anschließend promovierte er am Institut für Psychologie im Fach Angewandte Psychologie (Prof. Erke). Passend zum Promotionstermin gründete die Daimler Benz AG in Berlin eine Forschungsgruppe, die das Umfeld des Fahrzeuges erforschen sollte. Hier war er dann für einige Zeit für das Fachgebiet Konditionssicherheit zuständig. Inzwischen ist er pensioniert und noch beratend tätig. Belastung und Beanspruchung im Straßenverkehr, sowohl bei der Pkw- als auch bei der Lkw-Führung waren seine Themen. Sie umfassten nicht nur Überforderung, sondern auch Erscheinungen wie Monotonie und Unaufmerksamkeit. Der Fahr Simulator in Berlin war dazu ein wertvolles Forschungswerkzeug. Bei Daimler Benz im Bereich Müdigkeitserkennung bearbeitete er u. a. das EU-geförderte AWAKE-Projekt und interne Forschungsvorhaben zur Entwicklung eines Assistenzsystemes als Produktinnovation [WS].

Dr. Volker Hargutt

Herr Volker Hargutt studierte in Würzburg Psychologie und schloss sein Studium mit einer Diplomarbeit über das Thema „Ermüdung und fahrerische Leistung“ im Jahre 1997 ab. Im Jahre 2003 promovierte er am Interdisziplinären Zentrum für Verkehrswissenschaften an der Universität Würzburg (IZVW) mit der Entwicklung eines Algorithmus zur Müdigkeitsdetektion im Fahrzeug („Das Lidchluss-

verhalten als Indikator für Aufmerksamkeits- und Müdigkeitsprozesse bei Arbeitshandlungen“). In der Folge bearbeitete er verschiedene Forschungsprojekte, die das Thema Müdigkeit in unterschiedlichen Kontexten untersuchte, wie z. B. Untersuchungen im Fahrsimulator mit Schlaf-Apnoe- oder Parkinson-Patienten oder die Entwicklung eines computerbasierten Trainings für Berufskraftfahrer über den richtigen Umgang mit Müdigkeit. Weitere Forschungsschwerpunkte sind psychotrope Substanzen im Straßenverkehr und Mensch-Maschine-Interaktionen. 2012 wechselte er zum Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW) und arbeitet dort zurzeit an der Aufbereitung und Auswertung von Datensätzen aus „Naturalistic Driving Studies“ (NDS) [WS].

Dr. Christoph John

Vita: Studium der Informatik mit anschließender Promotion in Bildverarbeitung (Motion- und Surface-Capture, Scientific Computing). Tätigkeiten in diversen Bereichen der Bildverarbeitung (Prüf- und Messtechnik, bildbasierte Szenenanalyse, Navigation, HMI, medizinische Messtechnik). Seit 2011 Serienprojekt- und VE-Verantwortlicher für Fahrermodellierung und bildbasierte Fahrerzustandssensierung bei BMW.

Forschungsbereiche: Bildverarbeitung (Tracking, Objektrekonstruktion, Motion-Capture, Navigation), Human Machine Interfaces und 3D Shared Virtual Environments.

Expertise im Bereich der Müdigkeitserfassung: überwiegend im Bereich der automotive-relevanten Messtechnik (Fahr-/Lenkverhaltensanalyse, Bildverarbeitung).

Dr. Katja Karrer-Gauß

Dr.-Ing. Katja Karrer-Gauß arbeitet nach einem Diplom in Psychologie seit 2002 am Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme der TU Berlin. Hier entwickelte sie mit ihrem Team bis 2007 in aufeinander aufbauenden Industrieprojekten Algorithmen zur frühzeitigen Müdigkeitserkennung während des Fahrens. Im Anschluss befasste sie sich im Rahmen ihrer Dissertation mit der prospektiven Bewertung von Systemen zur Müdigkeitserkennung, welche sie 2010 abschloss. Ihr Forschungsinteresse gilt allgemein der Mensch-Maschine-Interaktion im Kraftfahrzeug und Möglichkeiten der Fahrerassistenz.

Prof. Dr. Jarek Krajewski

Jarek Krajewski ist internationaler Experte im Bereich Human Factors, Mensch-Maschine-Interaktion, Affective Computing, Occupational Health Psychology, sprach-, video- und biosignalbasierte Messinstrumentenentwicklung (44 peer-reviewed Publikationen, 119 Vorträge, 71 Lehrveranstaltungen). Die 30 eingeladenen Vorträge in den letzten drei Jahren dokumentieren das große wissenschaftliche Interesse an seiner Forschungstätigkeit. Im Bereich Sprachforschung ist er Initiator großer internationaler Forschungsverbünde (z. B. Harvard; Berkeley; National Univ. Singapore) und nationaler interdisziplinärer Netzwerke (s. Zentrum für interdisziplinäre Sprachforschung, ZefiS, 45 Mitglieder). Die breite Anschlussfähigkeit seines Forschungsansatzes dokumentiert er auch in zahlreichen öffentlich- und industriegeförderten Drittmittelprojekten. Seit 2012 hält er die W2-Vertretungsprofessur an der Univ. Köln (Organisationspsychologie) und die W2-Vertretungsprofessur an der Univ. Würzburg (Arbeits-, Betriebs- und Organisationspsychologie) [WS].

Prof. Dr. Johannes Mathis

Prof. Dr. J. Mathis ist Leiter der Abteilung für Klinische Neurophysiologie an der Neurologischen Universitätsklinik am Inselspital Bern und gleichzeitig Leiter am Schlaf-Wach-Zentrum.

Er war zwischen 2009 und 2011 Präsident der Schweizerischen Gesellschaft für Schlafforschung, Schlafmedizin und Chronobiologie (SGSSC), seit 2003 Präsident der Schweizerischen Restless-Legs-Selbsthilfegruppe (SRLS) und seit 1996 ärztlicher Beirat der Schweizerischen Narkolepsiegesellschaft (SNaG).

Das Forschungsinteresse besteht aktuell in der Frage der subjektiven Wahrnehmung von Schläfrigkeit bei Gesunden und Patienten im Zusammenhang mit dem Sekundenschlaf. In der klinischen Datenbank im Schlaf-Wach-Zentrum wurden seit 1997 systematisch Daten von über 1.000 Patienten zu subjektiven (Epworth) und objektiven (MSLT, MWT, Pupillografie, Fahrsimulator) Messungen erfasst.

Prof. J. Mathis ist als wissenschaftlicher Experte beteiligt an der momentanen groß angelegten Schweizerischen Informationskampagne „Turboschlaf“ vom Bundesamt für Unfallvergiftung (bfu).

Dr. Maria Rimini-Döring

Dr. Maria Rimini-Döring ist Senior Expert in Human-Machine Interaction in der zentralen Forschung der Robert Bosch GmbH.

Dem Studium der Elektrotechnik in Italien schloss sie die Promotion in Physik an der Universität Stuttgart an.

Seit 2000 arbeitet sie im Themenfeld Automotive HMI und Driver Monitoring. Bis 2004 hat sie das Projekt „Müdigkeitsdetektion“ geleitet und die Weiterentwicklung bis zur Serieneinführung 2010 begleitet. Die Planung und Durchführung von Simulator- und Realfahrzeugversuchen, die Messung und Auswertung physiologischer, videobasierter und fahrzeugbezogener Parameter und die Betreuung von Dissertationsarbeiten gehören zu ihrem Tätigkeitsspektrum. Ihr aktueller Schwerpunkt liegt in den Themen Verkehrssicherheit, Aufmerksamkeit und Intentionserkennung [WS].

Dr. Michael Schrauf

Studium der Physik (Diplom 1986) und der Humanbiologie (PhD 1989) an der Philipps-Universität in Marburg. Habilitation für das Fach Psychologie (2001) an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Seit 2002 Senior Scientist bei der Daimler AG, Bereich Forschung und Entwicklung in Böblingen. Themengebiet: Fahrerbeobachtung zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen.

Zahlreiche Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Neurophysiologie zu Themen der „Fahrerzustandsbestimmung mittels Hirnstrommessungen“ [WS].

Dr. Barbara Wilhelm

Prof. Dr. med. Barbara Wilhelm habilitierte in Experimenteller Ophthalmologie. Sie leitet die Studienzentrale des Departments für Augenheilkunde für Klinische Studien in der Ophthalmologie. Sie ist Erfinderin des Pupillografischen Schläfrigkeitstests (DPA 5402P137) und Mitglied u. a. der DGSM, der ESRS, der DGVM (erw. Vorstand) und DOG. Seit 1995 hat sie neben der Pupillen- und ophthalmologischen Forschung einen starken Schwerpunkt in der Schlafforschung und befasst sich dort vor allem mit Tagesschläfrigkeit und geeigneten Methoden zu ihrer Erfassung. Seit 2000 liegt Prof. Wilhelms besonderes Augenmerk auf der Problematik von Fahrerschläfrigkeit, schläfrigkeitsbedingten Verkehrsunfällen und deren Prävention. Prof. Wilhelm

hat als Mitglied einer Expertengruppe die Bundesanstalt für Straßenwesen beim neu eingeführten Kapitel „Tagesschläfrigkeit“ der Begutachtungs-Leitlinien zur Kraftfahrereignung beraten [WS].

1 Ausgangslage und Aufgabenstellung

Müdigkeit am Steuer ist eine häufige Unfallursache, die mit einer überproportionalen Unfallschwere einhergeht – so heißt es in den Medien und der Fachliteratur. Verlässliche offizielle Zahlen zur exakten Quantifizierung von Müdigkeitsunfällen sind nicht zur Hand. Da Fahrermüdigkeit im Falle eines Unfalls nicht objektiv erfassbar ist und wahrheitsgemäße Angaben der Fahrer aufgrund der damit verbundenen Haftung nicht zu erwarten sind, beruhen sämtliche Angaben zur Häufigkeit von Müdigkeitsunfällen auf mehr oder weniger empirisch belastbaren und generalisierbaren Schätzungen aus Befragungen, Unfallanalysen und (leider selten) aus Naturalistic Driving Studies. Der Anteil von Müdigkeitsunfällen liegt demzufolge in etwa zwischen 10 % und 20 % (DINGUS et al. 2006; TEN THOREN & GUNDEL 2003; EVERS & AUERBACH 2005). Es wird angenommen, dass das Unfallrisiko durch Müdigkeit verfünffacht wird (KLAUER et al. 2006). Die genannte Spanne kann in Ermangelung belastbarer und generalisierbarer Daten als plausibler Schätzwert dienen. Unstrittig ist, dass Müdigkeit am Steuer – ob sie nun 5, 10 oder 20 % der Straßenverkehrsunfälle mit verursacht, ein hohes Sicherheitsrisiko darstellt, dem es zu begegnen gilt.

Wenig Verlass ist dabei auf die Selbstwahrnehmung der Fahrzeugführer. BROWN (1997) weist darauf hin, dass viele Fahrer, unabhängig davon, ob sie professionell fahren oder nicht, aus unterschiedlichen Gründen unter den Druck geraten (bzw. sich unter Druck fühlen), ihr Ziel rasch zu erreichen. Bedauerlicherweise beeinträchtigt Müdigkeit nicht nur die Leistungsfähigkeit beim Fahren, sondern auch das Urteilvermögen über die eigene Leistungsfähigkeit. Bereits MÜNSTERBERG (1914) hat festgestellt, dass das subjektive Gefühl der Ermüdung und die objektive Leistungsfähigkeit regelmäßig auseinanderfallen. Aus diesem Grunde neigen auch motivierte, aber übermüdete Fahrer dazu, Entscheidungen zu fällen, die sie selbst und andere einem erheblichen Unfallrisiko aussetzen. Zur validen Erfassung der Fahrermüdigkeit bedarf es objektiver Verfahren. Zur Eignung unterschiedlicher performanzbasierter und physiologischer Messverfahren zur validen Müdigkeitserfassung liegen zahlreiche Forschungsergebnisse vor. Es gilt, die Potenziale, aber auch die Grenzen etablierter und neuerer Müdigkeitsmessverfahren zusammenzutragen, zu systematisieren und vergleichend ge-

genüberzustellen sowie ihre Eignung für unterschiedliche Einsatzgebiete zu bewerten. Ein häufig beschrittener Weg ist ihr Einsatz bei Technologien, die Müdigkeit bei Fahrern erkennen, vielleicht sogar vorhersagen können. Ein ambitioniertes Ziel ist ihr Einsatz bei Verkehrskontrollen durch die Polizei. In der Fachliteratur wird eine umfassende Zahl entsprechender Systeme referenziert. Dazu gehören Fitness-for-Duty-Testverfahren, aber auch Systeme, die für ein Online-Monitoring des Fahrerzustands ausgelegt sind. Hier bedarf es einer vollständigen und aktuellen Übersicht über die existierenden Müdigkeitsmess- und Warnsysteme bezüglich ihrer Datenbasis, ihrer Mess- und Testgüte und ihres gegenwärtigen Entwicklungsstands und Einsatzfelds.

Seit einiger Zeit werden bei zahlreichen Automobilherstellern Technologien entwickelt, um Müdigkeit der Fahrer festzustellen oder vorhersagen zu können. Ziel dieser Technologien ist es, dem Fahrer die erkannte Müdigkeit zurückzumelden und ihn zu einer Fahrtunterbrechung zu bewegen. Im Gegensatz zu den in den vergangenen Jahrzehnten entwickelten Systemen bieten diese Systeme ein besonders hohes Potenzial, da sie a) während der Fahrt einsetzbar sind (im Gegensatz zu meist für Operateure entwickelten Fitness-for-Duty-Testsystemen), b) über den Status eines Prototyps hinaus entwickelt und vielfach bereits implementiert sind und c) aufgrund der oft serienmäßigen Verfügbarkeit bei mehreren Automobilherstellern in verschiedenen Fahrzeugmodellen für eine zunehmend größere Zahl der Fahrer verfügbar sind – ohne dass eine gezielte Kaufentscheidung für diese Systeme erfolgen muss.

In diesem Projekt wurde der Stand der Wissenschaft und Technik für Verfahren zur Erfassung der Fahrermüdigkeit aufgearbeitet. Die Verfahren sollen dabei hinsichtlich eines Kriterienkatalogs nach Messgüte, Validität, Praktikabilität und ihrer Eignung für den Einsatz bei Müdigkeitswarnsystemen oder gar bei Verkehrskontrollen durch die Polizei bewertet werden.

Die Herangehensweise im vorliegenden Projekt beruht auf der Verknüpfung von

- Literatur- und Dokumentenanalyse zur Beschreibung von Müdigkeitsmessverfahren,
- Literatur- und Dokumentenanalyse zu Müdigkeitsmess- und Warnsystemen, ergänzt durch eine Befragung der Hersteller,

- - Expertenbefragungen nach der Delphi-Methode,
- - Nutzerbefragungen zur (subjektiven) Bewertung von im Fahrzeug erhältlichen Müdigkeitswarnsystemen.

2 Vorgehen

Durchgeführt wurde eine umfassende Analyse nationaler und internationaler Forschungsarbeiten zum Thema Müdigkeitserfassung bei Fahrern. Identifiziert, klassifiziert und beschrieben wurden

- - eine Vielzahl grundlegender Verfahren zur Erfassung und Interpretation von Müdigkeitszeichen. Zu diesen Verfahren gehören z. B. das Lidschlussverhalten oder die Erfassung der Fahrperformanz. Jedes Verfahren bietet zudem unterschiedliche Müdigkeitsindikatoren. Indikatoren des Lidschlussverhaltens sind bspw. Dauer oder Geschwindigkeit des Lidschlusses,
- - 71 in den letzten Jahrzehnten entwickelte Messgeräte, die für die Erfassung der Fahrermüdigkeit vorgesehen sind und auf den grundlegenden Müdigkeitsmessverfahren basieren. Bei den Systemen unterscheidet man zwischen Messsystemen und Warnsystemen. Bei Letzteren wird den Fahrern erkannte Müdigkeit zurückgemeldet.

Aufgrund oft nur eingeschränkt verfügbarer und teils überholter Informationen zu den identifizierten Müdigkeitsmesssystemen wurde eine ergänzende Herstellerbefragung durchgeführt. Erfragt wurden u. a. Messeigenschaften, testtheoretische Gütekriterien und Akzeptanz der Systeme.

Um die Akzeptanz von im Fahrzeug implementierten Müdigkeitswarnsystemen und die Compliance der Fahrer abschätzen zu können, wurde im Sommer 2012 eine Befragung von 20 Fahrern, die bereits erste Erfahrungen mit ihrem Müdigkeitswarnsystem aufweisen konnten, durchgeführt. Erfragt wurden dabei die Anzahl berichteter Alarme, Fehlalarme und ausbleibender Alarme, die Reaktion der Fahrer auf Systemwarnungen und der wahrgenommene Nutzen der Systeme.

Zum Vergleich der unterschiedlichen Müdigkeitsmessverfahren im Rahmen einer Expertenbefragung (Delphi-Studie) wurde ein Katalog an Gütekriterien entwickelt. Dieser beinhaltete insgesamt 20 Kriterien zur Beschreibung der Messgüte, Validität,

Stabilität, Praktikabilität, des Status quo und Potenzials von Messverfahren.

Der Kriterienkatalog diente in beiden Delphi-Befragungen als Grundlage zur Bewertung der Messverfahren. Auf Basis der Erkenntnisse aus beiden Delphi-Befragungen und dem Workshop wurde eine überarbeitete und ergänzte Version des Gütekriterienkatalogs erstellt.

In einer zweistufigen Befragung wurden 12 Experten aus Industrie und Hochschule zu Themen der Müdigkeitserfassung bei Fahrern befragt. Ziel war einerseits die differenzierte Bewertung von Müdigkeitsmessverfahren, andererseits die Beurteilung der Eignung dieser Messverfahren für unterschiedliche Einsatzbereiche. Im Workshop mit den Delphi-Teilnehmern wurden die Projektergebnisse diskutiert, präzisiert und ergänzt.

In der ersten Befragungsrunde wählten die Experten die drei ihrer Ansicht nach validesten Müdigkeitsindikatoren aus und bewerteten sie nach dem Gütekriterienkatalog.

Bei stark abweichenden Bewertungen wurden in der zweiten Befragungsrunde alle Teilnehmer um eine (Neu-)Bewertung und Begründung ihres Urteils gebeten.

Die Ergebnisse dieser Bewertungen wurden im Workshop vorgestellt, Änderungsvorschläge gemeinsam diskutiert und diese entweder als Konsens angenommen oder als Dissens zu Protokoll gegeben.

In der ersten Delphi-Runde erarbeiteten die Experten – ebenfalls auf Basis des Kriterienkatalogs – ein Anforderungsprofil der Messverfahren für drei unterschiedliche Einsatzbereiche:

- Forschung & Entwicklung,
- Müdigkeitswarnsystem im Fahrzeug,
- Verkehrskontrolle durch die Polizei.

In der zweiten Runde beurteilten sie die Passung der ausgewählten Messverfahren zu den genannten Einsatzgebieten auf Basis des erstellten Anforderungsprofils.

Die wichtigsten Projektergebnisse werden zusammenfassend dargestellt und kritisch diskutiert. Empfehlungen zur verbesserten Erkennung der Fahrermüdigkeit und Wege zur effektiven Verringerung müdigkeitsbedingter Unfälle werden abgeleitet.

3 Literaturanalyse: Messverfahren zur Erfassung der Fahrermüdigkeit

3.1 Arbeitsdefinition

Das Auftreten von Müdigkeit am Steuer ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen, so z. B.

- - Schlafdeprivation,
- - Fahrten über längere Strecken,
- - Monotonie, aber auch Beanspruchung,
- - zirkadiane Effekte (Tageszeit),
- - krankheitsbedingte oder medikamenten-, drogen- bzw. alkoholinduzierte Müdigkeit.

In Fachkreisen gibt es keine weithin anerkannte Definition von Müdigkeit. Verschiedene Bezeichnungen dieses Konstrukts (Müdigkeit und Schläfrigkeit oder drowsiness, fatigue und sleepiness) werden mitunter synonym verwendet. Üblich ist die Verwendung des Begriffs „Schläfrigkeit“, wenn das Wachbleiben erschwert ist. Von Schläfrigkeit wird die aufgabenbezogene Müdigkeit abgegrenzt. Bei hoher Beanspruchung des Fahrers spricht man von aktiver und bei hoher Monotonie von passiver aufgabenbezogener Müdigkeit (MAY & BALDWIN 2009). Nicht leicht fällt die Abgrenzung zu verwandten Konstrukten wie z. B. Driving without Awareness oder eingeschränkter Alertness. Der gemeinsame Nenner liegt in der reduzierten zentralnervösen Aktivierung und der daraus resultierenden subjektiven, physiologischen und kognitiven Leistungsbeeinträchtigung.

Je nach Kontext (Arbeitssicherheit, Schlafmedizin, Verkehrssicherheit u. v. m.) wird dem eigenen Forschungsziel entsprechend das Konstrukt bedarfsgemäß definiert. Dies mag wenig zur Klärung der Begrifflichkeiten beitragen, doch ist es nicht einfach, begrifflich der Vielzahl an Müdigkeitsursachen, -anzeichen und -folgen gerecht zu werden.

Die im vorliegenden Projekt gewählte Arbeitsdefinition von Müdigkeit berücksichtigt folgende Ursachen, Anzeichen und Folgen von Müdigkeit:

- - Müdigkeit ist multidimensional und äußert sich auf der subjektiven, der verhaltensbasierten und der physiologischen Ebene.

- - Müdigkeit ist multikausal. Im vorliegenden Projekt wird die Erfassung der Müdigkeit(-folgen) unabhängig von ihrer Ursache diskutiert, sofern,
- - die Müdigkeitsfolgen zu einer Beeinträchtigung der Fahrtüchtigkeit führen.

Hierbei handelt es sich eine zweckdienliche Arbeitsdefinition, die im vorliegenden Projekt ein gemeinsames Verständnis des interessierenden Konstrukts ermöglichen und die für den Kontext „Fahrermüdigkeit“ relevanten Facetten beinhalten sollte. Sie erhebt weder Anspruch auf Allgemeingültigkeit noch auf Vollständigkeit. Für das vorliegende Projekt sind folgende Aspekte nicht von Relevanz:

- - die Bestimmung der Müdigkeitsursache,
- - die Diagnose einer überdauernden Einschlafneigung. Der Fokus lag auf der Erfassung von Müdigkeit als Zustand. Auf die schlafmedizinische Diagnostik – so wichtig ihr Beitrag zur Vermeidung müdigkeitsbedingter Unfälle sein mag – wird nachfolgend nicht weiter eingegangen.

3.2 Klassifikation der Messverfahren

Auf Basis der Literaturanalyse wurde eine Kategorisierung der Müdigkeitsmessverfahren in mehreren Ebenen abgeleitet. Die erste Ebene unterscheidet subjektive, performanzbasierte und physiologische Messverfahren und greift damit auf eine in der Fachliteratur gängige Kategorisierung zurück (siehe Tabelle 1). Auf der zweiten Ebene wird differenziert zwischen Messverfahrensgruppen, die hinsichtlich relevanter Gütemerkmale (Validität, Ökonomie, Akzeptanz etc.) unterschiedlich zu bewerten sind, wie z. B. dem EEG und peripherphysiologischen Messverfahren. Somit lassen sich generalisierende Aussagen über Messverfahrensgruppen (angestrebt in der Delphi-Studie in

Selbsteinschätzung	<ul style="list-style-type: none"> • Müdigkeit als Zustand • Überdauernde Einschlafneigung
Performanz	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrperformanz • Verhaltensbeobachtung • Testperformanz
Physiologie	<ul style="list-style-type: none"> • Augenaktivität • EEG • Peripherphysiologie

Tab. 1: Kategorien der Müdigkeitsmessverfahren

Kapitel 6) treffen. Jede Messverfahrensgruppe umfasst Testverfahren, Skalen und Parameter mit unterschiedlichen Operationalisierungen, die in der nachfolgenden Literaturübersicht im Überblick dargestellt werden. Eine ausführliche Bewertung ausgewählter objektiver Müdigkeitsmessverfahren erfolgte in der Delphi-Studie.

Die gewählte Kategorisierung erfüllt ihren Zweck als Arbeitsinstrument im Projekt, ohne dass daraus ein Anspruch auf Richtigkeit oder Vollständigkeit abgeleitet werden soll.

3.3 Subjektive Messverfahren

Bei subjektiven Verfahren zur Müdigkeitserfassung lassen sich zwei Kategorien unterscheiden: 1) die Messverfahren, die auf die Erfassung einer zeitlich überdauernden Einschlafneigung abzielen, und 2) Messverfahren, die Müdigkeit als momentan vorliegenden Zustand erfassen. Verfahren aus der ersten Gruppe werden vornehmlich im Feld der (Schlaf-) Medizin zur Diagnostik und Verlaufsmessung von Erkrankungen mit hoher Tagesschläfrigkeit wie z. B. Schlafapnoe, Narkolepsie etc. eingesetzt. Fragebögen wie der Epworth Sleepiness Scale (ESS) oder der Sleep Wake Activity Inventory (SWAI) bilden die Einschlafneigung in alltäglichen Situationen ab und diskriminieren gut zwischen normaler und pathologischer Schläfrigkeit (JOHNS 2000; ROSENTHAL et al. 1993). Einen Überblick zu den Müdigkeitsskalen, die in der medizinischen Diagnostik zum Einsatz kommen, liefern SHEN et al. (2006). Es ist anzunehmen, dass diese Verfahren zur Erfassung der momentanen Fahrermüdigkeit nicht oder nur eingeschränkt geeignet sind.

Zu den Verfahren zur Erfassung der momentanen Fahrermüdigkeit gehören die Karolinska Sleepiness Scale, kurz KSS (ÅKERSTEDT & GILLBERG 1990), die Stanford Sleepiness Scale, kurz SSS (HODDES et al. 1973) und die visuelle Analogskala, kurz VAS (MONK 1989). Sie unterscheiden sich in der

- - Anzahl der Dimensionen: KSS und VAS je eine, von den ursprünglich acht Dimensionen der VAS wird meist nur die erste „gar nicht müde – extrem müde“ verwendet,
- - Anzahl der Stufen: Die KSS hat neun, die SSS sieben, und die VAS bietet nur die verbale Verankerung der Extrempole einer 100 mm langen Linie, auf der das Urteil abzutragen ist,

- - Formulierung der verbalen Verankerung.

Die genannten Skalen weisen hohe Korrelationen zu anderen Messverfahren auf (HORNE & BAULK 2004; OTMANI et al. 2005; KECKLUND & ÅKERSTEDT 1993; AVNI et al. 2006; KAIDA et al. 2006). Unterschiede in der Mess- und Testgüte der Skalen sind nicht erkennbar, und auch selten verwendete Skalen (wie z. B. die ATS von GILLBERG et al. 1994) weisen eine durchaus vergleichbare Güte auf.

Trotz hoher Übereinstimmung der Selbstbeurteilungsskalen mit objektiven Messverfahren wird oft bezweifelt, dass Fahrer in der Lage sind, ihre eigene Müdigkeit korrekt einzuschätzen. Auch ist der Zweifel an der hohen Validität nicht ganz unberechtigt, denn schließlich bilden die oft berichteten Korrelationsmaße keine Niveauunterschiede (z. B. systematische Unterschätzung) ab. So zeigt sich, dass insbesondere bei hoher Müdigkeit die subjektive Bewertung wacher ausfällt, als objektive Maße es vermuten ließen (SCHMIDT et al. 2009). Andere führen an, das Problem liege weniger in der korrekten Selbsteinschätzung oder der Fehleinschätzung der Müdigkeitsfolgen (beide Aussagen gelten als umstritten) als vielmehr in der angemessenen Reaktion (NORDBAKKE & SAGBERG 2007). Dass Fahrer nicht angemessen auf aufkommende Müdigkeit reagieren, ist unumstritten.

Ab der siebten Stufe der KSS wird es für Fahrer zunehmend schwerer, wach zu bleiben und Fahrfehler zu vermeiden (REYNER & HORNE 1998, siehe auch Tabelle 2). Experten aus der Delphi-Befragung ordnen die Schwelle der Fahrtüchtigkeit mehrheitlich vergleichbar ein, während Fahrer (Angaben aus Nutzerbefragung in Kapitel 5) die Grenze der Fahrtüchtigkeit erst später erreicht sehen (siehe Tabelle 2). Eigenen Angaben zufolge würde die Mehrzahl der Fahrer erst bei hoher Müdigkeit (KSS-Stufe 8 und 9) die Fahrt unterbrechen.

Fazit

Die Validität der Selbsteinschätzung gilt als gut belegt. Bei hoher Müdigkeit lässt die Fähigkeit einer akkuraten Selbsteinschätzung zunehmend nach. Aufgrund des geringen Zeit- und Kostenaufwands gehören Selbstbeurteilungsverfahren zu den häufigsten Müdigkeitsmessverfahren. Eine Verlaufsmessung ist trotz der nachgewiesenen Reaktivität der Messung möglich, da die Aktivierung des Fahrers sich nach kurzer Zeit nivelliert (SCHMIDT et al. 2011). Im Gegensatz zu anderen Messverfahren

KSS		Expertenbefragung (N = 12)		Nutzerbefragung (N = 20)
		Pausenempfehlung an Fahrer	Unterbrechung bei nächstbietender Gelegenheit	Ab wann würden Sie eine Fahrt unterbrechen?
6	Zeichen der Müdigkeit	25 %	8,3 %	-
7	Müde, leicht wach zu bleiben	50 %	25 %	15 %
8	Müde, schwer wach zu bleiben	25 %	50 %	75 %
9	Sehr müde, Kampf gegen Schlaf	-	16,7 %	10 %

Tab. 2: Wann ist aus Experten- und Fahrersicht die Grenze der Fahrtüchtigkeit erreicht? Das Urteil wird auf Basis der Karolinska Sleepiness Scale gefällt

ren (Ausnahme ist das videobasierte Expertenrating) ist eine Differenzierung von beginnender, mittlerer, schwerer und schwerster Müdigkeit zumindest intraindividuell möglich. Von einer Generalisierbarkeit der Werte ist nicht auszugehen. So kann „Kampf gegen den Schlaf“ von Fahrer zu Fahrer unterschiedlich interpretiert werden (ein Fahrer aus der Nutzerbefragung bewertete bspw. seine Müdigkeit zu einem Warnzeitpunkt nur mit KSS-Stufe 8, da er „nur ein paar Mal Sekundenschlaf gehabt habe, aber noch nicht gegen das Einschlafen kämpfte“). Als zusätzliches Maß ist die Erfassung der Selbsteinschätzung zu empfehlen. Insbesondere bei der Auslegung von Müdigkeitswarnsystemen im Fahrzeug ist sie für viele Fahrer eine wichtige Referenz, an der sich die Systemfunktionalität messen lassen muss.

3.4 Verhaltensbasierte Messverfahren

3.4.1 Fahrperformanz

Der Zusammenhang zwischen eingeschränkter Fahrperformanz und Müdigkeit ist nicht nur dem Augenschein nach valide. Empirische Studien belegen die müdigkeitsbedingten Beeinträchtigungen der Fahrtüchtigkeit. So treten mit steigender Müdigkeit Fahrfehler zunehmend häufiger auf (siehe Bild 1).

Die Fahrmüdigkeit kann sich in unterschiedlichen Fahrverhaltensmaßen äußern. Umfassend untersucht wurde bislang der Einfluss von Müdigkeit auf das Lenkverhalten und die Güte der Spurhaltung der Fahrer. Weitere Performanzmaße, wie z. B. die Fahrgeschwindigkeit und deren Variabilität, der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug (bzw. Time Headway) oder die Reaktionszeit des Fahrers wurden nur selten verwendet und zeigen teils inkonsistente Ergebnisse.

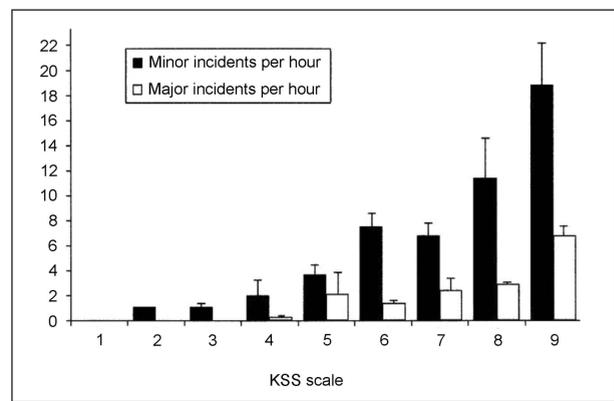


Bild 1: Zusammenhang zwischen subjektiver Müdigkeit (KSS) und der Anzahl kleinerer (schwarz) und größerer (weiß) Fahrfehler (REYNER & HORNE 1998)

Lenkverhalten

Wache Fahrer halten über kontinuierlich regelnde Lenkbewegungen ihr Fahrzeug in der Spur. Bei Müdigkeit nehmen die regelmäßigen Lenkbewegungen ab, und es treten vermehrt schnellere und größere Korrekturbewegungen auf. Diese Veränderungen des Lenkverhaltens werden als Müdigkeitsindikatoren herangezogen, so z. B. die

- Amplitude der Lenkkorrekturen,
- Standardabweichung der Lenkkorrekturen,
- Anzahl der Zeit, in der eine gesetzte Lenkwinkelgröße und/oder -geschwindigkeit überschritten wird,
- das Verhältnis schneller zu langsamer Lenkkorrekturen.

Bei Müdigkeit treten kleinere Lenkkorrekturen seltener, größere häufiger auf. Die mittlere Amplitude und die Standardabweichung des Lenkwinkels nehmen zu (THIFFAULT & BERGERON 2003; BROOKHUIS & de WAARD 1993). Die Häufigkeit

von Lenkgeschwindigkeiten oberhalb von 150°/s steigt (DINGUS et al. 1987). Auch wird das Verhältnis schneller zu langsamen Lenkkorrekturen durch Müdigkeit beeinflusst. So wird eine entsprechende Zunahme bei 80 % der müden Fahrer festgestellt (BOUCHNER et al. 2006). Aussagen zur Überlegenheit eines Parameters und insbesondere seiner konkreten Operationalisierung sind aus unterschiedlichen Gründen nicht möglich. Zum einen sind nominal gleiche Parameter des Lenkverhaltens (z. B. kleine vs. große Lenkkorrekturen) über die jeweiligen Studien unterschiedlich operationalisiert (THIFFAULT & BERGERON 2003; WIERWILLE et al. 1996; ANUND 2009). Insbesondere Anwendungen im Automobilbereich (Müdigkeitswarnsysteme) nutzen häufig ein „Konglomerat aus mehreren Einzelparametern“ (vgl. Kapitel 6.3.1) von Lenkwinkel und Lenkgeschwindigkeit. Vergleiche scheitern zudem an der eingeschränkten Übertragbarkeit der in einem Fahrzeugtyp (bzw. Simulator) validierten Ergebnisse auf einen anderen. Auf die Vor- und Nachteile der Verwendung des Lenkverhaltens und der nachfolgend erläuterten Spurhaltung zur Müdigkeitserfassung wird im Rahmen der Delphi-Studie umfassend eingegangen (siehe Kapitel 6.3.1).

Spurhaltung

Müdigkeit wirkt sich auch auf einfache und hoch geübte Fahraufgaben wie die Spurhaltung aus. Folgende Indikatoren werden zur Müdigkeitsdetektion verwendet:

- - Abweichung von der Spurmitte,
- - Variabilität der lateralen Spurposition (SDLP),
- - Time to Lane Crossing (TLC),
- - Touchieren oder teilweises Überfahren der Spurbegrenzung.

Bei Müdigkeit weichen Fahrer zunehmend von der Mitte ihrer Fahrspur ab (ARNEDT et al. 2005; MOLLER et al. 2006). Die Abweichung von der Spurmitte ist damit nachweislich ein guter Indikator für Müdigkeit, aber insofern fehleranfällig, als Fahrer oft aus anderen Gründen als Müdigkeit (z. B. Gegenverkehr) nicht mittig fahren. Vorteile bietet daher die Verwendung der Varianz (oder Standardabweichung) der lateralen Spurposition (kurz: SDLP). Zu diesem Fahrperformanzmaß liegen umfassende Forschungsarbeiten vor – und das nicht allein im Bereich der Erfassung der Fahrermüdig-

keit (z. B. auch Blutalkoholkonzentration und Fahrtüchtigkeit). Die SDLP steigt bei Müdigkeit (INGRE et al. 2006a; INGRE et al. 2006b). Berichtet wird eine Zunahme der SDLP um ca. 30 % (ANUND 2009; BROOKHUIS & de WAARD 1993).

Vergleichsweise selten berichten Studien von der Time to Lane Crossing (TLC), die neben der Betrachtung der Spurabweichung auch die Fahrgeschwindigkeit herausrechnet. Als kritischer Grenzwert werden in der Literatur Schwellen von 1 s (van WINSUM et al. 2000) bis zu < 0.5 s diskutiert (VERWEY & ZAIDEL 2000).

Touchieren oder teilweises Verlassen der Spur mit einem oder mehreren Rädern wird in vielen Studien (im Simulator) als Zwischenfall und Proxymaß für Unfälle und damit als zu prädiktierendes Kriterium gewählt (MOLLER et al. 2006; OTMANI et al. 2005; PHILIP et al. 2005). Die hohe externe Validität dieses Maßes ist unbestritten, gelten doch insbesondere Alleinunfälle mit Abkommen von der Fahrbahn als typische Müdigkeitsunfälle. Eine umfassende und systematisch aufbereitete Übersicht zu den hier berichteten Maßen der Fahrperformanz bieten LIU et al. (2009).

Die Vor- und Nachteile der Erfassung der Spurhaltung zur Müdigkeitsdetektion werden in Kapitel 6.3.2 erläutert.

Weitere Maße

Bei der Mehrheit der Fahrer steigen bei Müdigkeit die durchschnittliche Geschwindigkeit (BOUCHNER et al. 2006) und die Variabilität der Fahrgeschwindigkeit (ARNEDT et al. 2005; CAMPAGNE et al. 2004). Möglich scheint jedoch, dass die mit zunehmender Fahrtdauer steigende Geschwindigkeit nicht Müdigkeit (Time on Task) abbildet, sondern ein Simulatorartefakt darstellt.

Die Erfassung der Reaktionszeit mit einem direkten Bezug zur Fahraufgabe besitzt eine höhere ökologische Validität als die Reaktionszeiterfassung über Nebenaufgaben. MOLLER et al. (2006) zeigten eine Zunahme der Lenkreaktionszeit (Gegenlenken bei Seitenwind). Andere Studien konnten keine Beeinträchtigungen der Reaktionszeit z. B. auf Geschwindigkeitsänderungen des vorausfahrenden Fahrzeugs (BROOKHUIS & de WAARD 1993) oder unter Verwendung der Bremsreaktionszeit (DUREMAN & BODÉÉN 1972) nachweisen.

Dass der Headway oder dessen Variabilität steigt, wenn die Fähigkeit zu einer schnellen Reaktion auf

Geschwindigkeitsänderung des vorausfahrenden Fahrzeugs abnimmt, gilt nicht als empirisch belegt. Die wenigen Studien berichten inkonsistente Ergebnisse, d. h. Geschwindigkeitszu- und -abnahmen (HULST et al. 2001; BROOKHUIS & de WAARD 1993). So lässt sich festhalten: „It is still an open question whether such measures are related to driver sleepiness“ (KECKLUND et al. 2006).

Somit erweisen sich nach dem aktuellen Forschungsstand und dem Expertenurteil (siehe Kapitel 6) lediglich das Lenkverhalten und die Spurhaltung als valide Maße zur Detektion der Fahrer-müdigkeit.

3.4.2 Verhaltensbeobachtung

Bei Müdigkeit verlangsamen sich die Lidschlüsse und die Dynamik der Kopf- und Körperbewegungen. Die Blickaktivität nimmt ab, die Mimik erschlafft, der Blick wird gläsern, der Fahrer fängt an zu gähnen (KIRCHER et al. 2002; ROGÉ et al. 2001). Eigene Erfahrungen (MOHS et al. 2011) legen einen umgekehrt U-förmigen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Sekundärhandlungen und steigender Müdigkeit nahe. Unter Sichtung von Videoaufnahmen des Fahrers lassen sich anhand von Bewertungsskalen das Auftreten und die Charakteristik dieser müdigkeitsbedingten Veränderungen erfassen und das Ausmaß der Fahrer-müdigkeit quantifizieren.

Es liegen unterschiedliche Bewertungsskalen zur Erfassung der Fahrermüdigkeit vor. Die international verbreitetste ist die Wierwille-Skala (WIERWILLE & ELLSWORTH 1994) bzw. deren leicht modifizierte Version, die ORD — Observer Rating of Drowsiness (WIEGAND et al. 2009). Erfasst werden unterschiedliche Verhaltensindikatoren an Gesicht und Körper und einer von fünf Müdigkeitsausprägungen (nicht müde bis extrem müde) zugeordnet. Belegt sind eine hohe Interraterreliabilität ($r = .71$) und hohe Korrelationen zu anderen Messverfahren wie z. B. EEG und Lidschlussverhalten (VÖHRINGER-KUHNT et al. 2004; WIERWILLE & ELLSWORTH 1994; SCHLEICHER et al. 2008). Bei deutschen Automobilherstellern ist hingegen die HFC-Skala 2.0 am verbreitetsten. Beurteilt werden anhand von neun Dimensionen die Häufigkeit und Dynamik des Lidschlussverhaltens, der Blickaktivität, der Körper-spannung, der Mimik, des Gähnens und der

Peripherhandlungen. Diese Einzelbeobachtungen fließen in ein Gesamturteil ein, das den Fahrer-zustand nach neun Stufen der Aktiviertheit und Müdigkeit differenziert (MOHS et al. 2011).

Wenn es der Einsatzzweck zulässt, bietet es sich an, Fremdbewertungen durch Selbstbewertungen unter Verwendung derselben Skala zu ergänzen.

Die Reliabilität und Validität der Beurteilungen hängen neben dem Stimulusmaterial (höher bei extremen Fahrerzuständen) beträchtlich von der Expertise der Rater ab. Vorteilhaft ist eine Beurteilung durch mind. zwei unabhängige Rater. Vor allem aber ist ein umfassendes Training notwendig, um die Güte der Bewertung zu sichern. Aus diesem Grund wird die videobasierte Verhaltensbeobachtung oft als „Expertenrating“ bezeichnet.

Als Alternative zur videobasierten Expertenanalyse wurde die automatisierte Auswertung der videobasierten Erfassung von Müdigkeitsindikatoren am Gesicht der Fahrer vorgeschlagen. Im Prototyp eines Müdigkeitsmesssystems implementiert, liefert die automatische Klassifikation vielversprechende Ergebnisse, zumal dieser Prototyp auch etablierte Indikatoren des Lidschlussverhaltens einbezieht (JI et al. 2004). Über die weitere Anwendung oder Fortführung dieses Ansatzes ist unseres Wissens nichts bekannt. Diese Ansätze erscheinen daher eher explorativ. Auch in der Expertenrunde (vgl. Delphi-Studie in Kapitel 6) wird die Verhaltensbeobachtung durch Experten der automatisierten Auswertung einstimmig vorgezogen. Deren Vor- und Nachteile wurden im Rahmen der Delphi-Studie diskutiert und sind in Kapitel 6.3.5 zusammenfassend dargestellt.

3.4.3 Testperformanz

Müdigkeit beeinträchtigt die kognitiven Fähigkeiten und das Reaktionsvermögen. Entsprechende Testverfahren ermöglichen die Erfassung der Müdigkeitsfolgen und Rückschlüsse auf das Vorliegen von Müdigkeit.

Verfahren der Testperformanz zielen auf die Erfassung der momentanen Leistungsfähigkeit ab, über die auf das Vorliegen von Müdigkeit geschlossen wird. Verwendet werden vorrangig Verfahren zur Erfassung der (Wahl-)Reaktion und der Vigilanz (z. B. Mackworth-Clock). Dort zeigen sich die Reaktions- und Antwortzeiten bei Müdigkeit zunehmend verlangsamt bei steigender Anzahl an Feh-

lern (WIERWILLE & ELLSWORTH 1994; KAIDA et al. 2007; PHILIP et al. 2005; ARNETT et al. 2005). Angewendet werden die genannten Verfahren der Testperformanz auch bei einer Begutachtung zur Diagnose von Tagesschläfrigkeit.

Zielt die Anwendung auf die Beurteilung der Fahr- (und Bedien-)tüchtigkeit im betrieblichen Arbeitsumfeld ab, spricht man von testperformanzbasierten Verfahren als Fitness-for-Duty-Tests (kurz: FFD). Am gebräuchlichsten ist die Verwendung von FFD (synonym auch Readiness to Perform) bei Operateuren und Maschinenführern. Oft werden einfache Wahlreaktionsaufgaben simultan zur Bedientätigkeit dargeboten. Einen Überblick über bestehende Verfahren liefert Kapitel 4. Die Anwendung im realen Straßenverkehr ist aufgrund der Interferenz mit der Fahraufgabe kritisch zu bewerten. Neben objektiven Leistungsmaßen werden auch Checklisten und Selbstbeurteilungsverfahren als FFD eingesetzt. Doch nur bei objektiven Leistungsmaßen ist eine Manipulation der Ergebnisse in Richtung eines wacheren Zustands ausgeschlossen.

Als Nachteil der testdiagnostischen Verfahren wird neben der mangelnden Spezifität (Ablenkung, mangelnde Leistungsmotivation, Alkohol) v. a. die Reaktivität ins Feld geführt. Die Aufgabenbearbeitung reduziert die Monotonie und führt somit zu besseren Leistungen.

Fazit

Bei einer Anwendung außerhalb der Fahrsituation weist eine Vielzahl unterschiedlicher Aufgabentypen und Leistungsgrößen müdigkeitsbedingte Veränderungen auf. Aufgrund mangelnder Vergleichbarkeit der Studien und der Abhängigkeit von den jeweiligen kognitiven Anforderungen verschiedener Fahrsituation sind keine abschließenden Aussagen möglich, welche Modalität (visuell vs. akustisch) oder Aufgabenkomplexität (gering vs. hoch) besonders geeignet zur Müdigkeitserfassung ist. Bei Fitness-for-Duty-Tests werden zumeist Verfahren mit einer geringen Reaktivität (einfache Wahlreaktions- und Vigilanzaufgaben) bevorzugt. Wie bei allen Verfahren ist davon auszugehen, dass eine längere Testdauer die Testgüte verbessert. Als Nachteil erweisen sich die geringe Spezifität, da neben Müdigkeit auch andere Faktoren die Leistungsfähigkeit beeinträchtigen können, die bereits diskutierte Reaktivität und die eingeschränkte Anwendbarkeit während der Fahraufgabe.

Ein vorgeschriebener Einsatz von Fitness-for-Duty-Tests während der Teilnahme am Straßenverkehr ist wegen der Interferenz mit der Fahraufgabe nicht zu empfehlen. Zu Forschungszwecken hingegen ist die selbstbestimmte Bearbeitung einfacher akustischer Nebenaufgaben vertretbar.

3.5 Physiologische Messverfahren

3.5.1 Augenaktivität

Das am weitesten verbreitete Verfahren zur Erfassung von Müdigkeit beruht auf der Erfassung der Augenaktivität. Im Großen und Ganzen lassen sich zwei Verfahrensklassen unterscheiden:

- - Die Erfassung des Lidschlussverhaltens über das Elektrookulogramm (EOG) oder kamerabasierte Systeme. Mit steigender Müdigkeit nehmen die Phasen des Lidschlusses an Dauer zu und an Geschwindigkeit und Amplitude (Augenöffnungsgrad) ab. Die Frequenz der Lidschlüsse binnen eines gesetzten Zeitraums weist einen umgekehrt u-förmigen Verlauf auf, sie steigt mit aufkommender Müdigkeit und fällt bei hoher Müdigkeit wieder ab.
- - Die Erfassung des Blickverhaltens über spezielle Eyetrackingsysteme, die Merkmale des Blickverlaufs abbilden. Aufgezeichnet werden das Verharren des Blicks auf einer bestimmten Stelle (Fixationen) und die Blicksprünge (Sakkaden), die den Blick neu ausrichten. Belege für müdigkeitsbedingte Veränderungen liegen für unterschiedliche Merkmale der Sakkaden vor.

Nachfolgend werden die unterschiedlichen Müdigkeitsindikatoren des Lidschlusses und des Blickverhaltens kurz vorgestellt.

Lidschlussverhalten

Lidschläge lassen sich nach ihren zeitlichen Abläufen in verschiedene Phasen einteilen, die müdigkeitsbedingte Veränderungen zeigen (vgl. Bild 2).

Die Lidschlussdauer nimmt mit steigender Müdigkeit zu (CAFFIER et al. 2003; PAPADELIS et al. 2007; ANUND 2009; SCHLEICHER et al. 2008). Von allen Parametern des Lidschlussverhaltens ist die Lidschlussdauer der wohl meistverwendete und vielleicht valideste Indikator für Müdigkeit.

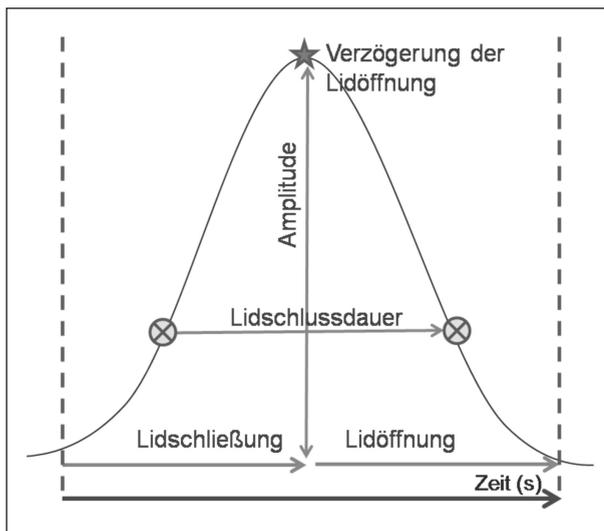


Bild 2: Unterschiedliche Phasen eines Lidschlusses und müdigkeitssensitive Parameter. Die Messung der Lidschlussdauer setzt ein/stoppt (⊗) bei Erreichen der Hälfte der Amplitude oder bei Erreichen der maximalen Geschwindigkeit. (★) beschreibt die Verzögerungsdauer der Lidöffnung, die zwischen 1-4 ms (wach) bis zu mehreren 100 ms (hohe Müdigkeit) reichen kann

Die Lidschlussfrequenz, also die Anzahl an Lidschlüssen binnen eines definierten Zeitraums, steigt bei aufkommender Müdigkeit (PAPADELIS et al. 2007; MORRIS & MILLER 1996), während sie mit hoher Müdigkeit wieder abnimmt. Neben der Müdigkeitsausprägung wird sie auch durch die Anforderungen der Fahraufgabe (Art, Schwierigkeit und Dauer) beeinflusst (HARGUTT 2003). Einen umfassenden Überblick zu Merkmalen des Lidschlussverhaltens bietet HARGUTT (2003).

Der Indikator PERCLOS (kurz für percent closure) beschreibt den Anteil der Zeit, in dem die Augen zu mindestens 80 % geschlossen sind. Er wurde bereits als „most valid sleepiness measure in operational settings such as driving“ bezeichnet (BARR et al. 2005). Praktische Anwendung findet PERCLOS u. a. beim Müdigkeitswarnsystem names CoPilot (vgl. Kapitel 4), doch wurden beim Einsatz im Feld u. a. technische Probleme berichtet (KECKLUND et al. 2006). Bereits aus der Operationalisierung wird ersichtlich, dass PERCLOS insbesondere schwere Müdigkeit erfasst und nicht sensitiv für beginnende Müdigkeit ist.

Was man umgangssprachlich unter dem Begriff Sekundenschlaf versteht, ist in der einschlägigen Fachliteratur unter verschiedensten Namen und Operationalisierungen zu finden. So wird Sekundenschlaf u. a. definiert als Lidschlüsse von mehr als 500 ms (microsleep bei SCHLEICHER et

al. 2008) oder mehr als 1 s Dauer (long eyelid closures bei VERWEY & ZAIDEL 2000). MOLLER et al. (2006) sprechen von Mikroschlafepisodes, die sich im EEG abzeichnen und demzufolge über 3 s andauern. Doch sehen nicht alle das Auftreten von mit Sekundenschlaf korrespondierenden EEG-Veränderungen als belegt an (SCHLEICHER et al. 2008). Sekundenschlaf tritt vor allem bei schwerer Müdigkeit auf und ist ein sehr spezifischer Müdigkeitsindikator, der angesichts seiner zeitlichen Nähe zum Einschlafvorgang alles andere als sensitiv für eine beginnende Müdigkeit ist.

Folgende weitere Lidschlussindikatoren zeigen Veränderungen bei auftretender Müdigkeit:

- Die Lidöffnungsdauer nimmt zu (SCHLEICHER et al. 2008; CAFFIER et al. 2003).
- Die Verzögerung der Lidöffnung vervielfacht sich von ca. 1-4 ms auf 50 ms (MEINOLD 2005).
- Die Amplitude des Lidschlags nimmt ab (MORRIS & MILLER 1996).
- Die Lidschlussgeschwindigkeit nimmt bei Müdigkeit bis um das 10fache ab (SCHLEICHER et al. 2008; JI et al. 2004).
- Blink flurries, d. h. mehrmalige Lidschlüsse (mind. 3) binnen einer Sekunde, treten auf. Fraglich ist, inwiefern sie visuelle Müdigkeit abbilden oder aber als Kompensationsstrategie bei auftretender Müdigkeit dienen (KECKLUND et al. 2006).

Eine gezielte Kombination mehrerer valider Einzelindikatoren des Lidschlussverhaltens verspricht eine höhere Mess- und Testgüte. Als standardisierte Kombinationen bekannt sind:

- Der Quotient aus Amplitude zur maximalen Geschwindigkeit der Lidschlüsse (AVR = amplitude velocity ratio) steigt bei Müdigkeit (KECKLUND et al. 2006).
- Die Kombination und Gewichtung der AVR und der Dauer des Lidschließens, der Öffnung und der Verzögerung der Lidöffnung, kurz JDI für Johns Drowsiness Index (JOHNS et al. 2007). Positiv hervorzuheben ist, dass Angaben zur Sensitivität (83.3 %) und zur Spezifität (60.9 %) für die Vorhersage des Spurverlassens binnen der nächsten 15 min vorliegen (STEPHAN et al. 2006).

Blickverhalten

Bei Müdigkeit werden Blicksprünge (Sakkaden) seltener und dauern länger (SCHLEICHER et al. 2008). Wohl auch aufgrund der ungleich höheren Anforderungen an die Messtechnik (Tracking der Pupille, hohe zeitliche Auflösung) werden sakkadenbasierte Maße nur selten zur Müdigkeitsdetektion verwendet (SCHLEICHER et al. 2008). Eine Studie berichtet eine Zunahme von Fixationen mittlerer Länge (150 bis 900 ms) und eine Abnahme von sehr kurzen „Expressfixationen“ und langen Fixationen (SCHLEICHER et al. 2008). Doch bislang gelten Veränderungen des Blickverhaltens nicht als belastbar belegt (KECKLUND et al. 2006).

Nach dem aktuellen Forschungsstand liefern die unterschiedlichen Parameter des Lidschlussverhaltens eine valide Erfassung der Fahrermüdigkeit. Das Blickverhalten hingegen bietet bei deutlich geringerer Validität keine Vorteile hinsichtlich der Ökonomie oder Effizienz bei der Erfassung. Keiner der 12 Experten der Delphi-Studie nannte die Blickfassung als validen Müdigkeitsindikator. Im Rahmen der Delphi-Studie wurden daher ausschließlich die Vor- und Nachteile der Erfassung des Lidschlussverhaltens diskutiert. Das entsprechende Bewertungsprofil samt Diskussion wird dargestellt in Kapitel 6.3.4.

3.5.2 EEG-basierte Messverfahren

Bei Müdigkeit treten Veränderungen der Gehirnwellenaktivität auf, die mithilfe des Elektroenzephalogramms (EEG) erfassbar sind. Folgende Indikatoren und Testverfahren werden herangezogen, um entsprechende Müdigkeitskorrelate abzubilden:

- - Ereigniskorrelierte Potenziale (EKP),
- - Frequenzbänder,
- - Spindeln (Bursts) im Spontan-EEG,
- - standardisierte Testprozeduren.

Ereigniskorrelierte Potenziale (EKP) sind Spannungsschwankungen, die im EEG infolge sensorischer Reize auftreten. Ab ca. 100 ms nach Reizbeginn bilden positive und negative Komponenten die Informationsverarbeitung (Aufmerksamkeitsänderungen, Vergleichsprozesse und Erwartungsänderungen) des Probanden ab. Die ausgelösten Spannungsschwankungen werden zur besseren Erkennung summiert und gemittelt, daher ist trotz häufi-

ger Signaldarbietung nur eine geringe zeitliche Auflösung der Müdigkeitserfassung möglich. Die müdigkeitsbedingten Veränderungen in Latenz und Amplitude des Potenzials gelten als belegt (ZHAO et al. 2010; SCHMIDT et al. 2009), auch wenn Studien sie nicht immer für beide Indikatoren nachweisen konnten (vgl. OKEN et al. 2006).

Das EEG ist in Frequenzbänder (Hz) eingeteilt, die Aussagen zum Aktivierungsgrad ermöglichen. Eine Erhöhung der Aktivität in niedrigen Frequenzen spiegelt z. B. eine verringerte Aktivierung wider. Eine klare und eindeutige Einteilung der unterschiedlichen EEG-Frequenzbänder ist nach Sichtung der einschlägigen Literatur nicht gegeben, allerdings sind die Unterschiede marginal. Zur Müdigkeitserfassung verwendet werden die Frequenzbänder Alpha, Beta, Theta und selten auch Delta:

- - Alpha (ca. 8-13 Hz) tritt auf bzw. steigt bei Müdigkeit (MACCHI et al. 2002; EOH et al. 2005). Nach LIU et al. (2009) stellt es ein frühes Anzeichen von Müdigkeit dar. Der Indikator bildet jedoch nicht allein Müdigkeit, sondern insbesondere Entspannung ab (KECKLUND et al. 2006).
- - Bei Beta (ca. 14-35 Hz) handelt es sich um das neurophysiologische Korrelat geistiger Aktivität. Bei Müdigkeit geht die Beta-Aktivität zurück (JAP et al. 2011; EOH et al. 2005).
- - Theta (ca. 4-8 Hz) tritt auf bzw. steigt bei Müdigkeit und gilt vorrangig als Indikator für schwere Müdigkeit (CAMPAGNE et al. 2004; LIU et al. 2009). Auch die vergleichsweise selten untersuchte Deltaaktivität (0,5-3 Hz) tritt bei Müdigkeit vermehrt auf (LAL & CRAIG 2002).

Mitunter werden zusätzliche Ausdifferenzierungen getroffen, wie z. B. schnelles Theta bzw. langsames Alpha (6-9,75 Hz), das ebenfalls bei Müdigkeit steigt (MACCHI et al. 2002).

Die Aggregation valider Einzelindikatoren bietet eine vielversprechende Möglichkeit, die Validität der Detektion weiter zu verbessern. So wurden für unterschiedliche Kombinationen der Frequenzbänder müdigkeitsbedingte Veränderungen nachgewiesen, z. B. für Theta/(Alpha + Beta) oder (Alpha + Theta)/Beta (JAP et al. 2011; CAMPAGNE et al. 2004; EOH et al. 2005). Doch ist weder die Überlegenheit einzelner Frequenzbänder noch die einer bestimmten Kombination überzeugend belegt. Am gängigsten war bislang die Erfassung von Alpha

oder Theta, wobei Alpha gegenüber Theta den vergleichsweise sensitiveren Indikator bietet. Hohe interindividuelle Unterschiede im Auftreten (LAL & CRAIG 2001) oder im Ausgangswert (OKEN et al. 2006) beeinträchtigen die Vergleichbarkeit und Interpretierbarkeit der Messwerte.

In den letzten Jahren richtete sich die Aufmerksamkeit vermehrt auf spezielle kurzzeitig auftretende EEG-Muster im Theta- und insbesondere Alpha-Band. Als Spindeln (Bursts) bezeichnet man das Auftreten einer temporären Häufung („Burst“) langsamerer (um ca. 8-13 Hz) Aktivität von 1-3 s Dauer. Bei Müdigkeit nehmen Alphaspindeln in Anteil, Amplitude und Dauer zu (EOH et al. 2005; SCHMIDT et al. 2011; PAPADELIS et al. 2007; SIMON et al. 2011). Auch für Thetaspindeln sind müdigkeitsbedingte Veränderungen nachweisbar (EOH et al. 2005). Gegenüber der Verwendung des Alphafrequenzbands zeigen sich die einzelnen Alphaspindelparameter überlegen (SIMON et al. 2011). Dies mag zumindest teilweise auf ihre Robustheit gegenüber Störeinflüssen (SCHMIDT et al. 2011) zurückzuführen sein, die bei der Analyse klassischer EEG-Frequenzbänder Probleme bereiten. Die Eignung von Alphaspindeln zur Müdigkeitsdetektion im realen Straßenverkehr gilt inzwischen als unstrittig.

Ein weiteres Verfahren zur Müdigkeitsdetektion stellt die Bestimmung der Mikroschlafdichte dar. Erfasst wird der Anteil der Mikroschlafepisoden auf Basis von EEG- und EOG-Maßen bei hoher Übereinstimmung zu anderen Messverfahren (GOLZ et al. 2011). Dieses Verfahren scheint ausschließlich zur Detektion auffallend schwerer Müdigkeit geeignet.

Standardisierte Testverfahren ermöglichen eine objektive Erhebung und Interpretation der EEG-Maße, sind jedoch nicht mit der Fahraufgabe vereinbar, da bspw. das Schließen der Augen über einen längeren Zeitraum erforderlich ist. Dazu gehören bspw. der Karolinska Drowsiness Test (ÅKERSTEDT & GILLBERG 1990; KAIDA et al. 2006) oder der Alpha Attenuation Test (STAMPI et al. 1995), auf die hier nicht weiter eingegangen wird.

Die Vor- und Nachteile von EEG-Maßen zur Müdigkeitsdetektion werden in Kapitel 6.3.3 erläutert. Dort wird das Güteprofil der EEG-Indikatoren, die eine kontinuierliche Messung (Spindeln, Frequenzbänder, Mikroschlafdichte) während der Fahrt erlauben, vorgestellt und umfassend diskutiert.

3.5.3 Peripherphysiologie

Die bei Müdigkeit reduzierte Aktivierung lässt sich über verschiedene physiologische Messverfahren erfassen, so z. B. mithilfe des Elektrokardiogramms (Herzrate und Herzratenvariabilität), des Elektromyogramms (Muskeltonus), kamerabasierter Erfassung (Pupillenveränderungen) oder der Bestimmung des Melatonin-, Cortisol- oder Ptyalinspiegels auf Basis von Speichelproben. Die Vielzahl unterschiedlicher Messverfahren und jeweiliger Müdigkeitsindikatoren, die bislang zur Müdigkeitserfassung herangezogen worden sind, wird nachfolgend nicht in aller Vollständigkeit aufgeführt. Es folgt ein kurzer Überblick über die gängigsten Verfahren.

Reduzierte periphere Aktivierung äußert sich in einer Verringerung von Puls und Herzrate (WIERWILLE & ELLSWORTH 1994; DUREMAN & BODÉÉN 1972; LAL & CRAIG 2002; SCHMIDT et al. 2011) und einer Veränderung unterschiedlicher Parameter der Herzratenvariabilität, kurz HRV (ORON-GILAD et al. 2008; PATEL et al. 2011; KAIDA et al. 2007). Doch sind die Richtung der Veränderungen und deren Interpretation nicht eindeutig. So spricht die HRV u. a. auch auf Beanspruchung an.

Die Verringerung des Muskeltonus wird bei vielen Müdigkeitsmesssystemen über das Abnicken des Kopfs beim Einschlafen erfasst (vgl. Kapitel 4). Die mangelnde Sensitivität dieses Indikators (oft erst nach dem Einschlafen) bedarf wohl keiner weiteren Erläuterung. Eine Müdigkeitserfassung vor Eintreten des Schlafs ist jedoch mithilfe eines Elektromyogramms möglich (DUREMAN & BODÉÉN 1972).

Bei der Gleichgewichtsanalyse (Posturografie) werden müdigkeitsbedingte Veränderungen der Stabilität und Synchronisation des Zusammenspiels der Muskeln in einer standardisierten Testprozedur von ca. 3 min erfasst. Es liegen Belege der Testgüte vor (AVNI et al. 2006), doch ist die Anwendung des Verfahrens im Bereich der Fahrermüdigkeitserfassung (vermutlich nicht ausschließlich aufgrund der dafür notwendigen Unterbrechung der Fahraufgabe) nicht gängig.

Auch die Hautleitfähigkeit (kurz EDA: elektrodermale Aktivität) weist einen Zusammenhang zu anderen Müdigkeitsmessverfahren auf (JÜRGENSOHN 2005). Allerdings ist die EDA nicht spezifisch, sondern reagiert auf eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren (Lärm, Bewegung, Stress, Workload etc.).

Dies beeinträchtigt die Aussagekraft der EDA-Werte gerade bei der Anwendung außerhalb eines kontrollierten Settings erheblich.

Änderungen der zentralnervösen Aktivierung spiegeln sich auch in Veränderungen der Pupille wider. Bei Müdigkeit nehmen der Pupillendurchmesser ab und die Latenz der Kontraktion zu (SIREVAAG; RUSSO et al. 1999). Problematisch ist die hohe Beeinflussbarkeit pupillografischer Indikatoren durch Licht, Beanspruchung oder Langeweile. Eine standardisierte Erfassung pupillografischer Maße in einem von äußeren Störeinflüssen abgeschotteten Setting ermöglicht der Pupillografische Schläfrigkeitstest (PST). Auf dieses Testverfahren wird im folgenden Unterkapitel umfassend eingegangen, da er aus Expertensicht das valideste peripherphysiologische Messverfahren darstellt und im Rahmen der Delphi-Studie (siehe Kapitel 6.3.6) seine Mess- und Testgüte kontrovers diskutiert wurden.

Einen interessanten Forschungsansatz stellt die Erfassung kognitiv-physiologischer Sprachveränderungen (Artikulation, Atmung, Stimm- und Lautbildung) infolge von Müdigkeit dar. Erste Studien sprechen für eine hohe Klassifikationsgüte wacher und müder Probanden von bis zu 86 % (KRAJEWSKI et al. 2009). Die Autoren beschreiben das Verfahren als robust gegen Umgebungsbedingungen wie Feuchtigkeit, Temperatur und Vibrationen bei einer kontaktfreien und nicht intrusiven Messung (KRAJEWSKI et al. 2009). Allerdings zeigte sich, dass die Müdigkeitserkennung durch ein Training der Stimme beeinträchtigt werden kann (BAGNALL et al. 2011). Für eine umfassende Beurteilung ist es verfrüht, doch scheint der gewählten Ansatz vielversprechend.

Zu weiteren müdigkeitsbedingten physiologischen Veränderungen gehören

- - das Absinken der Körperkerntemperatur bei gleichzeitigem Anstieg der peripheren Temperatur (van den HEUVEL et al. 1998),
- - der Anstieg des Melatonin-Levels (LOWDEN et al. 2004),
- - das Absinken des Blutdrucks (MALIK et al. 1996),
- - die Abnahme der Atmungsfrequenz (DUREMAN & BODÉÉN 1972),
- - der Anstieg des Ptyalinpiegels (YAMAGUCHI et al. 2006).

Fazit

In ihrer Validität bleiben peripherphysiologische und endokrinologische Maße größtenteils hinter anderen Messverfahren zurück. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass viele gerade im Feld nicht kontrollierbare Faktoren (Temperatur, Bewegung, Licht, Nahrungsaufnahme, Stress, Beanspruchung etc.) die Messgrößen stark beeinflussen. Bei einigen Messverfahren ist die Erfassung außerhalb eines Laborsettings (z. B. Melatonin, Cortisol, Ptyalin) kaum denkbar. Zumindest gängigere Maße wie z. B. die Herzrate und die Herzratenvariabilität zeigen auch bei den (generell) seltenen Studien im realen Straßenverkehr müdigkeitsbedingte Veränderungen. Auch scheint nach ersten Erkenntnissen durch die Analyse müdigkeitsbedingter Sprachveränderung eine vergleichsweise robuste und nichtinvasive Anwendbarkeit während der Fahrt möglich. Doch liegen zu Letzterem noch zu wenige Erkenntnisse vor, um ein abschließendes Urteil zu fällen. Die hier aufgeführten physiologischen Verfahren können als zusätzliche Indikatoren die Müdigkeitsdetektion durch andere, spezifischere Müdigkeitsmessverfahren ergänzen. Von einer abschließlichen Verwendung peripherphysiologischer Maße ist abzuraten.

Pupillografischer Schläfrigkeitstest (PST)

Der PST erfasst die spontanen Pupillenschwankungen, die infolge der abnehmenden zentralnervösen Aktivierung bei erhöhter Müdigkeit unter Ausschluss von Lichteinfall auftreten. Das Ausmaß der Schwankungen über die bislang noch elfminütige Messzeit wird über das Amplitudenspektrum in Hz und den Pupillenunruheindex (PUI) in mm quantifiziert. Die Messung erfolgt in absoluter Dunkelheit, der Kopf wird mithilfe einer Kinnstütze fixiert, und die Aufgabe des Probanden besteht darin, während der elfminütigen Messung einen leuchtenden Punkt zu fixieren. Entwickelt und vorrangig eingesetzt wurde der PST zur Erfassung der Tagesschläfrigkeit. Er differenziert zwischen gesunden und schlafkranken (Hypersomnikern, Probanden mit hoher Tagesschläfrigkeit) Probanden, wobei Letztere signifikant höhere Werte des Amplitudenspektrums und des PUI aufwiesen (WILHELM et al. 1998b; WILHELM et al. 1998a). Auch Korrelationen zu Selbstbeurteilungsverfahren (ca. $r = .3$) und videobasierten Expertenratings sind belegt (WILHELM 2007; SCHNIEDER et al. 2012).

Es liegen alters- und geschlechtsabhängige Normwerte für 20- bis 60-jährige gesunde Probanden vor. Anhand der vorliegenden Normwerte wurden die PUI-Kenngrößen in „unauffällig“ ($PUI < 6,6$), „kontrollbedürftig“ (84,1-Perzentil mit $6,6 < PUI < 9,8$) und „pathologisch“ (97,7-Perzentil mit $PUI > 9,8$) eingeteilt (WILHELM 2007). Unseres Wissens liegen keine Untersuchungen vor, die die als kontrollbedürftig oder pathologisch bezeichneten PUI-Werte mit einer Beeinträchtigung der Fahrtüchtigkeit in Verbindung bringen konnten.

„Zusätzlich werden moderate Schläfrigkeitststände bereits ab einem KSS-Wert von 5,71 (etwas schläfrig) im PST als kritisch, d. h. pathologisch, bewertet“ berichten (SCHNIEDER et al. 2012). Untersuchungsergebnisse über den Anteil müder Fahrer im Straßenverkehr, die auf dem PST und einer rein verteilungsbasierten Norm beruhen (z. B. zwischen 25 % und 57,1 % müde Fahrer bei WEIL VEGA 2007), sind daher bis zu einem Nachweis des Zusammenhangs von PST-Werten mit Fahrtüchtigkeit nicht aussagekräftig. Die alters- und geschlechtsunabhängigen Normwerte legen eine Generalisierbarkeit der Messwerte über Probanden nahe, die aufgrund „individueller PUI-Reaktionsprofile“ (SCHNIEDER et al. 2012) und zwischen $r = .5$ und $r = -.5$ schwankenden interindividuellen Korrelationen von PUI und Selbstbeurteilungsverfahren (WILHELM 2007) anzuzweifeln ist.

Die Messung ist aufgrund des Ausschlusses störender Umgebungsfaktoren größtenteils robust, auch wenn mitunter Messartefakte auftreten (bei ca. 10 % bei > 300 Probanden der Normwertstudie bei WILHELM 2007). Strittig ist insbesondere die Nichtreaktivität der elfminütigen Messung im Dunkeln. Häufig werden Einschlafereignisse während der Messung berichtet, die auch plausibel als bestehende Müdigkeit (krankheitsbedingte Müdigkeit/Fahrermüdigkeit) interpretiert werden können. Eine Studie jedoch beschreibt bei gesunden und wachen (Ausschlusskriterien: Erkrankungen, nicht erfülltes Schlafesoll) Probanden mehrfache Einschlafereignisse zwischen 8:00 und 15:00 Uhr (STUIBER 2006). Vor einer abschließenden Bewertung des PST gilt es, seine Güte zur Erkennung beeinträchtigter Fahrtüchtigkeit nachzuweisen und insbesondere das Vorliegen bzw. Ausmaß der Reaktivität kritisch zu prüfen.

Im Rahmen der Delphi-Studie wurden die Vor- und Nachteile des PST noch umfassend und teils kon-

trovers diskutiert. Ergebnisse und Fazit werden in Kapitel 6.3.6 aufgeführt.

3.6 Fazit

Zusammenschau der Müdigkeitsmessverfahren

- - Subjektive Messverfahren stellen eine zeit- und kostengünstige Methode zur Müdigkeitserfassung dar. In ihrer Mess- und Testgüte sind sie vielen objektiven Verfahren kaum unterlegen. Unterschätzungen der eigenen Müdigkeit sind insbesondere bei hoher Müdigkeit und bestimmten Motivationslagen (z. B. Fahrtunterbrechung nicht gewünscht) wahrscheinlich. Bei Auslegung von Müdigkeitswarnsystemen im Fahrzeug stellt das subjektive Müdigkeitsurteil aus Fahrersicht die wichtigste Referenz für die (wahrgenommene) Systemfunktionalität dar.
- - Eine Anwendung testperformanzbasierter Verfahren ist trotz valider Müdigkeitsdetektion außerhalb der Forschung und Entwicklung aufgrund der Reaktivität der Messung und der Beeinträchtigung (bzw. Unterbrechung) der Fahraufgabe nicht zu empfehlen. Anders verhält es sich mit der zudem nicht intrusiven Erfassung der Fahrleistung. Die Validität von Parametern des Lenkverhaltens und der Spurhaltung ist belegt, auch wenn die rechtzeitige Erkennung von Müdigkeit angezweifelt wird.
- - Maße der Test- und Fahrperformanz schließen anhand der Müdigkeitsfolgen auf das Vorliegen von Müdigkeit, auch wenn z. B. Alkoholkonsum oder Unaufmerksamkeit ähnliche Beeinträchtigungen hervorrufen. Auch wenn sich im Dienste der Straßenverkehrssicherheit sagen ließe, dass die Detektion jeglicher Fahrleistungsbeeinträchtigung unabhängig von der Ursache zielführend sei, verlangt die Wahl geeigneter Gegenmaßnahmen eine spezifische Erkennung.
- - Die videobasierte Verhaltensbeobachtung bietet eine gute Offlineerfassung der Fahrermüdigkeit von hoher externer Validität. Die Auswertung ist zeitlich aufwändig und verlangt ein hohes Maß an Expertise, insbesondere bei der Erkennung subtiler Anzeichen der Fahrermüdigkeit.
- - Auch wenn peripherphysiologische Verfahren nachweislich müdigkeitsbedingte Veränderungen erfassen, so sind diese Veränderungen eher gering, selten im realen Straßenverkehr

untersucht, nicht müdigkeitsspezifisch und die Messung teils sehr intrusiv oder nicht mit der Fahraufgabe vereinbar.

- - Während überzeugende Belege zur Eignung des Pupillografischen Schläfrigkeitstests (PST) in der schlafmedizinischen Diagnostik vorliegen, sind die Eignung zur Messung von temporären Fahrzuständen und insbesondere die Verbindung zu Fahrleistungsbeeinträchtigungen nicht belegt. In Bezug auf die Ermittlung von Fahrzuständen werden die Reaktivität des Messverfahrens und die Nicht-Vereinbarkeit der Messung mit der Fahraufgabe kritisch gesehen.
- - Die Datenerhebung und insbesondere die Auswertung von EEG-Maßen erfordern ein beträchtliches Maß an Expertise. In den vergangenen Jahren wird die Verwendung von Spindeln statt der klassischen EEG-Frequenzbänder zunehmend gängiger. Neben überzeugenden Validitätsnachweisen weisen sie den Vorteil einer gegenüber den Frequenzbändern deutlich robusteren Erfassung auf, sodass die Anwendung im realen Straßenverkehr (noch zu Forschungszwecken) realistisch erscheint.
- - Zu den etabliertesten und vermutlich validesten Müdigkeitsmaßen gehören die Parameter des Lidschlussverhaltens. Bei einer kamerabasierenden Erfassung (anstelle des EOG) ist eine nur gering intrusive Erfassung der Fahrmüdigkeit während der Fahrt möglich, sofern Störfaktoren (Sonnenbrille, Blickabwendung) ausgeschlossen werden können. Indikatoren der Lidschluss- und Öffnungsgeschwindigkeit werden ungleich seltener berichtet, während sie in der in Kapitel 6.3.4 berichteten Expertenbefragung von hoher Relevanz sind.
- - Nach wie vor fehlt ein Goldstandard der Müdigkeitserfassung. Selbst die nach dem Stand der Forschung validesten Müdigkeitsmessverfahren bieten keine fehlerfreie Müdigkeitsdetektion. Vor allem beginnende Müdigkeit ist schwer zu erkennen.

Methodische Defizite

Eine vergleichende Bewertung der Validität der Messverfahren auf Basis der Literaturüberschau ist mit erheblichen Einschränkungen verbunden. Die Vergleichbarkeit von Studien untereinander ist aus folgenden Gründen nicht oder nur teilweise gegeben:

- - Müdigkeit wird auf unterschiedliche Weise induziert, z. B. über eine hohe Beanspruchung der Fahrer durch fordernde bzw. sehr monotone Fahrbedingungen über längere Zeit (Time on Task) oder durch einen partiellen oder vollständigen Schlafentzug. Das Ausmaß der Beanspruchung und die Dauer des Schlafentzugs variierten beträchtlich von Studie zu Studie.
- - In Abhängigkeit von der Form der Müdigkeitsinduktion unterscheidet sich das Ausmaß der Müdigkeit der Probanden zwischen Studien. Dass leichte Müdigkeit nur unter Unsicherheit, schwere Müdigkeit hingegen hochvalide messbar ist, muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Vergleiche von Extremgruppen können somit außerordentlich hohe Effektivität produzieren.
- - In den Studien werden unterschiedliche Außenkriterien verwendet. Das gängigste darunter mag noch die Selbstbeurteilung der Müdigkeit sein – doch sind die Anzahl und (verbale) Verankerung der Skalenstufen zwischen unterschiedlichen Skalen nicht vergleichbar.
- - Selbst nominell gleich lautende Parameter werden in einer anderen zeitlichen Auflösung erfasst oder unter Verwendung eines anderen Algorithmus ausgewertet.

Bei der überwiegenden Zahl der Studien wird die Müdigkeitserfassung im Labor oder im Fahrsimulator geprüft. Einer Übersicht zufolge wurden 14 von 15 Studien zu müdigkeitsbedingten Veränderungen der Fahrperformanz im Simulator durchgeführt (LIU et al. 2009). Die externe Validität und damit das Ausmaß der Generalisierbarkeit der im kontrollierten Setting erzielten Ergebnisse auf den realen Straßenverkehr sind vergleichsweise selten untersucht. Doch bestehen Zweifel an der Übertragbarkeit von Simulatorergebnissen auf die Real-situation.

4 Übersicht bestehender Müdigkeitsmesssysteme

Müdigkeitsmess- und -warnsysteme, die in der aktuellen Literatur aufgeführt werden, lassen sich nach unterschiedlichen Kriterien einteilen. In diesem Bericht wird die Kategorisierung der Systeme nach den Parametern, anhand derer die Müdigkeit des Fahrers eingeschätzt wird, vorgenommen:

Lenkverhalten, Spurhaltung, gemischte Fahrzeugparameter, kopfbasierte Maße, Aktivität, Körperbewegung, psychomotorische Maße, Fitness-For-Duty-Tests (FFD), Leistung und Reaktionszeit in einer Zweitaufgabe, physiologische Maße wie EEG, EKG und EDA, augenbasierte Maße und Kombinationen verschiedener Parameter. Darüber hinaus umfasst der Bericht eine Bestandsaufnahme bereits implementierter Müdigkeitswarnsysteme, die z. B. von Automobilherstellern optional oder in Serie angeboten werden. Im Folgenden wird jede Kategorie näher erläutert. Eine Einteilung in Systeme, die Müdigkeit erkennen, und solche, die darüber hinaus auch eine Warnung an den Fahrer abgeben, ist in der abschließenden Tabellenübersicht (Tabelle 4, Seite 36) zu finden.

Bedauerlich ist, dass es für einige in verschiedenen Fachartikeln beschriebene Systeme nicht möglich war, die Hersteller ausfindig zu machen bzw. von diesen nähere Angaben zu den Systemen zu erhalten. Aus diesem Grund ist der aktuelle Stand nicht immer nachvollziehbar.

Lenkverhalten

Unter dieser Kategorie werden alle Systeme zusammengefasst, deren Maße sich auf das Lenkverhalten des Fahrers während der Fahrt beziehen. Dies können Abweichungen vom normalen Lenkverhalten sein, wie Lenkruhe oder Lenkkorrekturbewegungen, die durch proprietäre Algorithmen auf Müdigkeitshinweise analysiert werden. Wird ein Hinweis auf Müdigkeit detektiert, so geben die Systeme akustische (Signalton) und/oder visuelle Signale (Anzeigetext, blinkendes Licht) ab; vereinzelt wird auch eine Warnung durch Vibration des Lenkrads eingesetzt. Mögliche Störeinflüsse können laut Literatur die Straßengeometrie oder die Kinematik des Fahrzeugs sein, jedoch gibt es für keines der Systeme nähere Angaben über die Rate an ausgelassenen oder Fehlalarmen. Gemessen wird das Signal meist mithilfe eines Magnetsensors, der sich am oder im Lenkrad befindet.

Vertreter dieser Kategorie, die in der aktuellen Literatur genannt werden, sind: ANN — Artificial Neural Network, entwickelt an der George-Washington-Universität (GWU) in Washington D.C., bislang wurde jedoch kein Prototyp für den Einsatz im Fahrzeug entwickelt (SAYED et al. 2001; ESKANDARIAN & SAYED, 2005; zitiert nach BARR et al. 2009), SAMG-3Steer, hergestellt von der britischen Firma Electronic Safety Products,

Inc. (KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007), TravAlert[®] hergestellt von der US-amerikanischen Firma TravAlert Safety International (HARTLEY et al. 2000; KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007), ZzzzAlert Driver Fatigue Warning System von der US-amerikanischen Firma DrivAlert Systems, Inc. (HARTLEY, 2000) und Steering Attention Monitor (S.A.M., Hersteller unbekannt; HARTLEY et al. 2000), das im Vereinigten Königreich in mehreren Lkw-Unternehmen zu Testzwecken eingesetzt wurde.

Spurhaltung

Selten vertreten sind Systeme die sich ausschließlich der Spurhaltung bzw. -abweichung zur Erfassung von Müdigkeit bedienen. Sie können nicht immer von reinen Spurhalteassistenten unterschieden werden, deren primäres Ziel nicht darin liegt, den Fahrer vor möglichem Sekundenschlaf zu warnen. Dennoch sind in der aktuellen Fachliteratur drei Müdigkeitswarnsysteme in dieser Rubrik zu finden: HaulCheck von der australischen Firma AcuMine, die sich primär mit Sicherheitsfragen in der Bergbauindustrie beschäftigt (EDWARDS et al. 2007; GOLZ et al. 2010), Lane Departure Warning Systems der US-amerikanischen Firma Iteris Inc. (EDWARDS et al. 2007; GOLZ et al. 2010) und Vision/Radar Sensor der israelischen Firma Mobileye NV (EDWARDS et al. 2007; GOLZ et al. 2010). Nähere Angaben zum erhobenen Maß, der weiteren Funktionsweise der Systeme oder ihrer Zuverlässigkeit liegen nicht vor.

Gemischte Fahrzeugparameter

Diese Kategorie fasst alle Systeme zusammen, die unterschiedliche Parameter des Fahrzeugs in Kombination miteinander berücksichtigen, um Müdigkeit beim Fahrer zu detektieren. In die Messung mit einbezogen werden bereits genannte Maße wie Spurabweichung oder Lenkverhalten ebenso wie Beschleunigung, Geschwindigkeit, Bremsen, Gangwechsel, die Entfernung zu anderen Fahrzeugen, die Position innerhalb der Spur, die Straßengeometrie oder Fahrzeit (Time on Task). Der aktuellen Literatur zufolge gibt es für diese Kategorie drei Vertreter, die sich jedoch nach einer eingehenderen Überprüfung als nicht weiter verfolgte Ansätze oder als nicht zur Müdigkeitserfassung geeignet entpuppt haben. Der Vollständigkeit halber werden sie dennoch aufgelistet:

Stay-A-Wake, das 1980 von der Reli Corporation of Markle in den USA entwickelt wurde, jedoch schon seit einigen Jahren brachzuliegen scheint. Aktuelle Angaben der amtlichen Zulassungsbehörde in den USA lauten „cancelled section 8“. Dies bedeutet, dass der Patentschutz nicht verlängert wurde und sich das System zumindest in dieser Form nicht mehr im Handel befindet. Das System „DAS 2000 Road Alert System“ wurde vom Accident Research Centre an der Monash University in Melbourne entwickelt (HARTLEY et al. 2000; KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007), jedoch ursprünglich nicht zur Messung von Müdigkeit empfohlen (HARTLEY et al. 2000). Ebenso genannt wird das System Safety Driver Advisor, in den 1980er Jahren entwickelt von der Nissan Motor Corporation (DINGUS et al. 1987). Jedoch sind auch hier bis auf die Nennung in diversen Artikeln (KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007) keine näheren Informationen zum aktuellen Stand, der Funktionsweise oder Zuverlässigkeit des Systems zu finden.

Kopfbasierte Maße

Diese Kategorie beinhaltet Systeme, die basierend auf der Kopfposition und -bewegung des Fahrers dessen Müdigkeit einzuschätzen versuchen. Insbesondere die Kopfbewegung nach vorne (Kopfnicken) oder hinten ist hierbei von Interesse.

Advance Safety Concepts Proximity Array Sensing System, Sleep Control Helmet System und Nap Zapper sind Systeme, die anhand der Kopfposition (Kopfnicken) die Müdigkeit des Fahrers erkennen sollen (DINGES et al. 1998; HARTLEY et al. 2000; EDWARDS et al. 2007; GOLZ et al. 2010). Jedoch liegen weder zur Messausrüstung noch zum erhobenen Signal oder dessen Auswertung veröffentlichte Daten vor.

Dozer's Alarm, No-NAP und Travelmate sind weitere Systeme, die die Müdigkeit des Fahrers anhand seiner Kopfposition erfassen sollen (HARTLEY et al. 2000; MAY & BALDWIN 2009). Von ihnen wird berichtet, dass sie bei einem fortgeschrittenen Müdigkeitsstadium des Fahrers ein akustisches oder ein vibrierendes Warnsignal abgeben.

Driver Alert Warning Device, Doze Alert und Stay Alert sind Systeme, die allesamt von WRIGHT et al. (2007) als Müdigkeitsmess- und -warnsysteme ausgeschlossen wurden, da sie ihre akustischen oder vibrierenden Warnsignale erst nach Schlaf eintritt abgeben. Gemessen wird entweder mithilfe

eines Sensors am Ohr des Fahrers oder eines um den Hals gelegenen Bandes. Sobald der Fahrer eingeschlafen ist und sein Kopf nach vorne sinkt, schließt eine Kappe an seinem Kinn einen Stromkreis, wodurch das Warnsignal ausgelöst wird.

Proximity Array Sensing System (PASS) und Micro-Nod Detection System (MINDS™) Drowsiness Detection System sind Systeme der US-amerikanischen Firma Advanced Safety Concepts Inc. (HARTLEY et al. 2000; HEITMANN et al. 2001; KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007; GOLZ et al. 2010). Sie ermitteln mithilfe von Sensoren in der Dachinnenverkleidung des Wagens die Kopfbewegungen und -position des Fahrers, um seinen Müdigkeitsgrad einzuschätzen. PASS wurde von WRIGHT et al. (2007) ebenfalls als Müdigkeitswarnsystem ausgeschlossen, da eine Warnung erst nach Schlaf eintritt erfolgt. Zu welchem Zeitpunkt MINDS™ eine Warnung abgibt, ist der aktuellen Literatur nicht zu entnehmen. Jedoch wird berichtet, dass es Mikroschlafereignisse, die sich ohne ein Nicken des Kopfes nach vorne ereignen, nicht erkennt – ein Problem, was vermutlich auf mehrere Vertreter dieser Kategorie zutrifft.

Aktivität und Körperbewegung

In die Kategorie aktivitätsbasierte Systeme fallen solche, die den Zustand des Fahrers anhand seiner körperlichen Aktivität oder anderer Verhaltensmaße einzuschätzen versuchen. Eine Unterscheidung verschiedener Stadien von Müdigkeit ist bei den in der aktuellen Literatur vermerkten Systemen nicht möglich, sondern lediglich eine Unterscheidung zwischen Wachsein und Schlaf.

Das Sleep Management System der US Army und seine kommerziell verfügbare Version SleepWatch sind Armbanduhren mit integriertem Accelerometer, das anhand der Aktivität und Inaktivität des Handgelenks die Schlafzeiten des Trägers identifiziert (WRIGHT et al. 2007; GOLZ et al. 2010). Je nach Modell gibt es ein visuelles bzw. akustisches kontinuierliches Feedback ohne Alarmfunktion. In diesem Fall ist ebenfalls fraglich, ob das System als Müdigkeitsmesssystem einzustufen ist.

In die Kategorie körperbewegungsbezogener Systeme fällt ebenfalls ein einziges System: Sensor Foil (SEFO) wurde im EU-Projekt SENSATION in Zusammenarbeit mit SIEMENS VDO Automotive entwickelt (BARR et al. 2009). Eine Sensormatrix mit 64 Zellen misst die räumliche Verteilung des

Drucks auf dem Fahrersitz, um den Müdigkeitsstatus des Fahrers zu klassifizieren. Eine hohe Quote an korrekten Müdigkeitsurteilen wird berichtet. Allerdings liegen auch hier keine genaueren Angaben vor, welche Müdigkeitsstufen voneinander unterschieden werden können, wann eine Warnung eintritt oder wie dieses System validiert wurde.

Psychomotorik, Reaktionszeit und Fitness-For-Duty (FFD)

Hier handelt sich nicht um Systeme, die online den Zustand des Fahrers auswerten, sondern vor Antritt der Fahrt eine Einschätzung des Fahrerzustands erlauben. Sie werden häufig im Arbeitskontext eingesetzt. Meist handelt es sich um Testbatterien, die aus mehreren Einzeltests bestehen. Erhobene Maße können Hand-Auge-Koordination, visuelle Wahrnehmung, Reaktionszeiten, Konzentration, kognitive Verarbeitung, geteilte Aufmerksamkeit, verschiedene okulomotorische Maße und auch die Persönlichkeit des Fahrers sein. In der aktuellen Literatur sind einige Systeme dieser Art beschrieben. Allerdings sind auch hier nicht zu jedem zitierten System umfangreiche aussagekräftige Informationen erhältlich.

ART90 ist eine Testbatterie von acht bis zehn Tests zur visuellen Wahrnehmung, Reaktionszeit, Konzentration, kognitiven Verarbeitung und Persönlichkeit und soll 66 % der Fahrfehler und 68 % spezifischer Fahrfehler vorhersagen (CHARLTON & ASHTON, 1998; zitiert nach HARTLEY et al. 2000). Inwiefern diese Fehler alle müdigkeitsbedingt sind, ist nicht transparent dokumentiert. FACTOR 1000 und OSPAT (Occupational Safety Performance Assessment Technology) sind weitere Fitness-For-Duty-Tests, die anhand der Hand-Auge-Koordination den Müdigkeitsgrad des Fahrers vor Fahrtantritt einzuschätzen versuchen. Die Prädiktionsgüte dieser Verfahren wird als gering eingeschätzt (HARTLEY et al. 2000).

FIT® 2000 Workplace Safety Screener bzw. FIT 2000-3 ist ein 30-sekündiger Sehtest zur Bestimmung von vier okulomotorischen Maßen: Pupillendurchmesser, Latenz & Amplitude der Pupillenkontraktion und Sakkadengeschwindigkeit, hergestellt in den USA von PMI Inc. (HARTLEY et al. 2000). Bezüglich der prädiktiven Validität wird berichtet, dass nur 40 % der Fahrer nach 48 Stunden Schlafentzug als hochrisikogefährdet identifiziert wurden. EyeCheck, hergestellt in den USA von MCJ Inc., ist ebenfalls ein Pupillometer, das anhand der Pupil-

lenreaktion des Fahrers seine Fahrtüchtigkeit einschätzt.

Fatigue Warning System ist ein System zur Erhebung der mentalen Reaktionszeit und wird in den USA von Muirhead/Remote Control Technologies vertrieben (EDWARDS et al. 2007; GOLZ et al. 2010). Es bietet dem Fahrer während der Fahrt visuelle Reize, auf die eine Reaktion verlangt wird. Bleibt diese aus, ertönt ein akustisches Signal, bis der Fahrer entsprechend reagiert. Als weiteres System dieser Art wird Voice Commander Driver Alert genannt (EDWARDS et al. 2007; GOLZ et al. 2010). Der aktuelle Stand ist jedoch nicht nachvollziehbar, die Internetseite der zitierten Herstellerfirma International Mining Technologies Pty, Ltd. ist nicht abrufbar. Daher ist davon auszugehen, dass auch dieses System zumindest in dieser Form nicht mehr am Markt erhältlich ist.

Truck Operator Proficiency System ist ein in den USA bereits seit 1992 in Betrieb genommener psychomotorischer Test zur geteilten Aufmerksamkeit in Form eines fest installierten Fahrsimulators (STEIN et al. 1990; CHARLTON & ASHTON, 1998; CHARLTON & BAAS, 1998; zitiert nach HARTLEY et al. 2000). Eine erfolgreiche Validierung wird berichtet, jedoch liegen auch hierzu keine näheren Angaben vor.

Der Psychomotor Vigilance Test (PVT) ist ein in den USA entwickeltes Verfahren, das anhand einer zehnminütigen visuellen Reaktionsaufgabe die Müdigkeit des Fahrers vor Fahrtbeginn einschätzt. (DINGES et al. 1998; HARTLEY et al. 2000). Gemessen wird die Reaktionszeit des Fahrers auf visuelle Stimuli bei variierenden Inter-Stimulus-Intervallen (ISI) mithilfe eines PCs, Laptops oder Handhelds. Der PVT wird zur Validierung unterschiedlicher Müdigkeits-Detektionstechnologien und als Fitness-For-Duty-Test angewendet (HARTLEY et al. 2000).

Zweitaufgabe

Die in der aktuellen Literatur auffindbaren Systeme, die die Müdigkeit des Fahrers anhand seiner Leistung in einer Zweitaufgabe während der Fahrt einzuschätzen versuchen, haben alle gemeinsam, dass sie nicht für die Verwendung im Straßenverkehr entwickelt wurden, sondern für Lastkraftfahrer im Tagebau. Im Vordergrund steht auch hier die Messung vor Arbeitsbeginn zur Überprüfung der „Fitness“ des Fahrers.

APRB/ACARP Device for Monitoring Haul Truck Operator Alertness und dessen Nachfolger FMD — Fatigue Monitoring Device sind von der australischen Firma ARRB Transport Research Ltd. entwickelte FFD-Systeme, die die Reaktionszeiten auf eine akustische und eine visuelle Aufgabe auswerten (MABBOTT 2003; WRIGHT et al. 2007; GOLZ et al. 2010). Bei einer verzögerten Reaktionszeit wird ein Signal sowohl an den Fahrer als auch an die Schichtleitung in der Basisstation abgegeben. Genauere Angaben zu Aufgaben und Auswertung sind nicht veröffentlicht.

Alertomatic und Roadguard sind ebenfalls für den Tagebau entwickelte Systeme (HAWORTH & VULCAN 1991; MABBOTT et al. 1999), die eine Reaktion auf einen visuellen Stimulus erfordern. Ist die Reaktion verzögert, erscheint ein akustisch dargebotener Stimulus, auf den ebenfalls reagiert werden muss. Bleibt diese Reaktion aus, wird die Zündung des Fahrgeräts abgestellt. Da die Zweitauflage insgesamt mit der eigentlichen Aufgabe der Fahrzeugführung interferiert, kann es insbesondere in Situationen mit hohem Workload ebenfalls zu einem Ausbleiben der Reaktion kommen. Hierbei ist das System nicht in der Lage, diese Szenarien voneinander zu unterscheiden. Dies kann zur Folge haben, dass der Anteil falscher Alarme ansteigt, allerdings würden laut Hersteller auch die meisten Müdigkeitsereignisse korrekt identifiziert. Konkrete Zahlen hierzu oder zur weiteren Funktionsweise des Systems sind nicht veröffentlicht.

Physiologie: EEG, EKG und EDA

EEG-basierte Systeme zur Erfassung von Müdigkeit finden ihren Einsatz aktuell ausschließlich im Bereich Forschung und Entwicklung. Auch wenn es bereits Ansätze gibt, das Ausmaß an Intrusivität gering zu halten (weniger Elektroden, trockene Elektroden, spezielle Kappen), so bleibt diese Kategorie für den Gebrauch im Alltag bislang außen vor.

Das kalifornische System ABM Drowsiness Monitoring Device (DMD), ausgestattet mit einer Einwegmütze mit Elektroden, warnt durch ein akustisches Signal, sobald Anzeichen für Müdigkeit beim Fahrer erkannt werden. Genauere Angaben zum verwendeten Maß und seiner Auswertung liegen jedoch nicht vor.

Mind Switch wird im Übersichtsartikel von HARTLEY et al. (2000) ebenfalls als EEG-basiertes Müdigkeitsmesssystem aufgezählt, jedoch handelt

es sich hierbei laut Angaben des Herstellers ursprünglich um ein Hilfsmittel für querschnittsgelähmte Menschen, um mithilfe ihrer Hirnaktivität Geräte in der näheren Umgebung zu steuern. Erst SCULLION (1998) brachte die Idee auf, Mind Switch zur Erfassung von Müdigkeit zu verwenden (zitiert nach HARTLEY et al. 2000).

Darüber hinaus werden in der aktuellen Literatur ein Prototyp, entwickelt von der University of Technology in Sydney (AGBINYA et al. 2009), und ein weiteres System ohne Namen (TSAI et al. 2009) als nicht-invasive EEG-basierte Systeme zur Erfassung von Müdigkeit genannt. Leider sind auch in diesen Fällen keine näheren Informationen zu Messausrüstung, erhobenem Maß und seiner Auswertung veröffentlicht.

YU (2009) berichtet von einem EKG-basierten System, das anhand der Herzfrequenz und Herzratenvariabilität des Fahrers Müdigkeit erkennen und durch einen Warnton darauf hinweisen soll. In der überarbeiteten Version sei es möglich, das Signal durch piezoelektronische Sensoren am Lenkrad zu erfassen – auch beim einhändigen Fahren. Bestimmt werde das Verhältnis von hochfrequenter zu niedrigfrequenter Herzaktivität. Berichtet wurde eine Rate von 6,6 % sowohl für falsche als auch für ausgelassene Alarme. Allerdings wurde das System bislang nur im Simulator getestet. Ergebnisse zum realen Straßenverkehr liegen aktuell noch nicht vor. Weitere Forschung an und mit dem System wurde jedoch angekündigt (YU 2009).

Engine Driver Vigilance Telemetric Control System 3rd Generation (EDVTCS), hergestellt vom luxemburgischen Hersteller J-S Co. Neurocom, misst die elektrodermale Aktivität bzw. elektrodermale Reaktionen des Fahrers. Anwendung findet es laut aktueller Literatur bei der russischen Eisenbahn. Das System gibt ein akustisches Signal ab, wenn Hinweise für Müdigkeit gefunden wurden. Bei ausbleibender Reaktion des Fahrers wird der Zug ausgebremst. Das Signal kann jedoch durch Stress, Emotionen und Schwitzen verfälscht werden (KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007; EDWARDS et al. 2007; GOLZ et al. 2010).

NovAlert vom israelischen Hersteller Atlas Researches Ltd. soll den Zustand des Fahrers anhand seines Muskeltonus, erfasst über ein Armband, bestimmen. Angeblich ist es in der Lage, bereits frühe Anzeichen von Müdigkeit zu erkennen und den Fahrer mithilfe eines Vibrationsalarms zu warnen (HARTLEY et al. 2000; GOLZ et al. 2010).

Zur genauen Funktionsweise oder der Validierung des Systems liegen leider keine veröffentlichten Daten vor.

Augenbasierte Maße

Diese Kategorie von Müdigkeitsmess- und -warnsystemen stellt die umfangreichste und vielfältigste aller Kategorien dar. Aufgrund der Vielfalt an möglichen Maßen und deren Kombinationsmöglichkeiten ist eine weitere Unterteilung sinnvoll in Systeme, die sich ausschließlich an lidschlussbasierten Maßen oder an Blickbewegungsmaßen orientieren, sowie Mischformen.

Lidschlussbasierte Systeme

PERCLOS (percentage of eye closure) ist eine Methode zur Bestimmung von Schläfrigkeit, die von WIERWILLE et al. (1994) am Carnegie Mellon Research Institute in Pittsburgh entwickelt wurde. Eine Kamera erfasst die Dauer der Lidschlüsse und berechnet den prozentualen Anteil geschlossener Augen über ein festgelegtes Zeitintervall. Vermarktet wird diese Methode durch die US-amerikanische Firma Attention Technologies über das System Co-Pilot, das 2001 von GRACE & STEWART (2002) auf PERCLOS basierend entwickelt wurde (KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007). Co-Pilot ist laut Herstellerangaben in der Lage, verschiedene Müdigkeitsstadien voneinander zu unterscheiden, und warnt den Fahrer sowohl akustisch als auch visuell, wenn ein kritisches Stadium erreicht ist. Bisher ist das System ausschließlich bei Nachtfahrten anwendbar, Tageslicht stellt eine Störquelle bei der Signalerfassung dar. Der letzte bekannte Stand der Entwicklung ist, dass sich um eine Weiterentwicklung des Systems bemüht wird, um eine Detektion bei Tageslichtbedingungen zu ermöglichen. Darüber hinaus wird das System umfassend im Simulator und im Feld evaluiert, um eine Kommerzialisierung voranzutreiben (KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007). Ein weiteres auf PERCLOS basierendes System ist der ebenfalls von Attention Technologies entwickelte DD850 Driver Fatigue Monitor (DFM), der aktueller Literatur zufolge in einem umfassenden Feldtest validiert werden soll (LIU et al. 2002; zitiert nach BARR et al. 2009; EDWARDS et al. 2007; GOLZ et al. 2010; DONG et al. 2011).

MTI AM eye ist ein zu Forschungszwecken eingesetztes System, das sich ebenfalls des Lidschlusses bzw. des Verhältnisses von geschlossenen zu

geöffneten Augen über einen festen Zeitraum bedient. Ein expliziter Verweis auf PERCLOS wird jedoch nicht gemacht, und nähere Informationen zur Auswertung der Signale und der weiteren Funktionsweise des Systems sind nicht veröffentlicht. Leider ist der Hersteller nicht eindeutig zu identifizieren. Laut WRIGHT (2007) handelt es sich um ein System der Firma MTI Research Inc., laut KECKLUND et al. (2006) ist der Hersteller die US-amerikanische Firma IM Systems. Weitere Recherchen brachten diesbezüglich keine Klärung. Allerdings wird in diesen und weiteren Artikeln ein anderes, zu Forschungszwecken eingesetztes System der Firma IM Systems genannt: IM Blinkometer. Ausgestattet mit einer speziellen Brille und piezoelektronischen Haftstreifen am Augenwinkel, erfasst es ebenfalls das Lidschlussverhalten des Fahrers (DINGES et al. 1998; HARTLEY et al. 2000; KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007).

Photo Driven Alert System wird in der Literatur als ein System in der Entwicklungsphase genannt, das mit einer speziellen Messvorrichtung am Ohr des Fahrers die Lidschluss- bzw. Blinzelrate des Fahrers ermittelt und anhand dessen seinen Müdigkeitsgrad einschätzt (WHITLOCK 2002; WRIGHT et al. 2007). Leider liegen keine näheren Informationen zur genauen Funktionsweise vor.

Onguard, ursprünglich hergestellt von der israelischen Firma Xanadu, wird vielfach als weiteres System genannt, das anhand des Lidschlussverhaltens den Müdigkeitszustand des Fahrers messen soll (HARTLEY et al. 2000; KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007). Allerdings ist die Herstellerfirma seit Beginn der 1990er Jahre bankrott (BROOKHUIS et al. 1998), und über den weiteren Verbleib der Patentrechte liegen keine Informationen vor.

Darüber hinaus werden drei Systeme genannt, die von den Automobilherstellern Renault (Systemname unbekannt), Mitsubishi (Driving Monitor System) und Toyota (Toyota Driver Drowsiness Detection and Warning System) entwickelt wurden und sich ebenfalls des Lidschlusses bedienen (KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007). Leider ist es auch hier nicht möglich, nähere Informationen zur Funktionsweise oder dem aktuellen Stand der Systeme zu erlangen.

ETS-PCII, hergestellt und vertrieben von der US-amerikanischen Firma Applied Science

Laboratories (ASL), wird in der Literatur als System genannt, das mithilfe einer PC-verbundenen Kamera das Lidschlussverhalten des Fahrers ermittelt (WRIGHT et al. 2007; BARR et al. 2009). Es ist unklar, ob es sich dabei um ein komplettes System zur Erfassung von Müdigkeit handelt oder um einen reinen Eyetracker. Eher zutreffend erscheint Letzteres, da ASL auf die Herstellung von Eyetracking-Lösungen spezialisiert und auch auf der Internetseite des Herstellers kein Hinweis auf ein Müdigkeitswarnsystem auffindbar ist. Die gleiche Problematik trat auch in Verbindung mit anderen Systemen auf, die in der Literatur als blickbewegungs-basierte Müdigkeitsmesssysteme aufgelistet werden.

Blickbewegungs-basierte Systeme

Eyeputer ist ein von der französischen Firma Electronica Technologies entwickeltes System, das laut WRIGHT et al. (2007) von einigen Einrichtungen wie der NASA, der European Space Agency (ESA), dem Centre National d'Études Spatiales (CNES), dem Centre national de la recherche scientifique (CNRS) und von Renault zu Forschungszwecken eingesetzt wird. Es wird berichtet, dass Eyeputer mithilfe der Blickbewegungen den Müdigkeitszustand des Fahrers bestimmt. Allerdings liegen auch in diesem Fall keine näheren Informationen vor.

Expresseye wird von WRIGHT et al. (2007) als System aufgeführt, das sich Fixationen, der Blickkontrolle und Sakkaden sowie der horizontalen Position der Augen bedient (die vertikale Positionsbestimmung sei noch in Entwicklung). Es handelt sich hierbei laut Herstellerangaben auf der Internetseite um ein reines Eyetracking-System, ohne speziellen Algorithmus zur Auswertung der Signale, um Müdigkeit zu detektieren.

Ein ähnliches Problem stellt sich bei dem von KECKLUND et al. (2006) genannten System Blink Monitor dar. Als Messmethode wird Eyetracking aufgeführt, ohne nähere Angaben zu den genau erhobenen und ausgewerteten Maßen zu machen. Auch auf der Seite der Bristol University, die als an der Entwicklung beteiligt genannt wird, sind keine Hinweise zum System zu finden.

Mischformen

Alert Driver, hergestellt von der US-amerikanischen Firma Future Technology and Health, ist ein bislang noch nicht kommerziell erhältliches System

(KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007). Erhoben werden mithilfe einer Kamera am Armaturenbrett der Grad der Pupillenverdeckung durch das Augenlid, der Lidschluss und die Blickbewegungen des Fahrers. Sind die Augen länger als 1,5 Sekunden geschlossen, ertönt ein akustisches Warnsignal, das erst deaktiviert wird, sobald der Fahrer die Augen wieder öffnet. Alternativ kann vorab eine feste Alarmdauer eingestellt werden. Nähere Angaben zur Validierung des Verfahrens sind nicht veröffentlicht.

Eyegaze Analysis System und seine Nachfolgemodelle Binocular Eyegaze Analysis System und Eyegaze Analysis EyeFollower 2.0 wurden von der US-amerikanischen Firma LC Technologies entwickelt und werden weltweit kommerziell vertrieben. Ein zugehöriges Software-Tool, Edge Analysis System, ist ebenfalls erhältlich, darüber hinaus werden Schulungen vor Nutzungsbeginn angeboten. Erhoben und ausgewertet werden der prozentuale Lidschluss, Blickrichtung, Pupillendurchmesser, Blinzeln und Fixationen. Eingesetzt werden sie hauptsächlich in Forschung und Entwicklung. Es handelt sich hierbei um ein System aus mehreren Komponenten, das PC-basiert mithilfe einer Kamera und einer Infrarotquelle die Signale verarbeitet. Die Abtastrate liegt zwischen 60 und 120 Hz, was eine kontinuierliche Erfassung ermöglicht. Angaben zur Validierung des Systems sind leider nicht veröffentlicht. Es wird berichtet, dass es möglich sei, Mikroschlaf zehn Sekunden vor dem Ereignis vorherzusagen. Angaben zu Fehlerraten und Auslassungen werden nicht gemacht. Die Nutzung ist laut Hersteller für 90 % aller Brillen- und Kontaktlinsträger möglich, lediglich stark reflektierende Sonnenbrillen stellen eine Störquelle dar.

Das an der Mayo Clinic in den USA entwickelte System Mayo Pupillometry System stammt ursprünglich aus der klinischen Forschung zu Narkolepsie und wurde erst später dafür verwendet, Mikroschlafereignisse vorherzusagen (HEITMANN et al. 2001). Ausgewertet werden rhythmische Pupillenbewegungen (Erweiterung und Zusammenziehen), Pupillenverengungen und die Blinzelfrequenz.

Optalert™ vom australischen Hersteller Sleep Diagnostics Pty. Ltd. stellt das wohl am besten dokumentierte System innerhalb dieser Kategorie dar (z. B. KECKLUND et al. 2006; JOHNS et al. 2008; BARR et al. 2009; GOLZ et al. 2010; AHLSTRÖM et al. 2010). Das verwendete Maß ist die Johns Drowsiness Scale (JDS), welche wieder-

rum aus verschiedenen augenbasierten Maßen abgeleitet wurde: das Verhältnis zwischen Amplitude und Geschwindigkeit des Lidschlusses, die Öffnungsgeschwindigkeit des Augenlids, Sakkaden, Sakkadengeschwindigkeit, Blickbewegungen und ausbleibende Blickwechsel – Maße, die sich mit zunehmender Fahrdauer verändern. Die Skala erlaubt eine Einstufung des Fahrerzustands in Stufen von 0 (very alert) bis 10 (very drowsy), und für ihre Werte wurde eine signifikante Korrelation mit der Karolinska Sleepiness Scale (KSS) gefunden (AHLSTRÖM et al., 2010). Die Signalerhebung und -auswertung erfolgen minütlich in Echtzeit mithilfe einer Brille inklusive Infrarotquelle und Phototransistor, die über ein Kabel mit der restlichen Hardware verbunden ist. Störquellen werden bisher nur wenige berichtet: Die Umgebungshelligkeit stellt beispielsweise kein Problem dar, da sie vom System mit erfasst und herausgerechnet wird. Lediglich zu lange Wimpern, die gegen die Brille stoßen könnten, oder deviantes Blinzelnverhalten konnten bisher als mögliche Störquellen identifiziert werden (AHLSTRÖM et al. 2010). Angewendet wird das System aktuell in Versuchsläufen in Australien, Asien und Europa.

SafetyScopeTM vom US-amerikanischen Hersteller AcuNetx Inc., ehemals Eye Dynamics Inc., ist ein weiteres System, das anhand des Pupillendurchmessers und von Blickbewegungsdaten die Müdigkeit des Fahrers einzuschätzen versucht (HEITMANN et al. 2001; WRIGHT et al. 2007). Es ist kommerziell verfügbar, allerdings liegen keine weiteren Daten zur Funktionsweise des Systems vor.

Kombinationen verschiedener Parameter

Unter diese Kategorie fallen all jene Systeme, die die Müdigkeit des Fahrers anhand einer Kombination mehrerer verschiedener Parameter während der Fahrt einzuschätzen versuchen. Dies bezieht sich nicht auf die oben berichtete Kombination verschiedener Fahrzeugparameter, sondern auf mögliche Kombinationen von Maßen aller genannten Kategorien.

Advisory System for Tired Drivers (ASTiD) wurde am Loughborough Sleep Research Centre der University of Loughborough in England entwickelt und wird über das in Kooperation stehende Unternehmen Fatigue Management International (FMI) vertrieben. ASTiD schätzt die Müdigkeit des Fahrers auf Basis eines mathematischen Modells ein, das die Tageszeit, die bisherige Fahrzeit, die

Schlafqualität und -quantität innerhalb der letzten 24 Stunden mit dem Lenkverhalten, insbesondere Lenkkorrekturbewegungen, des Fahrers kombiniert. Eine Übereinstimmung zur subjektiven Einschätzung der Müdigkeit wird berichtet. (KOH et al. 2007; EDWARDS et al. 2007). Es besteht die Möglichkeit, das System um die Funktionseinheit DISPATCH[®] zu erweitern, sodass das Signal nicht nur im Fahrzeug gespeichert, sondern auch in Echtzeit zu Überwachungszwecken an eine Basisstation übermittelt werden kann. Laut Herstellerangaben wurde ASTiD bisher erfolgreich sowohl im Autobahn- als auch im Bergwerkbetrieb getestet und von einem großen europäischen Logistikunternehmen in seinen Lastkraftfahrzeugen installiert.

Alertness Monitor ist ein in den USA von der MTI Research Corporation hergestelltes System, das mithilfe eines Kopfbandes Augen- und Kopfbewegungen sowie Blinzeln des Fahrers erfasst (DINGES et al. 1998; HARTLEY et al. 2000; KECKLUND et al. 2006). Anti Sleep ist ein schwedisches System der Firma Smart Eye AB, das Blickbewegungen, Lidschluss, Blinzelnrate und Kopfposition des Fahrers auswertet, um seine Müdigkeit zu bestimmen (KECKLUND et al. 2006; GOLZ et al. 2010). DMS ist ein Produkt des französischen Unternehmens Continental Automotive France (CAF), das mit der Auswertung von Blickbewegungen, Lidschlussgeschwindigkeit, Lidöffnungsgeschwindigkeit und Kopfposition arbeitet. Erhoben werden die Signale mithilfe einer im Fahrzeug installierten Kamera (RAUCH et al. 2009). EyeHead, vom US-amerikanischen Hersteller Applied Science Laboratories, erfasst Augenposition, Blickbewegungen, Fixationsmaße, Kopfposition und Kopfbewegung, um die Müdigkeit des Fahrers einzuschätzen (KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007). SafeTrac, hergestellt von Assist Ware Technologies, kombiniert Spurhaltung, Lenkverhalten und Lidschlussmaße (KECKLUND et al. 2006; EDWARDS et al. 2007; GOLZ et al. 2010). Nähere Angaben zur Validierung, Funktionsweise und aktuellem Stand dieser Systeme sind leider nicht veröffentlicht.

Im Rahmen des EU-Projekts AWAKE: System for effective assessment of driver vigilance and warning according to traffic risk estimation (IST-2000-28062), ausgeführt durch Daimler und Siemens, wurde ein System entwickelt, das sich 2004 noch in der Pilotphase befand (BEKIARIS 2004). Über den aktuellen Stand des Systems ist bislang nichts veröffentlicht. Dem System zugrunde

liegt eine Vielzahl von erhobenen Maßen: Lidschluss, Blickrichtung, Spurhaltung, Lenkradwinkel, Veränderungen in der Haltungsspannung der Hände am Lenkrad, Gas- und Bremspedalnutzung. Die Signale werden abgestimmt mit Daten zum Verkehrsrisiko: Position des Fahrzeugs, Antikollisionsradar und Wegstreckenzähler. Das System ist in der Lage, drei Stufen voneinander zu unterscheiden, wovon zwei Müdigkeitslevel sind: Stufe 1 = grün = alert, Stufe 2 = gelb = drowsy, Stufe 3 = rot = sleepy. Konkrete Angaben zu Trefferquote, Fehlalarmen und Auslassungen gibt es nicht, jedoch wurde eine Fehlalarmquote unter 1 % angestrebt.

Driver State Monitor (DSM) mit ForeWarn Drowsy Driver Alert vom US-amerikanischen Hersteller Delphi Electronics and Safety kombiniert Lidschlussmaße (unter anderem PERCLOS) mit der Kopfposition des Fahrers (EDWARDS et al. 2007; BARR et al. 2009; DONG et al. 2011). Ein verstellbares Gerät mit Kamera und Infrarotquelle wird am Armaturenbrett vor dem Fahrer installiert und ist mit geringem Kalibrierungsaufwand an unterschiedliche Fahrer anzupassen. Beeinträchtigungen durch Sonnenlicht oder Brillengläser sollen nicht auftreten, lediglich manche Sonnenbrillen können eine Störquelle darstellen. Wird der Fahrer als müde eingestuft, ertönt ein akustisches Signal, welches verstärkt wird bei Lidschlüssen, die länger als 2,5 Sekunden andauern. Angaben zu Fehlalarmen und Auslassungen sind nicht veröffentlicht.

Ein weiteres System der australischen Firma Seeing Machines ist Driver State Sensor 3.0 (DSS). Es kombiniert ebenfalls die Augenlidaktivität (PERCLOS, Lidöffnungsgeschwindigkeit) mit der Kopfposition des Fahrers (FRIEDRICHS & YANG 2010; DONG et al. 2011). Die Signale werden laut Hersteller mithilfe einer Kamera mit zwei Infrarotquellen, einer Rechen- und einer Kommunikationseinheit in Echtzeit erfasst und ausgewertet. Letztere kann das Signal zusätzlich an eine Basisstation senden, wodurch ein Einsatz im Management eines Fuhrparks möglich ist. Jedes Ereignis wird lokal gespeichert und steht somit auch zur späteren Auswertung zur Verfügung. Der Hersteller berichtet zudem, dass DSS bereits von einigen größeren privaten Fuhrunternehmen sowohl im Stadtverkehr als auch auf Langstrecken eingesetzt wird.

Im Applied Physics Lab der John Hopkins University in Baltimore wurde das Drowsy Driver Detection System (DDDS) entwickelt und zum Patent angemeldet (KECKLUND et al. 2006;

WRIGHT et al. 2007; BARR et al. 2009). In der Messausrüstung ist ein Doppler-Radar mit Transceiver (24-GHz-Sendeempfangsanlage) enthalten, der oberhalb der Windschutzscheibe angebracht wird. Lidschlussmaße (Geschwindigkeit, Häufigkeit und Dauer, PERCLOS), Herzrate, Puls, Atmung und das Aktivitätslevel des Fahrers werden gemeinsam erhoben und ausgewertet, sodass es möglich sei, beginnende Müdigkeit zu erkennen und den weiteren Verlauf zu verfolgen. Wann genau eine Warnung stattfindet, wird nicht berichtet. Des Weiteren fehlen Angaben zu Fehlalarmen und Auslassungen des Systems. Mögliche Beeinträchtigungen der Messung durch äußere Umstände werden nicht berichtet.

InSight™, entwickelt und hergestellt von der deutschen Firma SensoMotoric Instruments GmbH (SMI), kombiniert PERCLOS, Kopfposition und -ausrichtung, Blickrichtung, Lidöffnung, Pupillenposition und -durchmesser (BARR et al. 2009; GOLZ et al. 2010). Die Signale werden mithilfe einer Kamera und drei Infrarotquellen am Armaturenbrett in Echtzeit erfasst und in einer angeschlossenen Recheneinheit verarbeitet (DONG et al. 2011). Eine Anpassung an verschiedene Fahrer ist laut Hersteller mit geringem Kalibrierungsaufwand möglich. Genauere Erläuterungen zum Warnsignal fehlen ebenso wie Angaben zu Fehlalarmen und Auslassungen. Es wird jedoch berichtet, dass InSight™ sowohl im Simulator als auch im Straßenverkehr in Kooperation mit BMW und Volkswagen getestet wurde (BARR et al. 2009). Zum aktuellen Stand des Systems liegen leider keine näheren Informationen vor.

Smart Eye Pro 5.7 ist ein weiteres System des schwedischen Herstellers Smart Eye AB (EDWARDS et al. 2007; DONG et al. 2011), das laut Hersteller in der aktuellen Version von mehreren europäischen Automobilherstellern wie Volvo, Volkswagen und BMW sowie allen europäischen Lkw-Herstellerfirmen getestet wird. Es werden Blickbewegungs- und Lidschlussmaße (PERCLOS möglich) sowie die Kopfposition des Fahrers erfasst. Das System ist in der Version 5.7 mit bis zu acht Kameras inklusive Infrarotquelle ausgestattet (60-Hz-Abtastrate), deren Positionen flexibel wählbar sind. In den meisten Übersichtsartikeln wird seine Vorgängerversion Smart Eye Pro 3.0 erwähnt, die mit bis zu vier Kameras ausgestattet war (60-Hz-Abtastrate). Alternativ ist Smart Eye Pro 5.7 auch mit vier Kameras erhältlich, deren Abtastrate dann jedoch bei 120 Hz liegt. Ein Wechsel von Dun-

kelheit zu Helligkeit und umgekehrt sei ohne erneute Kalibrierung möglich. Sonnenlicht, Brillen, Kontaktlinsen oder Sonnenbrillen, plötzliche Bewegungen oder Verdeckungen des Gesichts stellen laut Hersteller keine Störquellen bei der Messung dar. So wird berichtet, dass es bis zu Version 4.0 des Systems möglich war, dass Temperaturschwankungen über den Tag durch Formänderungen des Armaturenbretts zu Positionsänderungen der Tracking-Kamera führen (KIRCHER et al. 2009). Um diesem Problem entgegenzuwirken, kalibrieren sich die Kameras späterer Versionen selbstständig stündlich neu. Zudem soll es je nach Produktversion keine Möglichkeit geben, Profile für verschiedene Fahrer anzulegen (KIRCHER et al. 2009).

Vehicle Driver's Anti-Dozing Aid (VDADA) ist ein vom US-Militär hergestelltes System, das aktuell von BRTRC Technology Research Corporation of Fairfax hergestellt wird und in der Forschung Anwendung findet (HARTLEY et al. 2000; KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007). Es gibt drei verschiedene Modelle, die jedoch alle die Lidschlussmaße und die Kopfposition des Fahrers mithilfe eines in ein Stirnband integrierten Sensors erfassen. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der abgegebenen Alarme und ihrer Messausrüstung: Modell 1 gibt ein akustisches Signal und eine Vibration im Schläfenbereich ab, sobald der Fahrer als müde eingestuft wurde. Modell 2 wurde um einen Infrarotsensor erweitert, der unter anderem dazu dienen sollte, das System sensitiv für frühe Müdigkeitsstadien zu machen, die Alarme blieben gleich. Modell 3 wurde darüber hinaus mit einer CO₂-Kartusche ausgestattet, die für einen CO₂-Ausstoß im Schläfenbereich sorgt, sobald der Fahrer als müde eingestuft wird. Dieser dient vermutlich der Aktivierung des Fahrers, jedoch fehlen hierzu leider weitere Erläuterungen ebenso wie Angaben zur Validierung des Systems, Treffer-, Fehlalarm- und Auslasungsraten.

Im Rahmen des EU-Projektes SAVE (System for effective Assessment of the driver state and Vehicle control in Emergency situations) (TR1047) wurde ein System entwickelt, das eine Vielzahl an Parametern umfasst: Lidschlagfrequenz und -dauer für jedes Auge einzeln, Fahrzeit, Bremsdruck, Seitenabstand (durchschnittlich, aktuell und kleinsten), Einschlagwinkel (durchschnittlich und aktuell), Gaspedalstellung, Geschwindigkeit (durchschnittlich und aktuell), Greifkraft, verbleibende Zeit bis zu einer Kollision (time to collision, TTC), der Abstand

zu anderen Fahrzeugen und die verbleibende Zeit bis zum Spurwechsel (time to lane crossing, TTL). Laut Abschlussbericht (BEKIARIS 1999) wurde jede Operationalisierung einzeln validiert und eine Detektionsrate von 90 % erreicht (MABBOTT et al. 1999). Allerdings wurden die genauen Daten zur Validität des Systems nie veröffentlicht (HARTLEY et al. 2000). SAVE soll vier Wachsamkeitsstufen voneinander unterscheiden können und sie visuell (Symbol und Text auf einem Display) und akustisch (Ton und eine gesprochene Nachricht) zurückerklären: grün = wach, gelb = einfaches/leichtes Problem (→ einfache Warnung), orangefarben: Der Zustand des Fahrers ist unsicher (→ erfordert Reaktion vom Fahrer), und rot = schlechter Fahrerzustand oder nicht mehr ausreichend Zeit für eine Warnung (→ Bremsvorgang wird eingeleitet durch das Automatic Control Device). Die mittlere Rate für falsche Alarme lag bei 4,6 % bei Müdigkeit, bei freier Fahrt auf gerader Strecke im Mittel nur bei 1 %. Die Detektionsrate für Brillenträger lag bei 65 %, für Fahrer ohne Brille bei 95 %. Das System ist ausgestattet mit einer Kamera, einer visuellen Warneinheit am Rückspiegel, Sensoren, Kontrollelementen und einem Display (BROOKHUIS et al. 1998; BEKIARIS 1999; HARTLEY et al. 2000).

Zur Anwendung für industrielle oder militärische Zwecke, die eine Helmnutzung notwendig macht, wurde an der Technischen Universität Graz das System Wearable Alertness Monitoring Guard entwickelt. Erfasst werden Lidschlussmaße, die Reaktionszeit, Kopfbewegungen und Herzrate. Darüber hinaus verfüge es über eine Alarmfunktion, die den Operateur sowohl visuell als auch akustisch warnt (WRIGHT et al. 2007). Genaue Angaben zur am Kopf getragenen Messausrüstung, Auswertung der Signale, Validität, Sensitivität und Spezifität sind für dieses System ebenfalls nicht veröffentlicht.

Verschiedene Übersichtsartikel zum Thema Müdigkeitsmess- und -warnsysteme berichten über Prototypen in der Entwicklung von Siemens (KECKLUND et al. 2006), Nissan (KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007), Daimler (KECKLUND et al. 2006; WRIGHT et al. 2007), dem Rensselaer Polytechnic Institute (RPI; JI et al. 2004, BARR et al. 2009) in Troy, New York, und dem Media Laboratory des Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge (WRIGHT et al. 2007). Bei Siemens und Nissan stehen Lidschlussmaße im Vordergrund, bei DaimlerChrysler Kopf- und Augenbewegungen. Genauere Angaben hierzu werden nicht gemacht. Der Prototyp des RPI soll

darüber hinaus Pupillen-, Kopf- und Blickbewegungsmaße, die Blickverteilung (GAZEDIS) und den prozentualen Anteil von Sakkaden über die Zeit (PERSAC) mit einbeziehen. Das System des MIT soll Kameras beinhalten, die zur Erfassung von Verkehrsinformationen sowie Blickrichtung und Kopfposition des Fahrers dienen, die wiederum mit Schalt-, Brems- und Lenkverhalten synchronisiert werden, um den Fahrerzustand zu erfassen.

Sensewear Pro, hergestellt von der US-amerikanischen Firma Body Media, wird ebenfalls als System zur Messung von Müdigkeit aufgezählt, das die Aktivität über ein Accelerometer bestimmt (Liegezeit, Schlafdauer und -effizienz) und darüber hinaus Haut- und Körpertemperatur misst (WRIGHT et al. 2007). Nach Herstellerangaben scheint es sich hierbei jedoch um ein Gerät zu handeln, anhand dessen man die Schlafqualität einer Person bestimmen kann. Somit ist es nicht zur Erfassung von Müdigkeit geeignet.

COMPTRACK ist ein System, das am Institute for Neural Computation der University of California in San Diego entwickelt wurde und in der Forschung angewendet wird. Es kombiniert eine Frequenzanalyse des Fahrer-EEGs mit seiner Leistung in einer sekundären Trackingaufgabe (MAKEIG & JOLLEY 1995; WRIGHT et al. 2007). Leider sind genauere Erläuterungen zu Funktionsweise, Validierung und aktuellem Stand nicht verfügbar.

Bereits implementierte Systeme

Da diese Kategorie sich nicht auf spezielle Messverfahren oder Parameter bezieht, nimmt sie eine Sonderrolle ein. Sie fasst alle Systeme von Automobilherstellern zusammen, die bereits optional oder serienmäßig in Fahrzeugen eingebaut, verkauft und genutzt werden oder zumindest dafür entwickelt wurden.

AttenD (Driver Attention Warning System) wurde im Rahmen eines IVSS (Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit)-Projektes gemeinsam mit den Projektpartnern Saab, Scania, smarteye, Siemens VDO, dem schwedischen Straßen- und Transport-Forschungsinstitut VTI und der Universität Linköping entwickelt (NÅBO 2009; KIRCHER et al. 2009; DONG et al. 2011). Blick- und Kopfbewegungsmaße sowie die Lidschlussfrequenz werden kontinuierlich alle 30 Sekunden erhoben. Sobald ein Muster lang andauernder Lidschlüsse erkannt wird, geht das System von beginnender Müdigkeit

aus und warnt den Fahrer in drei Stufen (Signalton, gesprochene Nachricht, lauter andauernder Signalton). Um falsche Alarmer zu vermeiden, wird die Warnung erst abgegeben, wenn zwei von fünf aufeinanderfolgenden Messintervallen das gleiche Müdigkeitslevel messen (KIRCHER et al. 2009). Dabei werden drei Level unterschieden: 1) slightly drowsy, 2) drowsy, 3) very drowsy. Darüber hinaus wird in einigen Situationen ein ausgelöster Alarm unterdrückt, wenn davon auszugehen ist, dass entweder keine Gefahr besteht oder der Fahrer nicht abgelenkt werden soll (Bremsvorgang, Geschwindigkeit unter 5 km/h, Blinken, Rückwärtsgang). Im Rahmen des Projekts wurde der Einsatz sowohl für Saab-Pkw als auch für Scania-Lkw getestet. Der aktuelle Status des Systems ist jedoch nicht nachvollziehbar.

Vom japanischen Automobilhersteller Toyota sind aktuell zwei bzw. drei bereits implementierte Assistenzsysteme bekannt, die der Müdigkeitserfassung dienen sollen: Driver Monitoring System, das die Kopfposition des Fahrers erfasst, und Toyota Crown System als das Nachfolgemodell, das darüber hinaus Lidschlussmaße erfasst, um den Wachheitsgrad des Fahrers zu erfassen (DONG et al. 2011). Inwiefern es sich von dem auf der Herstellerseite beworbenen System Pre-crash Safety System with Driver Monitor unterscheidet, ist unklar. Auch für dieses System wird angegeben, dass Lidschlussmaße und die Kopfposition des Fahrers gemessen werden (Internetseite des Herstellers).

Die Mitsubishi Fuso Truck and Bus Corporation (MFTBC) hat bereits 1996 in Zusammenarbeit mit der Mitsubishi Electric Corporation das Mitsubishi Driver Attention Monitoring System (MDAS) entwickelt, um Fahrerschlaf frigkeit vorzubeugen. Erhoben wurde mittels einer auf die Straße ausgerichteten Kamera die Position des Fahrzeugs auf der Spur (MIMURO et al. 1996).

Volvo bietet seinen Kunden für verschiedene Modelle das System Driver Alert Control an, das dem Fahrer kontinuierlich mithilfe einer fünfstufigen Skala auf dem Display des Bordcomputers zurückmeldet, wie wach es ihn einschätzt. Wenn die unterste Stufe erreicht ist, empfiehlt das System eine Pause, indem ein Kaffeetassensymbol und eine ergänzende Textmeldung aufleuchten. Nähere Informationen zum verwendeten Maß, der genauen Bedeutung der fünf Stufen und des aktuellen Stands

des Systems sind leider nicht veröffentlicht (Quelle: Internetseite des Herstellers).

Ford bietet für sein Modell S-MAX im Rahmen eines Technologie-Pakets ebenfalls ein Müdigkeitswarnsystem an, das den Fahrer visuell (Texthinweis auf Fahrerdisplay) warnen soll, falls er als müde eingeschätzt wird. Der Warnton wird laut Hersteller lauter, je nachdem, wie schnell auf die erste Warnung reagiert wurde. Angaben zum erhobenen Maß sind leider nicht veröffentlicht.

Attention Assist von Daimler erstellt für den Fahrer ein persönliches Profil aus Geschwindigkeit, Längs- und Querbewegung, Lenkbewegungen, Lenkgeschwindigkeit, Lenkradwinkel, Blinker- und Pedalbetätigungen sowie bestimmte Bedienhandlungen und äußere Einflüsse, wie Seitenwind und Unebenheiten der Fahrbahn. Zusätzlich werden die Tageszeit sowie die bisherige Fahrdauer berücksichtigt (DONG et al. 2011). Laut Herstellerangaben kann Attention Assist anhand dieser Daten Übermüdung erkennen und warnt den Fahrer durch ein visuelles (Texthinweis auf Fahrerdisplay) und ein akustisches Signal.

Volkswagen bietet ebenfalls eine Müdigkeitserkennung für das aktuelle Passat-Modell an. Dem Fahrer wird visuell (Kaffeetassensymbol, Texthinweis auf Fahrerdisplay) und akustisch (Warnton) zurückgemeldet, wenn er eine Pause einlegen soll. Laut Angaben von Volkswagen auf seiner Internetseite wertet das System das Lenkverhalten des Fahrers und weitere, nicht näher benannte Parameter aus, um den Fahrerzustand einzuschätzen.

Zu keinem dieser Systeme (Ausnahme: AttenD) sind bisher umfassende Daten zur Validierung, Sensitivität und Spezifität veröffentlicht. Ein erster Ansatz in diese Richtung war im Rahmen dieser Publikation eine Nutzerbefragung, die in Kapitel 5 zu finden ist.

Rückblickend ist es auffällig, dass bei vielen Systemen die Entwicklung vermutlich nicht weitergeführt wurde. Auch handelt es sich bei vielen Systemen nicht um Müdigkeitsmesssysteme. Wiederum andere scheinen zur Müdigkeitserfassung ungeeignet. Dennoch werden sie mitunter in der aktuellen Literatur als solche aufgeführt. Dies gilt ebenfalls für Systeme, deren Verbleib unklar ist, weil die letzten über sie veröffentlichten Daten mitunter über 20 Jahre alt sind. Darüber hinaus sind für die meisten Systeme weder Angaben zur Validierung noch zur Sensitivität für verschiedene Müdigkeitsstadien auffindbar. Dies ist für die meisten kommerziell verfügbaren Systeme nicht verwunderlich, jedoch wird ihre Bewertung dadurch deutlich erschwert.

Generell finden Müdigkeitsmess- und Müdigkeitswarnsysteme zumeist Anwendung in der Forschung. Die von Automobilherstellern und -zulieferern entwickelten Systeme sind erwartungsgemäß ausschließlich Warnsysteme. Darüber hinaus ist zu bemerken, dass Systeme, die Kombinationen verschiedener Parameter aus den besprochenen Kategorien zur Erfassung von Müdigkeit einsetzen, zunehmend Anklang finden. Dies gilt für die Neuentwicklung und für die Weiterentwicklung bereits bestehender Systeme.

Eine Übersicht zu allen ausgeschlossenen Systemen, ist in Tabelle 3 zu finden. Ausgeschlossen wurden Systeme, die entweder nicht mehr existieren oder nachweislich keine Müdigkeit (sondern z. B. Einschlafen/Schlaf) erfassen.

Tabelle 4 liefert eine Übersicht zu allen Systemen, die nachweislich noch existieren oder bei denen zumindest keine Informationen zu ausgelaufenen Patenten oder nicht mehr existierenden Herstellerfirmen auffindbar waren, die einen Ausschluss rechtfertigen würden.

Gemischte Fahrzeugparameter	Kopfbasierte Maße	Aktivität	Physiologie	Augenbasierte Maße	Kombinationen
Stay-A-Wake	Driver Alert Warning Device	SleepWatch	Mind Switch	Blink Monitor	Sensewear Pro
DAS 2000 Road Alert System	Doze Alert			ExpressEye	SmartCar Driver Behaviour
	Stay Alert				
				Onguard	

Tab. 3: Aus der Übersicht ausgeschlossene Systeme aufgrund ausgelaufener Patente oder nicht mehr existierender Herstellerfirmen

Lenkverhalten	Spurhaltung	Gemischte Fahrzeugparameter	Kopfbasierte Maße	Körperbewegung	Psychomotorik, Reaktionszeit, FFD
ANN	HaulCheck	Safety Driver Advisor	Dozer's Alarm	SEFO	ART90
SAMG 3Steer	Lane Departure Warning Systems		Nap Zapper		EyeCheck
Steering Attention Monitor	Vision/ Radar Sensor		No-NAP		FACTOR 100
TravAlert®			PASS		Fatigue Warning System
ZzzzAlert			Sleep Control Helmet System		FIT® 2000/ FIT 2000-3
			Travelmate		OSPAT
					PVT
					Truck Operator Proficiency System
					Voice Commander Driver Alert
Zweitaufgabe	Physiologie	Augenbasierte Maße	Kombinationen	Implementierte Systeme	
Alertomatic	DMD	Alert Driver	Alertness Monitor	Saab/Scania: AttenD	
APRB/ACARP	EDVTCS	Co-Pilot (PERCLOS)	Anti Sleep	Daimler: Attention Assist	
FMD	NovAlert	DD850 DFM	ASTiD	Volvo: Driver Alert Control	
Roadguard		ETS-PCII	AWAKE	Toyota: Driver Monitoring System	
		Eyegaze Analysis System	COMP-TRACK	Ford-Technologie-Paket	
		Eyeputer	DDDS	Mitsubishi: MDAS	
		IM-Blinkometer	DMS	Toyota: Pre-crash Safety System	
		Mayo Pupillometry System	DSM	Toyota Crown System	
		MTI AM eye	DSS 3.0	VW: Müdigkeitserkennung	
		Optalert™	EyeHead		
		Photo Driven Alert System	InSight™		
		SafetyScope™	SafeTrac		
			SAVE		
			SmartCar Driver Behaviour		
			Smart Eye Pro 5.7		
			VDADA		
			Wearable Alertness Monitoring Guard		

Tab. 4: Übersicht der Müdigkeitsmess- und Warnsysteme ()

5 Müdigkeitswarnsysteme aus Nutzersicht

Trotz der Fülle an Müdigkeitswarn- und Müdigkeitsmesssystemen war der Einsatz dieser Systeme lange begrenzt auf Forschungsaktivitäten und die Erfassung der Fitness-for-Duty bei Berufskraftfahrern und Operateuren. Erst in den letzten Jahren bieten verschiedene Automobilhersteller Mittel- und Oberklassefahrzeuge mit Müdigkeitswarnsystemen (kurz: MWS) an, die den Fahrer bei erkannter Müdigkeit warnen und zu einer Fahrpause bewegen sollen (vgl. Kapitel 4). Auch wenn bislang nur wenige Fahrzeuge im alltäglichen Straßenverkehr mit MWS ausgestattet sind, so lässt sich mittelfristig eine stärkere Durchdringung erwarten.

Inwiefern sich die Funktionsweise der Systeme zwischen den Herstellern insbesondere mit Blick auf die zur Müdigkeitsdetektion verwendeten Parameter und Algorithmen unterscheidet, wird aus nachvollziehbaren Gründen seitens der Hersteller nicht transparent gemacht. Als kleinster gemeinsamer Nenner der nachfolgend untersuchten Systeme gilt die Erfassung der Fahrperformanz (Parameter des Lenkverhaltens und/oder der Spurhaltung), ergänzt um Informationen zur Tages- und bisherigen Fahrzeit. Die verschiedenen Systemhersteller wählten eine vergleichbare Form des Fahrerfeedbacks. Bei erkannter Müdigkeit lenkt ein Signalton die Aufmerksamkeit des Fahrers auf das Display. Dies zeigt eine Kaffeetasse, begleitet von der Empfehlung, eine Pause einzulegen.

Ohne Frage müssen umfassende Forschungstätigkeiten die Produktentwicklung begleitet haben. Dennoch liegen unseres Wissens keine veröffentlichten Studien zur Güte der Müdigkeitsdetektion durch die Müdigkeitswarnsysteme der Automobilhersteller vor. Es ist daher nicht belegt, inwiefern diese MWS tatsächlich eine akkurate Erfassung der Müdigkeit gewährleisten. Auch ist nicht bekannt, ob Fahrer den Warnungen der MWS tatsächlich Folge leisten und eine Fahrpause einlegen. Ziel der nachfolgend berichteten Studie war es, die wahrgenommene Detektionsgüte, die Akzeptanz und die Compliance der Fahrer zu erfragen.

5.1 Vorgehen

Dazu erfolgte im Sommer 2012 eine gezielte Ansprache von Fahrern mit Müdigkeitswarnsystemen ausgestatteter Fahrzeuge auf unterschiedlichen

Raststätten in der Nähe von Berlin. Die Erhebung fand tagsüber zwischen 10.00 und 15.00 Uhr statt. Ca. 30 % der angesprochenen Fahrer erklärten sich zur Teilnahme bereit.

Aufgenommen in die Befragung wurden ausschließlich Fahrer,

- die das MWS seit mind. 2 Monaten nutzten,
- und die mind. 1 x eine Systemwarnung (entweder Treffer oder Fehlalarm) erlebt hatten oder die eine Situation berichteten, in der eine notwendige Warnung ausgeblieben war (Verpasser).

In einem strukturierten Face-to-Face-Interview gaben die Fahrer Auskunft zur wahrgenommenen Güte der Müdigkeitsdetektion, zur eigenen (Nicht-) Befolgung der Systemwarnungen und der wahrgenommenen Nützlichkeit des Systems.

5.2 Stichprobe

Die Stichprobe umfasste 18 männliche und 2 weibliche Fahrer von Fahrzeugen der Mittelklasse und oberen Mittelklasse. Die Nutzungsdauer lag zwischen 2 und 48 Monaten ($M = 12,2$), in der Zeit wurden zwischen 2.000 und 80.000 km ($M = 28.020$ km) auf Autobahnen zurückgelegt. Die Altersspanne reichte von 23 bis 72 Jahre ($M = 46,6$). Die jährliche Fahrleistung lag zwischen 3.500 und 150.000 km ($M = 47.675$ km). Die Stichprobe muss als selektiv gelten, vorrangig vertreten sind männliche Personen mit einer hohen jährlichen Fahrleistung. Doch ist es nicht unwahrscheinlich, dass es sich dabei um den Nutzertyp mit der höchsten Exposition, d. h. mit der höchsten Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Fahrermüdigkeit, handelt (Berufskraftfahrer im Schwerverkehr nicht eingeschlossen).

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Aktuelles Nutzungsmotiv

Zwei der 20 Fahrer gaben an, dass MWS zurzeit nicht mehr zu nutzen. Beide begründeten dies mit der hohen Anzahl an Fehllarmen (6-7 bzw. 8-10 Fehllarme). Die Antworten der verbleibenden 18 Fahrer auf die offene Frage nach ihrem Grund für die Systemnutzung wurden wie folgt klassifiziert:

- Gleichgültigkeit (10 Nennungen): Das System sei „serienmäßig drin“, „es ist angestellt“, aber

es gebe „keinen besonderen Grund“ für die Nutzung.

- - Erwarteter Sicherheitsgewinn (5 Nennungen): Das System verspreche „mehr Sicherheit“, es „könnte helfen“.
- - Keine Wahlfreiheit (3 Nennungen): Das System sei „nicht abschaltbar“, man „würde es deaktivieren, wenn (man) wüsste, wie“.

5.3.2 Wahrgenommene Güte der Müdigkeitsdetektion

Häufigkeit von Alarmen, Fehlalarmen und Verpassern

Die Fahrer wurden gebeten, die Anzahl an Alarmen, Fehlalarmen und Verpassern (Situationen, in denen eine ihrer Ansicht nach notwendige Warnung ausblieb), die sie in den Monaten bzw. Jahren der Systemnutzung erlebt haben, zu schätzen. Die berichteten Häufigkeiten (bei Angabe einer Spanne von z. B. „8-10“ wird der mittlere „9“ Wert abgebildet) sind in Bild 3 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Anzahl an Treffern und Fehlern und v. a. deren Verhältnis sehr heterogen sind. Die einen berichteten von einer beträchtlichen Anzahl an Fehlern (Fehlalarmen und/oder Verpassern) ohne zutreffende Erkennung, bei anderen hielt die Anzahl an Alarmen und Fehlern sich in etwa die Waage, und nur einer der 20 Fahrer berichtete eine bislang fehlerfreie Funktionsweise.

Drei Fahrer berichteten sehr extreme Fehlerzahlen: Fahrer 8 nennt mehr als 100 Fehlalarme, Fahrer 20 und 9 jeweils 35 Fehlalarme bzw. Verpasser.

Insgesamt wurden Fehlalarme und Verpasser merklich häufiger berichtet als Treffer, und das auch bei Ausschluss der drei extremen Fehlerwerte von Fahrer 8, 9 und 20.

Trade-off zwischen Fehlalarmen und Verpassern

Die Festsetzung der Warnschwelle folgt immer einem Kompromiss zwischen einerseits früher Erkennung von kritischen Müdigkeitszuständen, die Fehlalarme in Kauf nimmt, und andererseits später Erkennung von Müdigkeit, die Verpasser in Kauf nimmt. Fehlalarme gefährden die Systemakzeptanz und damit die Compliance der Fahrer, Verpasser könnten sich als vergebene Chancen zur Prävention müdigkeitsbedingter Unfälle erweisen.

Die Anzahl an Fehlalarmen und Verpassern ist über die gesamte Stichprobe sehr ausgewogen. Man könnte somit von einem sehr balancierten Trade-off in Sensitivität und Spezifität der Systeme sprechen, sollte jedoch berücksichtigen, dass diese Balance sich nur bei einer Minderheit der Fahrer in den Antworten widerspiegelt (vgl. Fahrer 2, 3, 10, 15 und 18). Ob die vergleichbare Anzahl an Fehlalarmen und Verpassern tatsächlich den optimalen Trade-off zwischen Nutzerakzeptanz und Verkehrs-

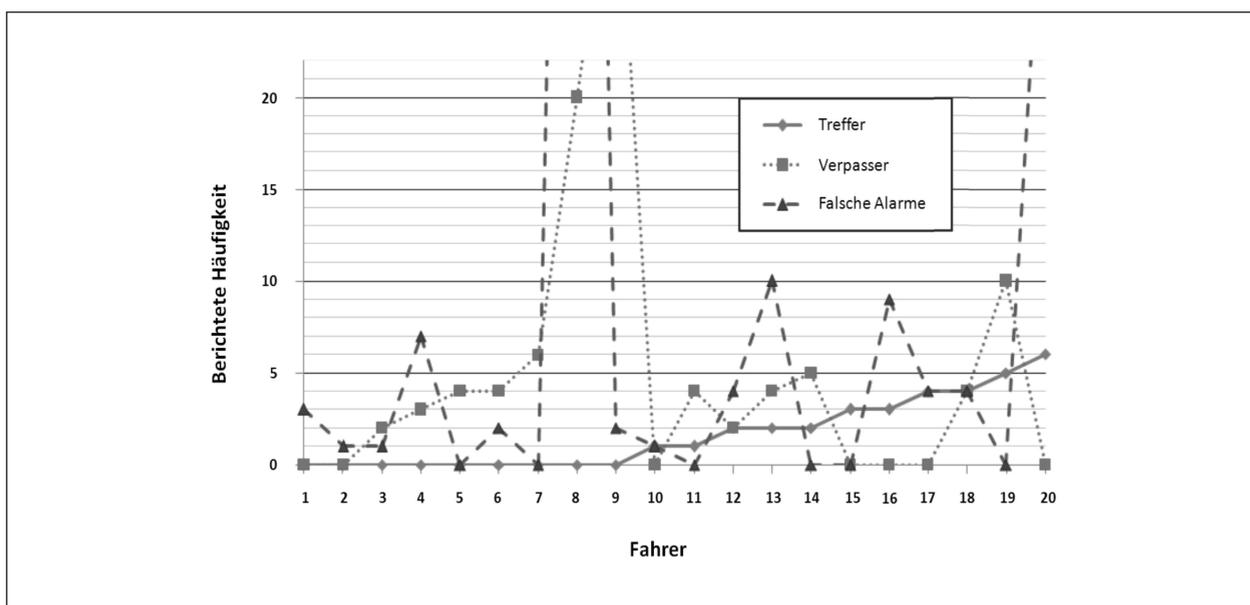


Bild 3: Berichtete Anzahl an Treffern, Verpassern und Fehlalarmen von 20 Fahrern. Fahrer 8 und 20 berichten ca. 100 bzw. 35 falsche Alarme, Fahrer 9 ca. 35 Verpasser

sicherheit darstellt, kann angezweifelt, aber anhand der vorliegenden Daten nicht beantwortet werden.

Wahrgenommene Korrektheit der Müdigkeitserkennung

Auf die Frage, ob das MWS ihre Müdigkeit zutreffend erkenne, verneinten die Hälfte der Stichprobe ausdrücklich und weitere 15 % eingeschränkt (siehe Tabelle 5). Ein Viertel der Stichprobe gestand dem MWS eine teilweise zutreffende Erkennung zu. Nur 10 % nehmen die Detektionsgüte des MWS positiv wahr.

5.3.3 Wahrgenommener Nutzen

Während zwei Drittel der Befragten dem MWS die Eignung zur Müdigkeitsdetektion völlig oder eingeschränkt absprachen, fielen die Urteile über den erzielten Systemnutzen vergleichsweise positiver aus (siehe Bild 4).

Fast die Hälfte der Fahrer gab an, das MWS erziele keinen zusätzlichen Sicherheitsgewinn. 32 % sahen es als einen geringen, 21 % als einen spürbaren Sicherheitsgewinn.

Nein	50 %
Eher nein	15 %
Teilweise	25 %
Eher ja	5 %
Ja	5 %

Tab. 5: Zutreffende Erkennung der Müdigkeit aus Nutzersicht (N = 20)

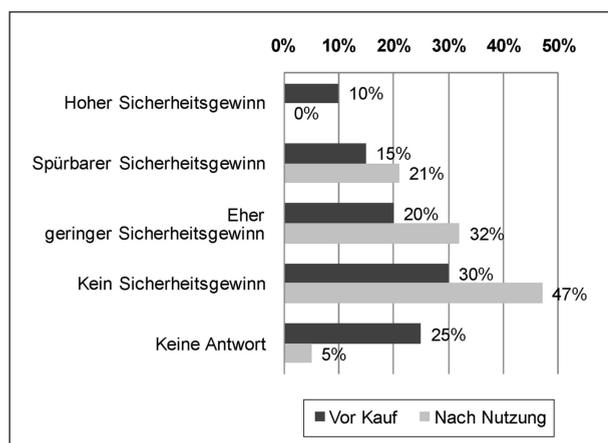


Bild 4: Erwarteter und erzielter Sicherheitsgewinn durch MWS

Nur 15 der 20 Fahrer hatten Angaben zum anfangs erwarteten Sicherheitsgewinn gemacht. Die anderen berichteten, sich vorab keine Gedanken über das MWS und seinen Nutzen gemacht zu haben. Grund dafür ist die nicht gezielte Entscheidung für den Erwerb des Fahrzeugs (Dienstwagen). Das Ergebnismuster des erzielten Sicherheitsgewinns (siehe Bild 4) bleibt bei Ausschluss dieser Probanden vergleichbar.

5.3.4 Reaktion auf Systemwarnungen

Die Fahrer wurden aufgefordert, sich die letzte Situation in Erinnerung zu rufen, in der das MWS eine Warnung abgegeben hatte, und zu beurteilen, ob sie die Warnung als Treffer oder als Fehllalarm erachteten. Anschließend wurden sie nach ihrer Reaktion auf die Systemwarnung befragt (siehe Tabelle 6). Wenig überraschend ist, dass Fehllalarme ignoriert wurden. Auch bei wahrgenommenen Treffern setzte die Hälfte der Fahrer trotz der Warnung und trotz selbst eingestandener Müdigkeit ihre Fahrt ohne Pause fort.

Drei der vier Fahrer, die trotz der Warnung des MWS und selbst erkannter Müdigkeit ihre Fahrt fortsetzten, begründeten dies mit der Nähe ihres Fahrtzieles. Zwei Fahrer gaben an, sich mit „Rumrucken auf dem Sitz“ oder mit „Getränken und Fenster auf“ fit zu halten.

Höher zeigt sich die berichtete Compliance bei der Frage nach der üblichen, nicht auf eine konkrete Situation bezogene Reaktion auf Systemwarnungen. Dort berichteten 64 % (von N = 11), nach Warnungen des MWS, die sie als zutreffend erachteten, anzuhalten. Eine denkbare Erklärung für die hier höhere Compliance fände sich z. B. in der sozialen Erwünschtheit, aber angesichts der geringen Fallzahlen sollten die berichteten Prozentzahlen mit Vorsicht interpretiert werden.

Wie die Fahrer in einer vergleichbaren Situation reagiert hätten, wenn es das MWS nicht gegeben hätte, lässt sich anhand dieser Studie nicht beantworten. Unstrittig ist, dass bei nur 50%iger Compliance – und das trotz selbst eingestandener Müdigkeit – weiterer Handlungsbedarf besteht.

N = 18	Fahrpause	Keine Fahrpause
Treffer (8 Fahrer)	50 %	50 %
Fehllalarm (10 Fahrer)	0 %	100 %

Tab. 6: Reaktion auf die letzte Systemwarnung

5.3.5 Verhaltensanpassungen

Bei nahezu jedem Fahrerassistenzsystem wird die Frage nach möglichen negativen Verhaltensanpassungen aufgeworfen. Bei Verfügbarkeit eines MWS – so die Befürchtung – könnten sich die Fahrer zu sehr auf die Systemwarnung verlassen und demzufolge bei ausbleibenden Warnungen seltener Fahrpausen einlegen als vor Nutzung des MWS. Daher wurden die Fahrer gebeten, ihr aktuelles Pausenverhalten mit Pausenverhalten vor Nutzung des MWS zu vergleichen:

- Seltener Pausen berichteten 0 %,
- häufigere Pausen nur 5 % (d. h. ein Fahrer),
- keine Veränderung bei 95 %.

Das Pausenverhalten zeigt sich damit nahezu unverändert. Weitere Verhaltensanpassungen (z. B. spätere Fahrpausen) wurden (in einer offen formulierten Frage) nicht genannt, lassen sich jedoch nicht ausschließen.

5.3.6 Soziodemografische Unterschiede

Trotz der geringen und recht homogenen Stichprobe zeigen sich einige Unterschiede in der MWS-Bewertung über die Stichprobe. So korreliert das Ausmaß, mit dem die Müdigkeitserkennung als zutreffend beschrieben wird, deutlich und signifikant mit einigen soziodemografischen Merkmalen der Stichprobe. Sie wird negativer beurteilt

- - mit steigendem Alter ($r = -.455$ mit $p = .044$),
- - bei einer höheren jährlichen Fahrleistung ($r = -.597$ mit $p = .005$) und
- - einer höheren Kilometerzahl der MWS-Nutzung ($r = -.511$ mit $p = .021$), die auch mit der jährlichen Fahrleistung hoch korreliert.

Die Bewertung des aus Nutzersicht erzielten Sicherheitsgewinns weist hingegen keine signifikanten Zusammenhänge ($p > .05$) zu den genannten soziodemografischen Merkmalen auf.

5.4 Einschränkungen

Die Effektivität der Systemwarnung, müde Fahrer zu einer Fahrpause zu bewegen, ist nur eingeschränkt beurteilbar. Ob weniger und, wenn ja, wie viel weniger Fahrer ohne die Systemwarnung pau-

siert hätten, lässt sich aufgrund der fehlenden Vergleichsbasis nicht beurteilen. Ein experimentelles Vorgehen könnte hier Aufschluss bringen.

Die befragte Stichprobe zeichnet mit Sicherheit kein repräsentatives Abbild der Gesamtheit der Pkw-Fahrer. Möglich, doch nicht abgesichert, ist, dass das Gros der befragten Fahrer derzeit den „typischen Nutzer“ oder zumindest den „Power-User“ abbildet. Nicht auszuschließen ist daher, dass eine repräsentative Stichprobe ein anderes, positiveres (man bedenke den negativen hohen Zusammenhang zwischen Fahrleistung und wahrgenommener Detektionsgüte) Bild der MWS gezeichnet hätte.

Ziel der Studie war eine Beurteilung der Akzeptanz und Compliance in Hinsicht auf MWS und keine vergleichende Evaluation unterschiedlicher MWS. Aus diesem Grund werden keine Aussagen zu Unterschieden in der wahrgenommenen Detektionsgüte zwischen den MWS verschiedener Hersteller angestrebt. Ohnehin wären diese angesichts der geringen Stichprobe nicht tragfähig.

Bei der Interpretation der Ergebnisse, insbesondere bei der Nennung der Prozentzahlen, ist Vorsicht geboten. Bei der geringen Stichprobe wirkt sich jede einzelne Antwort sehr gewichtig aus. Vor allem muss stets berücksichtigt werden, dass alle Aussagen auf rein subjektiven Angaben beruhen. Der Bezugsrahmen für die Beurteilung der Detektionsgüte (Welche Warnung zählt als Treffer, welche als Fehlalarm?) ist stets die Selbstbeurteilung der Fahrer. Wenn Fahrer nun dazu neigen, das Ausmaß ihrer Müdigkeit zu unterschätzen, würde dies eine Unterschätzung der Trefferzahl von MWS und eine Überschätzung der Zahl von Fehlalarmen bedeuten. Nur ein experimenteller Ansatz bzw. eine umfassende Naturalistic Driving Study könnte diesbezüglich Aufschluss geben.

5.5 Fazit

Das Unfallvermeidungspotenzial von MWS hängt v. a. von zwei Faktoren ab: der Güte der Müdigkeitsdetektion und der angemessenen Reaktion der Fahrer auf die Systemwarnungen. Aus Nutzersicht erscheint die wahrgenommene Detektionsgüte als nicht zufriedenstellend, Fehlalarme und Verpasser werden in gleichem Maße häufiger berichtet als korrekte Alarme. Hier gilt es zu berücksichtigen, dass Fahrer, die bislang weder einen Fehler (Fehlalarm oder Verpasser) noch einen Treffer berichtet

haben (ausschließlich korrekte Zurückweisungen), nicht einbezogen wurden und die Systembewertung negativer ausfällt. Natürlich bietet ein System bei Fahrern, die nicht müde fahren, kein Wirkpotenzial. Inwieweit diese Angaben auf a) Erinnerungsfehlern (retrospektive Schätzung), b) Fehleinschätzungen der eigenen Müdigkeit oder objektiv bestehenden Detektionsfehlern beruhen, lässt sich anhand der vorliegenden Studie nicht beantworten. Für die Frage der Nutzerakzeptanz und der Compliance entscheidet jedoch allein die subjektive Sicht.

Die geringe Compliance der Fahrer darf nicht allein auf die als gering erachtete wahrgenommene Detektionsgüte attribuiert werden. Immerhin gaben 50 % der Befragten an, bei der letzten Warnung trotz Müdigkeit keine Fahrpause eingelegt zu haben. Maßnahmen zur Erhöhung der Compliance sind somit dringend erforderlich. Ein vielversprechender Ansatz liegt beispielsweise in der Gestaltung des Feedbacks an den Fahrer. Eine effektive Warnung muss die Gefährlichkeit der Noncompliance und die Dringlichkeit der Befolgung betonen (KARRER-GAUß 2011). Dass dies bislang nicht der Fall ist, unterstreichen auch die Erfahrungen aus den Nutzerinterviews. So bezeichneten mehrfach Fahrer das System nicht als Müdigkeitswarnsystem, sondern als „Pausenempfehlung“. Die Nähe zum Fahrtziel erweist sich auch hier als starker situativer Einflussfaktor in der Entscheidung gegen das Einlegen einer Fahrpause. Diesem Faktor gilt es, auch seitens der Systemgestaltung, zu begegnen.

Dass bislang keine Verhaltensanpassungen, ob positive oder negative, berichtet werden, ist angesichts der als eher gering wahrgenommenen Detektionsgüte des MWS kaum überraschend. Immerhin sieht ca. die Hälfte der Fahrer in der Nutzung von MWS einen Zuwachs an Sicherheit. Da bislang der Erwerb eines MWS mit der Entscheidung für ein Fahrzeugmodell oder ein Technologiepaket einhergeht, ist die zunehmende Verbreitung (noch) unabhängig von den Erwartungen der Nutzer.

Für eine wirksame Vermeidung müdigkeitsbedingter Unfälle gilt es, die Müdigkeitsdetektion durch Systeme und Fahrer weiter zu verbessern und wirksame Maßnahmen durchzusetzen, um die Zahl müder Fahrer auf den Straßen zu reduzieren. Fraglos besteht weiterer Forschungsbedarf, um die Wirksamkeit von MWS auch unter Berücksichtigung objektiver Daten tragfähig beurteilen zu können.

6 Delphi-Studie

Ziel des vorliegenden Projekts war die vergleichende Bewertung von Müdigkeitsmessverfahren und die Beurteilung ihrer Eignung für unterschiedliche Einsatzgebiete. Dazu wurde eine schriftliche Befragung von Experten im Bereich der Müdigkeitserfassung mittels der Delphi-Methode durchgeführt. Bei der Delphi-Methode handelt es sich um ein Interviewverfahren, das in mehreren (hier: zwei) Stufen durchgeführt wird, und – oft mit dem Ziel der Trendprognose oder der Einschätzung von technischen Entwicklungen und deren Folgen – Teilnehmer mit hoher Expertise bedarf. Sinn und Zweck der mehrstufigen Befragung ist es, einen Konsens zu erzielen oder aber Begründungen für den Dissens zu identifizieren. Ein Vorteil dieser Methode besteht in ihrer Ökonomie, da die Datenerhebung ortsungebunden und zeitlich flexibel erfolgen kann.

Zu diesem Zweck erfolgten die Auswahl und Ansprache von Experten aus der Hochschulforschung und der Industrie. Neben langjähriger Erfahrung mit dem Thema Müdigkeitserfassung war es ein wichtiges Auswahlkriterium, die fachliche Heterogenität der Teilnehmerrunde in Hinsicht auf Studiengang, aktuelles Tätigkeitsfeld und Forschungsschwerpunkte zu gewährleisten. Zwölf Experten erklärten sich zur Teilnahme bereit. Vorgestellt werden sie zu Beginn des vorliegenden Berichts in der Danksagung.

Voraussetzung für die Bewertung der Messverfahren und ihrer Eignung war die Entwicklung eines Gütekriterienkatalogs als Bewertungs- und Vergleichsinstrument.

In der ersten Delphi-Runde wurden die geeignetsten Messverfahren zur Müdigkeitserfassung ausgewählt und auf Grundlage des dafür erstellten Kriterienkatalogs (siehe Kapitel 6.2) bewertet. In der zweiten Delphi-Runde wurde gezielt auf abweichende Beurteilungen bei den sechs identifizierten Messverfahren eingegangen.

Als Ergebnis der Befragung liegen neben den Bewertungsprofilen der ausgewählten Messverfahren begründete Stellungnahmen vor, sodass Einschränkungen und Grenzen, bedeutsame Rahmenbedingungen der Messverfahren und weitere Forschungsbedarfe aufgezeigt werden können. Darüber hinaus wurde die Eignung dieser Messverfahren für unterschiedliche Einsatzzwecke begründend bewertet.

Die Bewertungsprofile der sechs validesten Messverfahren wurden den Befragungsteilnehmern abschließend im Rahmen eines Workshops vorgestellt, gemeinsam diskutiert und ergänzt.

6.1 Vorgehen

Inhalte von Delphi-Runde 1

- Auswahl der drei validesten objektiven Müdigkeitsmessverfahren durch jeden Delphi-Teilnehmer. Bedingung: nur jeweils ein Messverfahren je Kategorie. Folgende Kategorien wurden zur Auswahl gestellt: Fahrperformanz, Verhaltensbeobachtung, Testperformanz, Augenaktivität, EEG und Peripherphysiologie.
- Bewertung der drei ausgewählten Müdigkeitsmessverfahren anhand des Kriterienkatalogs (siehe Kapitel 6.2).
- Erstellung eines Anforderungsprofils für unterschiedliche Einsatzgebiete zur Fahrermüdigkeitserfassung: 1) Forschung & Entwicklung, 2) Müdigkeitswarnsystem im Fahrzeug und 3) Verkehrskontrolle.

Inhalte von Delphi-Runde 2

- - Begründete (Neu-)Bewertung der Messverfahren nach den Gütekriterien mit auffallend heterogener Bewertung in Delphi-Runde 1. Da die Messverfahren bislang nur durch einen (selbst selektierten) Teil der Experten bewertet worden waren, wurde auf eine Rückspiegelung der Ergebnisse verzichtet.
- - Bewertung der Eignung der sechs in Delphi-Runde 1 ausgewählten Messverfahren für die drei unterschiedlichen Einsatzgebiete auf Basis des in Delphi-Runde 1 erstellten Anforderungsprofils.

Inhalte des Abschlussworkshops

- - Kritische Auseinandersetzung mit dem Kriterienkatalog als Bewertungsgrundlage.
- - Kritische Diskussion der Delphi-Ergebnisse und der im Workshop vorgebrachten Gegenvorschläge zur Bewertung der Messverfahren.
- - Dokumentation des Konsens bzw. des begründeten Dissens.

6.2 Kriterienkatalog zur Gütebewertung

Ziel war die Entwicklung eines Instruments zum Vergleich der unterschiedlichen Müdigkeitsmessverfahren. Auf Basis der Literaturrecherche wurden 20 Kriterien zur Beschreibung der Messgüte, Validität, Stabilität, Praktikabilität und der Bewertung des aktuellen Status und erwarteten Potenzials der Messverfahren zur Müdigkeitsdetektion bei Fahrern abgeleitet. Eine Gewichtung der unterschiedlichen Gütekriterien ist nicht explizit vorgegeben, im vorliegenden Projekt wurde sie in Abhängigkeit vom jeweiligen Einsatzgebiet definiert. Bestimmte Kriterien, wie z. B. die Rechtssicherheit und die Prädiktionsgüte, sind hart formuliert und für viele Fragestellungen und Einsatzgebiete nicht relevant.

Die Klassifikation der Gütekriterien in die genannten Kategorien Messgüte, Validität etc. ist als heuristische Klassifizierung zur Strukturierung und Übersicht zu verstehen. Weder die Gütekriterien selbst noch deren Zuordnung zu den Kategorien sind disjunkt.

Die beiden Gütekriterien „Prädiktionsgüte“ und „Rechtssicherheit“ werden in der nachfolgenden Ergebnisübersicht nicht aufgeführt. Bei keinem Messverfahren ist eine Vorhersage über das Auftreten oder Ausbleiben eines kritischen Müdigkeitszustands binnen der nächsten vier Stunden möglich. Bereits über eine Prädiktionsgüte von ca. 15 min könne man aus Expertensicht (Aussagen aus Delphi-Befragung [nachfolgend DEL] und Expertenworkshop [nachfolgend WS]) froh sein. Auch die für die Gewährleistung der Rechtssicherheit notwendigen Voraussetzungen (z. B. verbindliche Grenzwerte [DEL]) sind bislang nicht erfüllt. Der Katalog diente im laufenden Projekt als Diskussionsgrundlage. Alle nachfolgend berichteten Ergebnisse beruhen auf der in Tabelle 7 aufgeführten Arbeitsversion.

Diese wurde im Rahmen der Delphi-Studie und des Workshops kritisch diskutiert und ergänzt. Die überarbeitete Version wird dargestellt in Tabelle 17.

6.3 Bewertung der validesten Müdigkeitsmessverfahren

Die Auswahl der validesten Müdigkeitsmessverfahren durch die 12 Experten in Delphi-Runde 1 zeigt Tabelle 8. Da die genannten Messverfahren eine Vielzahl unterschiedlicher Indikatoren umfassen,

Messgüte	Reliabilität	Messung und Bewertung führen unter vergleichbaren Bedingungen zu einem vergleichbaren Ergebnis.
	Sensitivität	Beginnende Müdigkeit wird valide erkannt.
	Differenzierungsfähigkeit	Beginnende Müdigkeit wird von schwerer Müdigkeit valide differenziert.
	Spezifität	Es ist ausgeschlossen, dass wache Fahrer aus unterschiedlichen Gründen (Messfehler, personen- oder umweltbedingte Störgrößen, ...) als müde klassifiziert werden.
Validität	Kriteriumsvalidität	Ein hoher Zusammenhang zur Müdigkeit, festgestellt durch ein valides Außenkriterium, ist überzeugend belegt.
	Externe Validität	Ein hoher Zusammenhang zu einer eingeschränkten Fähigkeit zur Fahrzeugführung im realen Straßenverkehr ist überzeugend belegt.
	Prädiktionsgüte	Eine Vorhersage über das Ausbleiben bzw. Auftreten eines kritischen Müdigkeitszustands binnen der nächsten vier Stunden ist möglich.
	Generalisierbarkeit	Es gibt keine interindividuellen Unterschiede: Identische Messwerte bei unterschiedlichen Personen indizieren eine vergleichbare Müdigkeitsausprägung.
	Akzeptierte Grenzwerte	Es gibt allgemein akzeptierte Grenzwerte, ab denen eine Teilnahme am Straßenverkehr in Frage gestellt ist.
Stabilität	Keine Intrusivität	Die Messung bzw. die notwendige Messausrüstung wird von den Fahrern (unter optimalen Bedingungen) nicht als störend empfunden.
	Unverfälschbarkeit	Eine willentliche Verfälschung der Messergebnisse, also ein Vortäuschen eines wacheren Zustandes, ist ausgeschlossen.
	Keine Reaktivität der Messung	Eine Veränderung der Fahrermüdigkeit durch den Messvorgang ist ausgeschlossen.
	Robustheit	Die Messwerte sind unbeeinflusst durch Umgebungsfaktoren (Straßengeometrie, Lichtverhältnisse, Verkehr, ...).
Praktikabilität	Vereinbarkeit mit der Fahraufgabe	Eine Interferenz der Erfassung des Fahrerzustandes mit der Fahraufgabe ist ausgeschlossen.
	Zeitliche Ökonomie	Die Datenerhebung und/oder Auswertung erfolgt schnell (unter optimalen Bedingungen).
	Einfachheit der Nutzung	Es ist keine spezielle Expertise notwendig, um die Datenerhebung und/oder Auswertung durchzuführen.
	Akzeptanz	Personen im alltäglichen Straßenverkehr würden die zur Erfassung notwendige Methode (unter optimalen Bedingungen) akzeptieren.
Status quo vs. Potenzial	Rechtssicherheit	Die Interpretation eines Messergebnisses, das eine kritische Müdigkeitsausprägung zeigt, hätte vor Gericht Bestand.
	Status quo	Der Indikator erlaubt nach dem derzeitigen Stand der Technik eine valide Erfassung der Fahrermüdigkeit.
	Potenzial	Der Indikator bietet bei weiteren Forschungsbemühungen ein großes Potenzial zur validen Erfassung der Fahrermüdigkeit

Tab. 7: In der Delphi-Studie verwendeter Gütekriterienkatalog. Der anschließend ergänzte und präziserte Kriterienkatalog ist dargestellt in Tabelle 17

Fahrperformanz	9
Lidschlussverhalten	8
Videobasiertes Expertenrating	5
EEG	4
Pupillographie	4

Tab. 8: Anzahl der Nennungen als valideste Müdigkeitsmessverfahren (3 Nennungen je Teilnehmer möglich)

wurde um eine präzise Operationalisierung gebeten. Diese wird in der nachfolgenden Ergebnisdarstellung bei den jeweiligen Messverfahren aufgeführt.

Die meisten Nennungen entfallen auf die Fahrperformanz. Nachfolgend wird hier unterschieden zwischen den Indikatoren des Lenkverhaltens (6 Nennungen) und denen der Spurhaltung (3 Nennungen), die ein ähnliches, doch nicht völlig identisches Gütebewertungsprofil aufweisen. Die zweithöchste Zahl der Nennungen entfällt auf Maße der Augenaktivität, und zwar ausschließlich auf Indikatoren des Lidschlussverhaltens. Knapp vor dem EEG liegt nach Anzahl der Nennungen das videobasierte Expertenrating. In der Gruppe der peripherphysiologischen Maße dominiert klar die Pupillografie, und zwar v. a. der Pupillografische Schläfrigkeitstest (PST) mit drei Nennungen.

Weiterhin genannt wurden: -

- Time on Task (1 x),
- phonetische Stimmerkmale (1 x),
- periphere Hauttemperatur (1 x),
- Vigilanz- und Daueraufmerksamkeitstests (1 x).

Time on Task ist unstrittig ein hochvalides Anzeichen für das Vorliegen der Fahrermüdigkeit. Da jedoch keine Erfassung der Müdigkeit oder Müdigkeitsfolgen erfolgt, ist eine entsprechende Kategorisierung als Messverfahren fraglich. Die fehlende Passung zum vorgegebenen Auswahlschema mag daher die nur einmalige Nennung erklären. Auf nur einmalig genannte Messverfahren wird in der folgenden Ergebnisdarstellung nicht weiter eingegangen. Ein Überblick über die peripherphysiologischen bzw. testperformanzbasierten Verfahren findet sich in den Kapiteln 3.4.3 und 3.5.3.

Die absolute Häufigkeit der Nennungen vermittelt einen ersten Eindruck über die Validität der genannten Verfahren. Da es Bedingung war, maximal ein Messverfahren je Kategorie (Fahrperformanz, Verhaltensbeobachtung, Testperformanz, Lid-schlussverhalten, EEG und Peripherphysiologie) auszuwählen, kann die getroffene Auswahl von der vorgegebenen Kategorisierung der Messverfahren beeinflusst worden sein. So ist es durchaus denkbar, dass eine Zusammenfassung von EEG und peripherphysiologischen Verfahren in eine Kategorie „Physiologie“ die Anzahl der Nennungen des EEG auf Kosten der Pupillografie erhöht hätte (oder umgekehrt).

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Bewertung der sechs Messverfahren aus Delphi-Runde 1 und 2 (kurz für Delphi-Runde 1 und 2: DEL) und dem Expertenworkshop (kurz: WS) vorgestellt. Die im Workshop diskutierten und bei Bedarf modifizierten Güteprofile zeigen Tabelle 9 bis Tabelle 14. Die Bewertungen beider Delphi-Runden mit Median und Spanne der Beurteilungen finden sich in Kapitel 6.3.3.

6.3.1 Lenkverhalten

Sechs der zwölf Experten wählten das Lenkverhalten als eines der drei validesten Müdigkeitsmessverfahren. Häufiger genannt wurde nur das Lid-schlussverhalten (8 x). Auf die operationalisierende Beschreibung verzichteten drei, die verbleibenden nannten:

- „Lenkwinkeländerungen“ (2 x),
- „Standardabweichung des Betrags der Lenkwinkelgeschwindigkeit“ (1 x).

Messgüte

Die Reliabilität der Müdigkeitserfassung gilt wie bei allen anderen in der Delphi-Studie diskutierten Müdigkeitsmessverfahren als „eher“ gegeben, sofern ein „adäquater Algorithmus“ verwendet und der „Kontext der Erfassung“ berücksichtigt wird. Das bezieht sich insbesondere auf die Differenzierung unterschiedlicher Fahrzeugtypen – bei Pkw-Fahrern sieht man schnelle Lenkbewegungen, während Lkw-Fahrer zu pendeln beginnen [WS]. Die Erkennung beginnender Müdigkeit ist hingegen nur eingeschränkt gewährleistet, das mit „aktuellen Algorithmen erkennbare“ Lenkverhalten ändert sich erst bei starker Müdigkeit [DEL]. Dies beeinträchtigt zwangsläufig auch die Güte der Differenzierung von beginnender und schwerer Müdigkeit. Zusätzlich erschwert wird diese durch die „Plateauphase“ bei Veränderungen im Lenkverhalten, innerhalb derer sich verschiedene Müdigkeitsausprägungen schwer differenzieren lassen [WS]. Da Fahrbahnunebenheiten oder Seitenwind ähnliche Lenkmuster erzeugen, wie man sie von müden Fahrern kennt [DEL], ist die Spezifität eher mäßig. Immerhin zeigt sich das Lenkverhalten im Vergleich als merklich spezifischer als z. B. die Spurposition, nach der bspw. auch ein mäßiger Alkoholkonsum (BAK ≤ 0.05 %) ein der Müdigkeit vergleichbares Ergebnismuster aufweist (BROOKHUIS & de WAARD 1993).

Validität

Die Kriteriumsvalidität und die externe Validität sind – soweit das angesichts des globalen Problems des „fehlenden Goldstandards“ beurteilbar ist [WS] – nach Expertensicht eher gegeben (vgl. auch BROOKHUIS & de WAARD 1993). Hingegen gilt die Generalisierbarkeit der Messwerte aufgrund inter- und intraindividuelle Schwankungen [WS] lediglich als „etwas“ erfüllt, d. h., gleiche Messwerte gehen nicht mit einem vergleichbaren Ausmaß an Müdigkeit einher. Daher ist eine „Ausgangswert-adaption erforderlich“ [DEL]. Dies ist wohl einer der Gründe für das Fehlen akzeptierter Grenzwerte, ab denen eine sichere Teilnahme am Straßenverkehr fraglich wäre. Ein anderer, nicht weniger gewichtiger, liegt in der Abhängigkeit der Lenkwinkelparameter von dem gefahrenen Fahrzeug – und hier

unterscheiden sich selbst Modelle gleicher Hersteller [WS].

Stabilität

Eine willentliche Verfälschung der Messergebnisse ist „eher“ ausgeschlossen, dennoch sollte die „Kreativität“ der Fahrer bei entsprechender Motivation nicht unterschätzt werden [WS]. Jedoch sind Maßnahmen zur Selbstaktivierung und zur Beeinflussung der Messergebnisse für Fahrer bei steigender Müdigkeit nur in eingeschränktem Maße und nur zeitlich begrenzt umsetzbar. Die Winkel- und Momentsensoren sind nicht wahrnehmbar, und die Datenerfassung verläuft vom Nutzer unbemerkt. Daher ist das Messverfahren weder reaktiv, noch ist es intrusiv. Erschwert wird die Messung jedoch durch unterschiedliche Umgebungsfaktoren, z. B. durch Spurrillen, Nebentätigkeiten des Fahrers, unebene Straßen und Strecken innerorts [WS, DEL]. Interpretierbare Daten erhält man nur auf längeren, geraden Streckenabschnitten. Die Müdigkeitserfassung über das Lenkverhalten funktioniert daher zwar auf Überlandstrecken und insbesondere Autobahnen, nicht aber im Stadtverkehr.

Praktikabilität

Die Erfassung des Lenkverhaltens ist problemlos mit der Fahraufgabe vereinbar. Die Erfassung und Auswertung können „in Echtzeit“ erfolgen [DEL], ein hoher Aufwand liegt jedoch in der entsprechenden Expertise und dem „Einbau des Know-hows in ein Produkt“ [DEL]. Wohl aufgrund der vom Nutzer unbemerkten Datenerhebung und -interpretation ist die Akzeptanz dieses Messverfahrens hoch.

Fazit

Die Erfassung des Lenkverhaltens bietet nach dem aktuellen Stand der Forschung eine „eher“ valide Detektion der Fahrermüdigkeit. Mit sechs Nennungen liegt die Erfassung des Lenkverhaltens an zweiter Stelle. Seine Beliebtheit gründet sich v. a. auf die recht hohe externe Validität und die Möglichkeit der vom Fahrer unbemerkten Echtzeiterfassung und Datenauswertung. Damit sind die grundlegendsten Anforderungen eines Messverfahrens zur Auslegung von Müdigkeitswarnsystemen erfüllt (vgl. Kapitel 6.4). Eine Berücksichtigung interindividueller Unterschiede im Lenkverhalten ist notwendig und wird auch durch Baselinevergleiche bei Müdigkeitswarnsystemen entsprechend berücksichtigt. Nachteilig wirkt sich neben der einge-

schränkten Sensitivität die mangelnde Robustheit („zu anfällig für Störeinflüsse“) aus [DEL]. In den kommenden Jahren bietet sich noch ein beachtliches Potenzial, die Müdigkeitserfassung durch weitere Forschungstätigkeiten zu verbessern. Auf lange Sicht hingegen wird bei der absehbaren „Einführung der automatischen Längs- und Querregelung“ auf Autobahnen die Erfassung des Lenkverhaltens an Bedeutung verlieren [WS].

6.3.2 Spurhaltung

Lediglich drei der zwölf Experten wählten die Spurhaltung als eines der drei validesten Müdigkeitsmessverfahren. Nur einer nannte eine konkrete Operationalisierung, und zwar die Standardabweichung der lateralen Spurposition (kurz: SDLP).

Messgüte

In welchem Ausmaß sich die Spurhaltung reliabel erfassen lässt, wurde seitens der Experten kontrovers diskutiert. Bislang gilt die Reliabilität als nicht mit „harten Zahlen“ empirisch abgesichert, und die Expertenurteile bewegen sich in dem Bereich zwischen „etwas“ und „eher“ gegeben [WS]. Die Erkennung beginnender Müdigkeit ist aufgrund der „hohen Automatisierung der Spurhaltung“ aus Expertensicht nur eingeschränkt möglich [DEL]. Gleiches gilt für die Differenzierung unterschiedlicher Müdigkeitsausprägungen, auch wenn sie sich durch Ausschluss von Störfaktoren (z. B. Ablenkung) verbessern lässt [DEL]. Dass beides zumindest im Simulator in gewissem Umfang gegeben ist, zeigt eine Studie, die eine kurvilineare Zunahme der Spurbweichungen mit steigender Müdigkeit (KSS) beschreibt (INGRE et al. 2006a). Aufgrund der geringen Robustheit der Messung gegenüber Fahrer- und Umweltfaktoren (siehe Validität) ist es möglich, dass wache Fahrer fälschlicherweise als müde klassifiziert werden. Die Spezifität gilt damit als nicht gegeben.

Validität

Die Kriteriumsvalidität ist v. a. für Maße der lateralen Spurposition weithin gut belegt. Vergleichbar mit Parametern des Lenkverhaltens gilt deren externe Validität als „eher“ gegeben und vergleichsweise höher als die der anderen nicht fahrerperformanzbasierten Maße (vgl. Kapitel 3.4.1). Die beträchtlichen interindividuellen Unterschiede unabhängig von der vorliegenden Müdigkeit schränken

die Generalisierbarkeit stark ein (INGRE et al. 2006a) und legen eine Individualisierung über Baselinevergleiche nahe. Für die SDLP existieren – vielleicht nicht allgemein bekannte aber unter Experten akzeptierte – Grenzbereiche zur Bestimmung der Fähigkeit zur Fahrzeugführung [WS].

Stabilität

Eine willentliche Manipulierbarkeit der Datenerfassung zur Vortäuschung eines wacheren Zustands ist zwar nicht auszuschließen, erscheint aber eher unwahrscheinlich. Die Datenerhebung (Positionsinformationen im Simulator bzw. kamerabasierte Erfassung der Spurmarkierungen im realen Fahrzeug) erfolgt unbemerkt und ist daher weder reaktiv noch intrusiv. Allerdings beeinflussen unterschiedliche Umgebungsfaktoren die Spurhaltung. Wie auch das Lenkverhalten ist die laterale Spurposition nur auf geraden Strecken interpretierbar. Probleme bei der Müdigkeitsdetektion bereiten schon mäßiger Alkoholkonsum (BROOKHUIS 1993), Ablenkung des Fahrers, Fahrbahneigenschaften oder Seitenwind [DEL]. Bei längeren Analysezeiträumen (mind. 1 Minute) fallen manche Störfaktoren wie z. B. die Fahrbahnbeschaffenheit weniger ins Gewicht [WS].

Praktikabilität

Die Vereinbarkeit mit der Fahraufgabe ist bei fahrperformanzbasierten Maßen unstrittig. Die erfassten Daten können zeitnah ausgewertet werden. Im Vergleich zum Lenkverhalten wird die zur Erfassung und Auswertung erforderliche Expertise als eher gering eingestuft – dies mag jedoch u. a. vom Kontext der Erfassung (z. B. Realfahrzeug vs. Simulator) abhängen. Die Akzeptanz dieses Messverfahrens durch Fahrer im alltäglichen Straßenverkehr dürfte – ähnlich der Erfassung des Lenkverhaltens – recht hoch sein.

Fazit

Die Erfassung der Spurhaltung bietet nach dem aktuellen Forschungsstand eine „eher“ valide Erfassung der Fahrermüdigkeit. Als Maß der Fahrperformanz erscheint die Spurhaltung nach Auswahl durch nur drei (versus sechs) Experten dem Lenkverhalten in seiner Güte nachgeordnet. Dem Bewertungsprofil nach zu urteilen, stünden die Maße der Spurhaltung dem Lenkverhalten allein in ihrer noch geringeren Spezifität und Robustheit nach.

Ansonsten spricht das weitgehend vergleichbare Bewertungsprofil für nur gering nuancierte Güteunterschiede beider Verfahrensgruppen. Die externe Validität steht der des Lenkverhaltens in nichts nach. Zu berücksichtigen ist auch hier die eingeschränkte Übertragbarkeit konkreter Werte der SDLP (cm) oder TLC (s) vom Simulator auf den Straßenverkehr [WS]. Dies mag weniger an den unterschiedlichen Spurbreiten als vielmehr an der ungleich höheren Toleranz der Fahrer gegenüber Spurbabweichungen in einer künstlichen Fahrsituation liegen. Auf mögliche Unterschiede zwischen verschiedenen Parametern wurde bei der Erstellung und Diskussion des Bewertungsprofils kaum eingegangen. Bei der SDLP als dem „mit Abstand am häufigsten untersuchten Maß“ [WS] liegen bereits umfassende Erkenntnisse vor.

Eine gewisse Sensitivität darf hier als belegt gelten (INGRE et al. 2006a). Weniger sensitiv, aber spezifischer erscheint hingegen die TLC. [Die TLC] „appeared to capture the essence of degraded driving performance better than [...] steering, speed, lane position and SDLP“ (VERWEY & ZAIDEL 2000). So akkurat Warnungen an die Fahrer bei einer TLC von 0,5 s auch sein mögen, so kritisch ist der dem Fahrer verbleibende Handlungszeitraum, diese zu beurteilen. Die Voraussetzungen für einen Einsatz von Maßen der Spurhaltung zur Auslegung von Müdigkeitswarnsystemen sind durch die vom Fahrer unbemerkte und zeitnahe Datenerfassung und -auswertung gegeben.

Die im vorherigen Kapitel dargelegte Prognose zum weiteren Potenzial des Lenkverhaltens bei fortführenden Forschungsaktivitäten dürfte im gleichen Maße für die Erfassung der Spurposition gelten: Auf lange Sicht würde bei der Einführung der automatischen Längs- und Querregelung auf Autobahnen die Erfassung der Spurhaltung an Bedeutung verlieren [WS].

6.3.3 EEG

Vier der zwölf Experten wählten das EEG als eines der drei validesten Müdigkeitsmessverfahren. Ein Experte führte keinen konkreten Indikator an, und die anderen drei nannten

- Frequenzbänder (1 x),
- Alphaspindeln (1 x),
- Mikroschlafdichte (1 x).

Messgüte

Die Messgüte des EEG schneidet insgesamt recht gut ab. Die Reliabilität gilt als „eher“ gegeben. Die recht gut bewertete Sensitivität bezieht sich wahrscheinlich eher auf die Analyse der Frequenzbänder (Alpha oder Beta) oder der Alphaspindeln als auf bspw. Mikroschlafepisoden. Eine Differenzierung von beginnender Müdigkeit (mit leichten Abstrichen) und schwerer Müdigkeit ist aus Sicht der Experten möglich, da „prinzipiell graduelle Veränderungen feststellbar“ [DEL] sind. Dass im EEG wache Fahrer zu Unrecht als müde klassifiziert werden, erscheint nach dem allgemeinen Bewertungsprofil eher ausgeschlossen, ist jedoch „stark vom Parameter abhängig“ [DEL]. Die Spezifität ist insbesondere mit Blick auf die Verwendung der Spindeln eher gegeben [WS]. Doch auch der Anteil der Alphaspindeln lässt sich „durch Nebenaufgaben, z. B. Konzentration auf ein Hörbuch und Unterdrückung des visuellen Inputs“ erhöhen [DEL]. Bei Alpha-Wellen ist oft nicht entscheidbar, inwiefern sie durch „Müdigkeit oder durch Entspannung“ entstanden sind [DEL].

Validität

Die Kriteriumsvalidität des EEG („am nächsten dran“ [WS]) ist fraglos gegeben, und mit geringen Einschränkungen auch die externe Validität. Trotz „hoher interindividueller Unterschiede“ [WS] wird die Generalisierbarkeit der Messwerte als „eher“ gegeben bewertet. Mit Baselinevergleichen oder aber der Berechnung der relativen Frequenzänderungen lassen sich interindividuelle Unterschiede teilweise kompensieren und die Interpretierbarkeit deutlich verbessern. Die „interindividuelle Streuung ist relativ gering“ bei Verwendung von Alphaspindeln oder Mikroschlaf-EEG [WS]. Akzeptierte Grenzwerte, ab denen die sichere Teilnahme am Straßenverkehr fraglich ist, liegen auch für EEG-Maße nicht vor.

Stabilität

Das willentliche Vortäuschen eines wacheren Zustands gilt bei Ableitung des EEG als ausgeschlossen. Selbst Experten könnten nicht angeben, wie sie das EEG-Muster wunschgemäß beeinflussen könnten [WS]. Die Messung ist nicht reaktiv, sofern es sich nicht um die Ableitung ereigniskorrelierter Potenziale unter Verwendung von Nebenaufgaben handelt. Die Robustheit gegenüber beeinflussenden Umgebungsfaktoren (z. B. Schwitzen er-

schwert die Signalerfassung [WS]) ist nur „etwas“ gegeben. Mögliche Probleme bei Bewegung der Fahrer hat man generell „recht gut im Griff“ [WS]. Die Einschränkungen dürften für die Erfassung der verschiedenen Frequenzbänder in stärkerem Maße zutreffen als für die vergleichsweise robusten Alphaspindeln (vgl. SCHMIDT 2011). Die hohe Intrusivität der EEG-Ableitung ist trotz erheblicher Fortschritte in den vergangenen Jahren hinsichtlich zunehmend dezenterer Messapparaturen (z. B. Kappe oder Stirnband statt EEG-Haube) nicht ausgeräumt worden. Bis zur erfolgreichen Umsetzung einer kontaktfreien EEG-Messung z. B. im Fahrzeughimmel werden Fahrer die Messung weiterhin als „etwas“ störend empfinden. Und selbst dann bleibt die Frage, wie „berauschend“ Fahrer es fänden, „sich in den Kopf gucken zu lassen“ [WS].

Praktikabilität

Die Erfassung der EEG-Maße ist mit der Fahraufgabe vereinbar. Dies schließt selbstverständlich stationäre EEG-basierte Testverfahren (wie z. B. den Alpha Attenuation Test oder den Karolinska Drowsiness Test) aus. Nur mittlere Güte erreicht die zeitliche Ökonomie der Datenerhebung und -auswertung. Hier ist zudem ein hoher Grad an Expertise erforderlich, um die Datenauswertung adäquat durchzuführen zu können. Die Akzeptanz der Methode durch Fahrer im alltäglichen Straßenverkehr ist merklich eingeschränkt. Dies dürfte insbesondere auf die recht hohe Intrusivität zurückzuführen sein.

Fazit

Die EEG-Messung ermöglicht nach dem derzeitigen Stand der Technik die objektive und „eher“ valide Erfassung der neurophysiologischen Müdigkeitskorrelate. Eine weitgehend robuste Datenerfassung im realen Straßenverkehr ist zumindest zu Forschungszwecken nicht mehr ausgeschlossen. Mit der Entwicklung nur gering bzw. nicht intrusiver Methoden wäre die notwendige Voraussetzung der Nutzerakzeptanz zur alltäglichen Anwendung im Fahrzeug (z. B. Müdigkeitssystem) geschaffen. Neben der technischen Machbarkeit wird letztlich die Akzeptanz der Fahrer die Nagelprobe für eine entsprechende Umsetzung darstellen. Die kann jedoch zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht als erfüllt gelten.

Beträchtliche interindividuelle Unterschiede erschweren die Vergleichbarkeit der Messwerte und

		Lenkverhalten				
		nein	etwas	eher	ja	Konsens
Messgüte	Reliabilität			☒		✓
	Sensitivität		☒			✓
	Differenzierungsfähigkeit		☒			✓
	Spezifität			☒		✓
Validität	Kriteriumsvalidität			☒		✓
	Externe Validität			☒		✓
	Generalisierbarkeit		☒			✓
	Akzeptierte Grenzwerte	☒				✓
Stabilität	Unverfälschbarkeit			☒		✓
	Keine Reaktivität der Messung				☒	✓
	Robustheit		☒			✓
	Keine Intrusivität				☒	✓
Praktikabilität	Vereinbarkeit mit der Fahraufgabe				☒	✓
	Zeitliche Ökonomie				☒	✓
	Einfachheit der Nutzung	☒				✓
	Akzeptanz				☒	✓
Status quo & Potenzial	Status quo			☒		✓
	Potenzial			☒		✓

Tab. 9: Gütebewertung des Lenkverhaltens und Konsens (✓) bzw. Dissens (☒) nach Abschlussworkshop

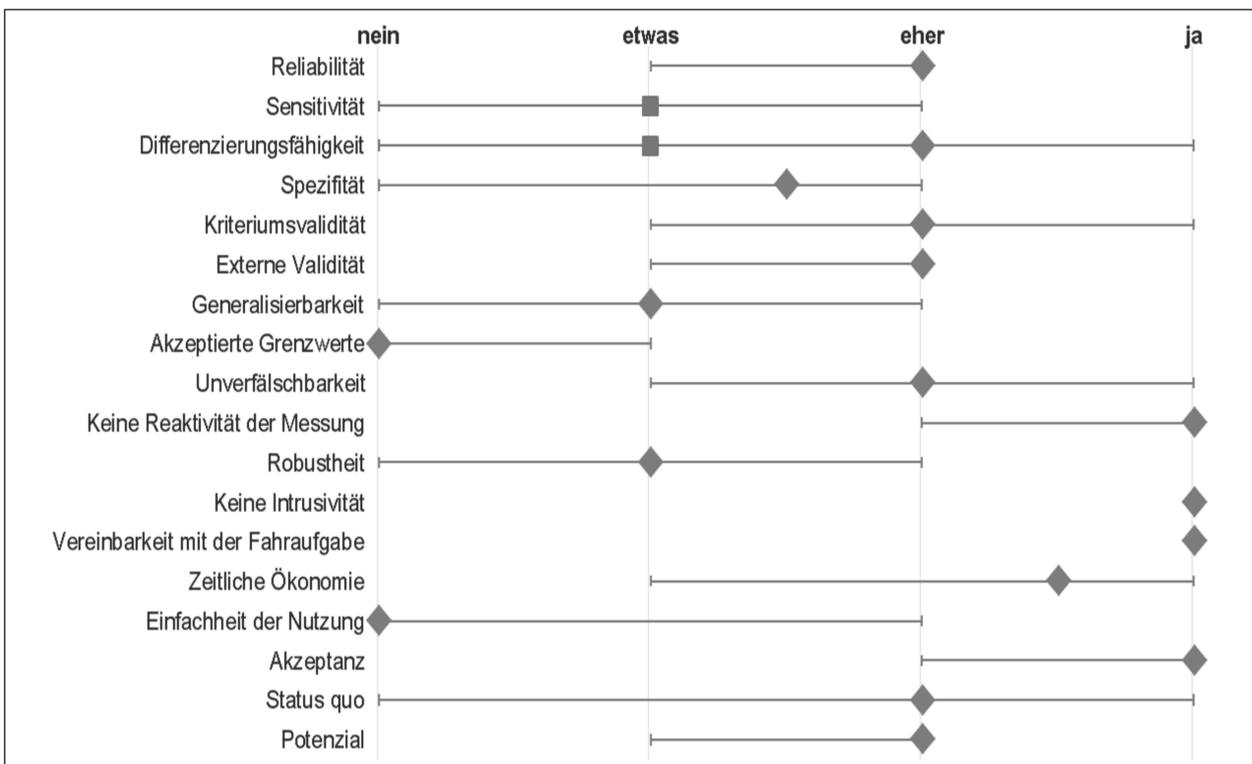


Bild 5: Median und Spannweite der Beurteilung des Lenkverhaltens aus Delphi-Runde 1 (◆) mit max. 6 Bewertungen und Delphi-Runde 2 (■) mit max. 10 Bewertungen

		Spurhaltung				
		nein	etwas	eher	ja	Konsens
Messgüte	Reliabilität		☒	☒		☹
	Sensitivität		☒			✓
	Differenzierungsfähigkeit		☒			✓
	Spezifität	☒				✓
Validität	Kriteriumsvalidität				☒	✓
	Externe Validität			☒		✓
	Generalisierbarkeit		☒			✓
	Akzeptierte Grenzwerte			☒		✓
Stabilität	Unverfälschbarkeit			☒		✓
	Keine Reaktivität der Messung				☒	✓
	Robustheit	☒				✓
	Keine Intrusivität				☒	✓
Praktikabilität	Vereinbarkeit mit der Fahraufgabe				☒	✓
	Zeitliche Ökonomie				☒	✓
	Einfachheit der Nutzung			☒		✓
	Akzeptanz				☒	✓
Status quo & Potenzial	Status quo			☒		✓
	Potenzial			☒		✓

Tab. 10: Gütebewertung der Spurhaltung und Konsens (✓) bzw. Dissens (☹) nach Abschlussworkshop

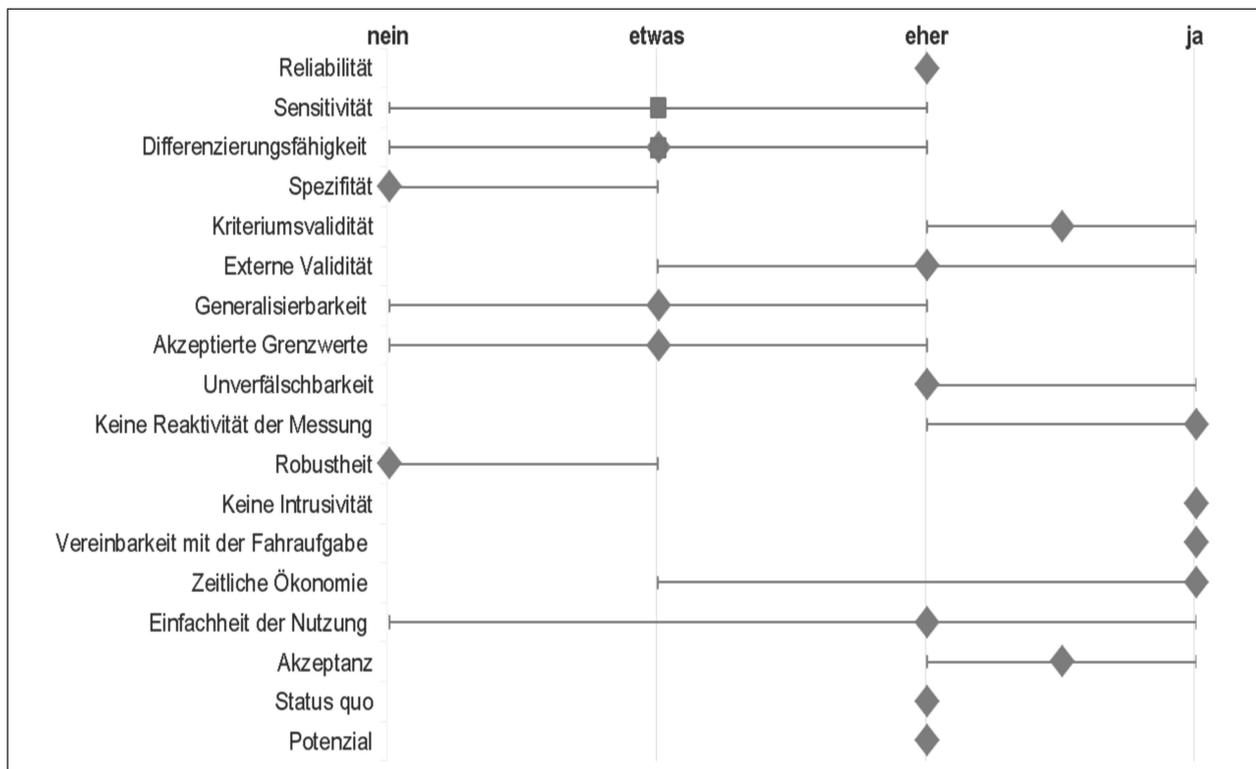


Bild 6: Median und Spannweite der Beurteilung der Spurhaltung aus Delphi-Runde 1 (◆) mit max. 3 Bewertungen und Delphi-Runde 2 (■) mit max. 11 Bewertungen

		EEG				
		nein	etwas	eher	ja	Konsens
Messgüte	Reliabilität			☒		✓
	Sensitivität			☒		✓
	Differenzierungsfähigkeit				☒	✓
	Spezifität			☒		✓
Validität	Kriteriumsvalidität				☒	✓
	Externe Validität				☒	✓
	Generalisierbarkeit			☒		✓
	Akzeptierte Grenzwerte	☒				✓
Stabilität	Unverfälschbarkeit				☒	✓
	Keine Reaktivität der Messung				☒	✓
	Robustheit		☒			✓
	Keine Intrusivität		☒			✓
Praktikabilität	Vereinbarkeit mit der Fahraufgabe				☒	✓
	Zeitliche Ökonomie			☒		✓
	Einfachheit der Nutzung	☒				✓
	Akzeptanz		☒			✓
Status quo & Potenzial	Status quo			☒		✓
	Potenzial				☒	✓

Tab. 11: Gütebewertung des EEG und Konsens (✓) bzw. Dissens (☒) nach Abschlussworkshop

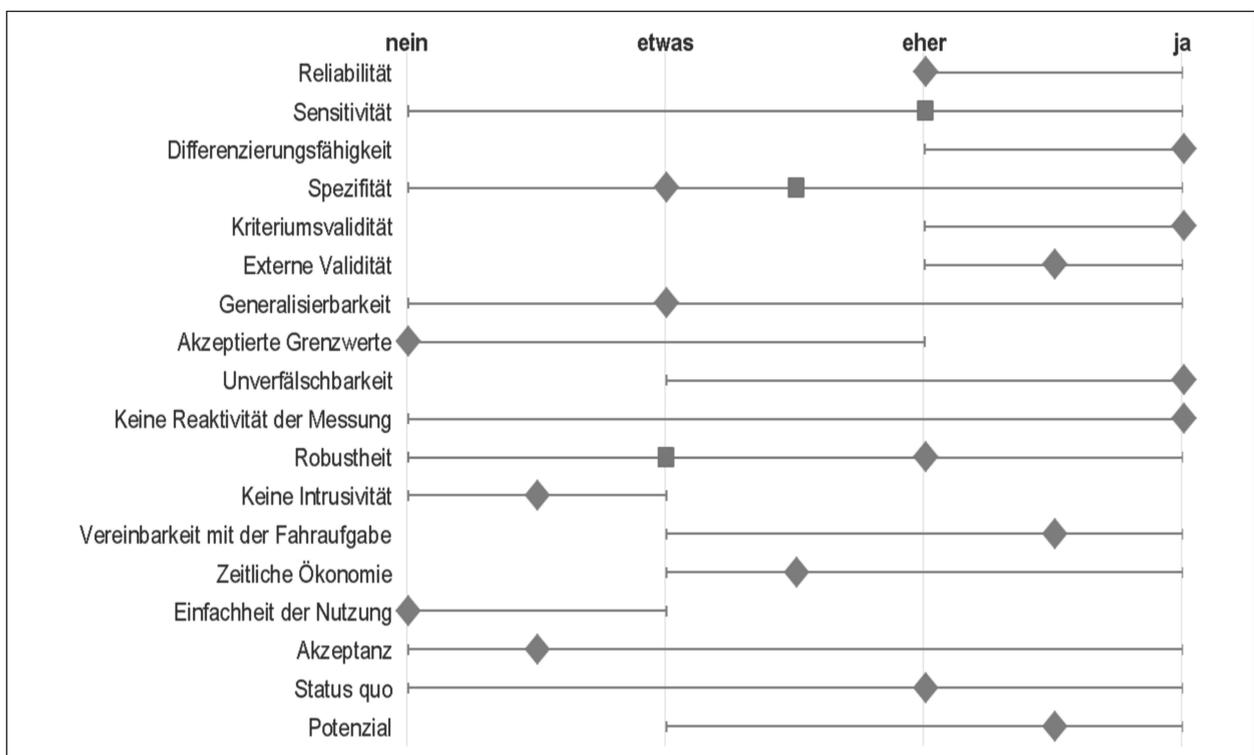


Bild 7: Median und Spannweite der Beurteilung des EEG aus Delphi-Runde 1 (◆) mit max. 4 Bewertungen und Delphi-Runde 2 (■) mit max. 10 Bewertungen

Lidschlussverhalten		nein	etwas	eher	ja	Konsens
Messgüte	Reliabilität			☒		✓
	Sensitivität			☒		✓
	Differenzierungsfähigkeit			☒		✓
	Spezifität		☒			✓
Validität	Kriteriumsvalidität			☒		✓
	Externe Validität			☒		✓
	Generalisierbarkeit			☒		✓
	Akzeptierte Grenzwerte		☒			✓
Stabilität	Unverfälschbarkeit		☒			✓
	Keine Reaktivität der Messung				☒	✓
	Robustheit			☒		✓
	Keine Intrusivität			☒		✓
Praktikabilität	Vereinbarkeit mit der Fahraufgabe				☒	✓
	Zeitliche Ökonomie			☒		✓
	Einfachheit der Nutzung		☒			✓
	Akzeptanz			☒		✓
Status quo & Potenzial	Status quo			☒		✓
	Potenzial			☒		✓

Tab. 12: Gütebewertung des Lidschlussverhaltens und Konsens (✓) bzw. Dissens (☒) nach Abschlussworkshop

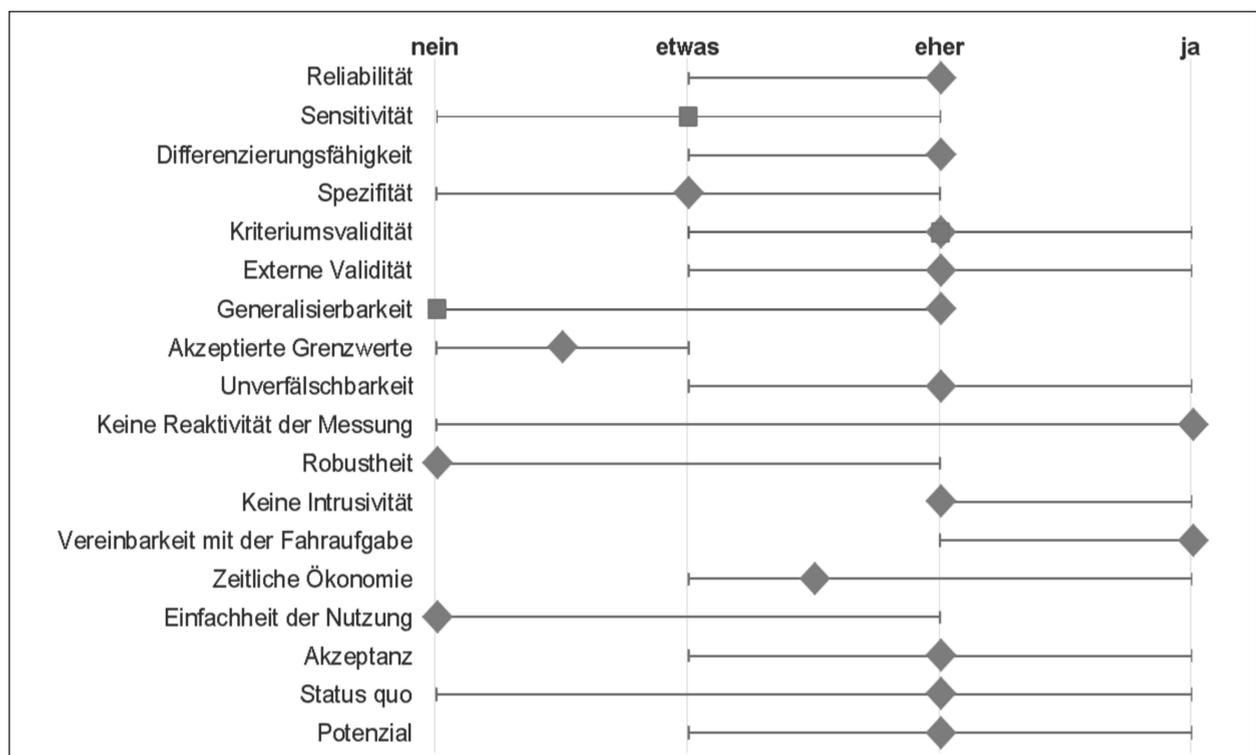


Bild 8: Median und Spannweite der Beurteilung des Lidschlussverhaltens Expertenratings aus Delphi-Runde 1 (◆) mit max. 5 Bewertungen und Delphi-Runde 2 (■) mit max. 11 Bewertungen

Videobasiertes Expertentraining						
		nein	etwas	eher	ja	Konsens
Messgüte	Reliabilität			☒		✓
	Sensitivität			☒		✓
	Differenzierungsfähigkeit			☒		✓
	Spezifität			☒		✓
Validität	Kriteriumsvalidität				☒	✓
	Externe Validität				☒	✓
	Generalisierbarkeit			☒		✓
	Akzeptierte Grenzwerte		☒			✓
Stabilität	Unverfälschbarkeit		☒			✓
	Keine Reaktivität der Messung				☒	✓
	Robustheit			☒		✓
	Keine Intrusivität			☒		✓
Praktikabilität	Vereinbarkeit mit der Fahraufgabe				☒	✓
	Zeitliche Ökonomie	☒				✓
	Einfachheit der Nutzung	☒				✓
	Akzeptanz		☒			✓
Status quo & Potenzial	Status quo			☒	☒	⬢
	Potenzial				☒	✓

Tab. 13: Gütebewertung der videobasierten Expertenbeurteilung und Konsens (✓) bzw. Dissens (⬢) nach Abschlussworkshop

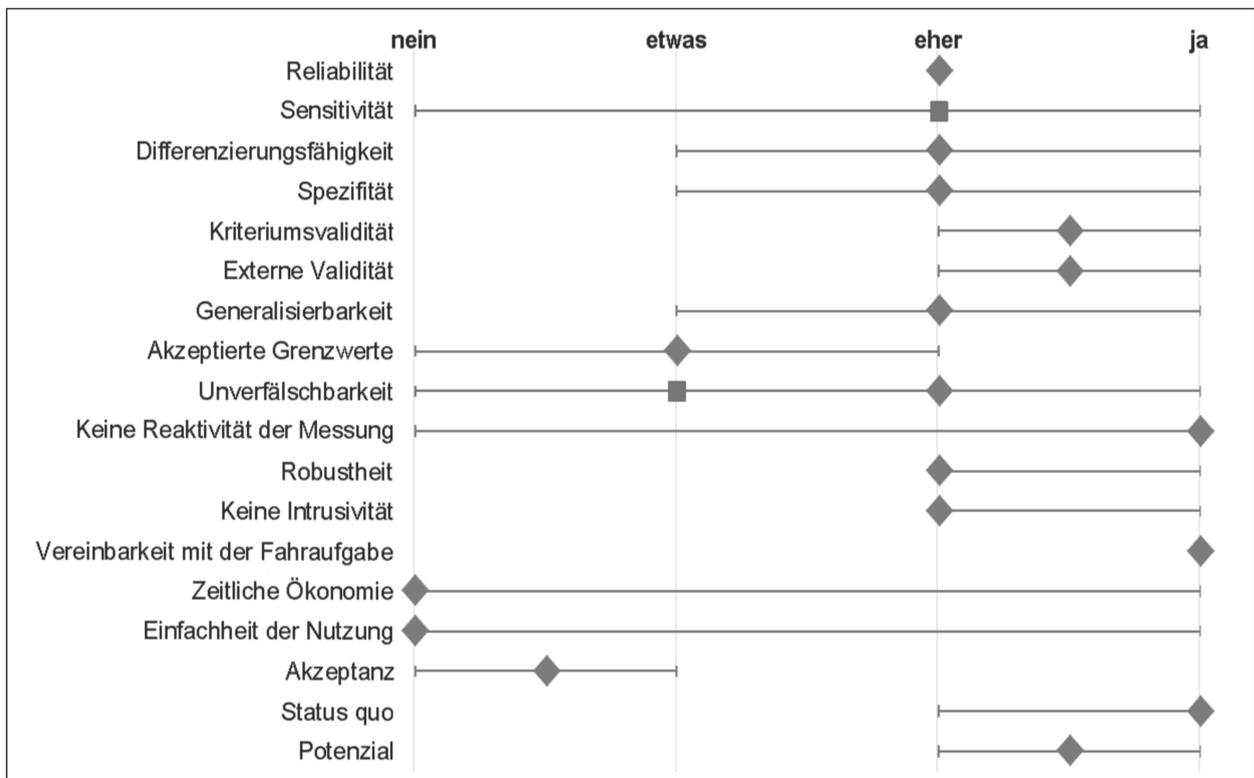


Bild 9: Median und Spannweite der Beurteilung des videobasierten Expertenratings aus Delphi-Runde 1 (◆) mit max. 5 Bewertungen und Delphi-Runde 2 (■) mit max. 11 Bewertungen

Pupillografischer Schläfrigkeitstest		nein	etwas	eher	ja	Konsens
Messgüte	Reliabilität			☒		✓
	Sensitivität			☒		✓
	Differenzierungsfähigkeit		☒		☒	⚡
	Spezifität			☒		✓
Validität	Kriteriumsvalidität	☒		☒		⚡
	Externe Validität		☒			✓
	Generalisierbarkeit			☒	☒	⚡
	Akzeptierte Grenzwerte		☒			✓
Stabilität	Unverfälschbarkeit				☒	✓
	Keine Reaktivität der Messung	☒			☒	⚡
	Robustheit				☒	✓
	Keine Intrusivität	☒				✓
Praktikabilität	Vereinbarkeit mit der Fahraufgabe	☒				✓
	Zeitliche Ökonomie		☒			✓
	Einfachheit der Nutzung			☒		✓
	Akzeptanz				☒	✓
Status quo & Potenzial	Status quo				☒	✓
	Potenzial				☒	✓

Tab. 14: Gütebewertung des PST und Konsens (✓) bzw. Dissens (⚡) nach Abschlussworkshop

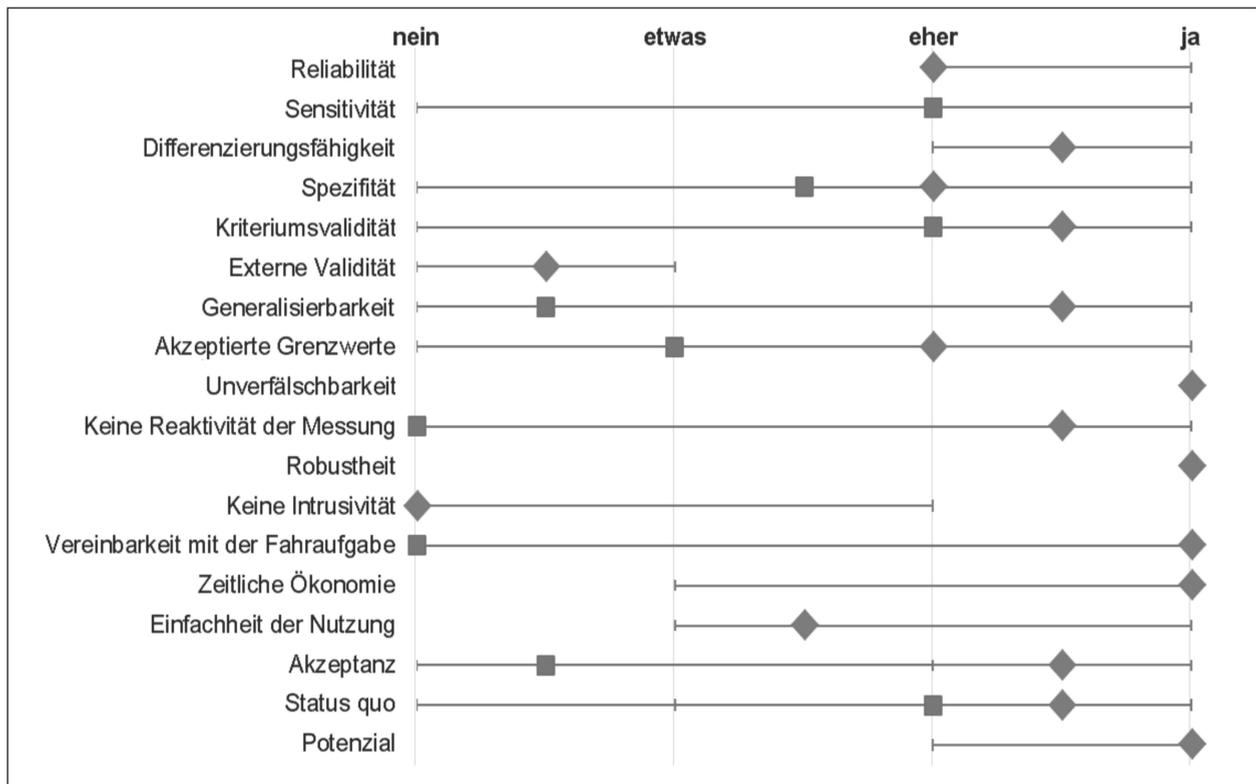


Bild 10: Median und Spannweite der Beurteilung des pupillografischen Schläfrigkeitstest (PST) aus Delphi-Runde 1 (◆) mit max. 4 Bewertungen und Delphi-Runde 2 (■) mit max. 10 Bewertungen. Eine der vier Bewertungen aus Delphi-Runde 1 bezieht sich auf pupillografische Variablen im Allgemeinen und nicht explizit auf den PST

korrespondierender Müdigkeitsstadien über unterschiedliche Fahrer. Darüber hinaus bedarf es eines beträchtlichen Maßes an Expertise zur angemessenen Analyse der EEG-Daten.

Es besteht ein enormes Potenzial, durch weitere Forschungsaktivitäten die valide Müdigkeitsdetektion bei Fahrern weiter auszubauen. Das EEG wird, so die Prognose, in den kommenden Jahren „mit der Signalanalyse explodieren“ [WS].

6.3.4 Lidschlussverhalten

Acht der zwölf Experten wählten die Augenaktivität als eines der drei validesten Müdigkeitsmessverfahren aus. Damit liegt dieses Messverfahren nach Anzahl der Nennungen vor allen anderen hier (Kapitel 6.3) dargestellten Messverfahren. Genannt wurden dabei ausschließlich Indikatoren des Lidschlussverhaltens, und zwar folgende (Mehrfachnennungen bei drei Experten):

- Lidschlussverhalten (3 x),
- Lidschlussdauer (3 x),
- Lidschlussfrequenz (2 x),
- (maximale) Lidöffnungsgeschwindigkeit (2 x),
- Lidschlussgeschwindigkeit (1 x).

Messgüte

Die Reliabilität der Erfassung des Lidschlussverhaltens wird als „eher“ erfüllt beurteilt. Gleichmaßen wird auch die Eignung des Messverfahrens zur Erkennung beginnender Müdigkeit und deren Differenzierung zu schwerer Müdigkeit bewertet. Müdigkeitsbedingte Änderungen im Lidschlussverhalten zeigen sich, bevor Änderungen bei der Spurhaltung oder im EEG sichtbar werden [WS]. Mit steigender Abtastrate (500 Hz und mehr) ließe sich die Sensitivität auch weiter verbessern [WS]. Dabei unterscheiden sich die einzelnen Indikatoren des Lidschlussverhaltens nicht unwesentlich. Die Lidschlussfrequenz gilt als sensitiver als die Lidschlussdauer, „da zunehmende Frequenz nachlassende Vigilanz anzeigt“ [DEL]. Bei anderen gängigen, in der Delphi-Befragung nicht genannten Müdigkeitsindikatoren wie z. B. PERCLOS oder dem Sekundenschlaf sind hingegen die Erkennung beginnender Müdigkeit und damit auch die Differenzierungsfähigkeit nicht gewährleistet. Wie die meisten Müdigkeitsmessverfahren (Ausnahme: EEG, videobasiertes Expertenrating) ermöglicht

auch das Lidschlussverhalten keine spezifische Erfassung. Störgrößen können mit Müdigkeit vergleichbare Messwerte hervorrufen (vgl. nachfolgend die Stabilität).

Validität

Die Kriteriumsvalidität gilt „im Labor, nicht im Feld“ als „eher“ gegeben [DEL]. Trotz dieser Einschränkung erhält die externe Validität ein hohes Urteil. Ebenfalls positiv beurteilt wird die Generalisierbarkeit der Messergebnisse („eher“). Fraglos gibt es interindividuelle Unterschiede in der Ausprägung der Messwerte und der damit verbundenen Müdigkeit. Intraindividuelle Baselinevergleiche („wache Ausgangswerte“ [DEL]) verbessern auch hier die Güte der Müdigkeitserfassung essenziell. Bei schwerer Müdigkeit und somit auch bei weniger sensitiven Indikatoren (PERCLOS, Sekundenschlaf) verschwinden interindividuelle Unterschiede zunehmend und verbessern die Vergleichbarkeit der Messwerte zwischen Probanden. Probleme bereitet jedoch mitunter die Lidschlusserfassung bei Fahrern mit asiatisch geprägter Physiognomie [WS]. Akzeptierte Grenzwerte, ab denen eine sichere Teilnahme im Straßenverkehr als fraglich gilt, gibt es auch für das Lidschlussverhalten nicht oder nur eingeschränkt. Dabei mangelt es eher an der allgemeinen Akzeptanz der Grenzwerte als an entsprechenden Vorschlägen. Bei Auftreten von Sekundenschlaf mag die Fahrtüchtigkeit von Fahrern mehr als fraglich sein, dennoch ist die absolute Dauer, ab der ein Lidschluss als Sekundenschlaf gilt, in der Forschung recht heterogen definiert (vgl. Kapitel 3.5.1).

Stabilität

Eine willentliche Verfälschung der Messergebnisse zur Vortäuschung eines wacheren Zustands erscheint durchaus möglich. Bei längeren Messzeiträumen und mit steigender Müdigkeit schwindet diese Möglichkeit zunehmend. Die Messung ist nur teilweise („etwas bis eher“) robust. Unterschiedliche Umgebungsfaktoren („wechselnde Lichtverhältnisse, Niesen, Wegdrehen, Fehlerfassung durch Reflektionen auf Brillengläsern“ [DEL]) können die Messung stark beeinflussen. Teilweise lässt sich dies durch längere Analysezeiträume (> 2 min) ausgleichen: So wurde die Robustheit des Lidschlussverhaltens gegenüber Störgrößen wie z. B. Gegenverkehr, Lichteinfall oder das Gebläse der Klimaanlage empirisch belegt [WS]. Die Messung des Lidschlussverhaltens gilt als „etwas“ intrusiv, da

zur Erfassung Elektroden um das Auge des Fahrers angebracht (EOG) oder eine Kamera auf das Auge des Fahrers gerichtet werden muss. Eine Beeinflussung der bestehenden Fahrermüdigkeit durch die Messung ist jedoch nicht gegeben, d. h., die Erfassung des Lidschlussverhaltens (und der Augenaktivität generell) ist nicht reaktiv.

Praktikabilität

Die Erfassung des Lidschlussverhaltens interferiert nicht mit der Fahraufgabe. Die Ökonomie der Erfassung gilt als mittelmäßig („etwas bis eher“), auch die Einfachheit der Nutzung ist – für den Forscher, nicht den Fahrer – nur eingeschränkt gegeben. Selbst wenn die notwendige Expertise bereits im Messgerät implementiert ist, ist ein gewisses Maß an Expertise zum richtigen Umgang mit den Daten notwendig [WS]. Dass Personen im alltäglichen Straßenverkehr die Erfassung des Lidschlussverhaltens akzeptieren, erscheint möglich („eher“), doch „Akzeptanzprobleme“ können auch bei einer kontaktfreien, kamerabasierten Messung auftreten [DEL].

Fazit

Die Erfassung des Lidschlussverhaltens erlaubt nach dem derzeitigen Stand der Technik eine valide Detektion der Fahrermüdigkeit. Mit acht von zwölf möglichen Nennungen zählt es für die Mehrheit der befragten Experten zu den validesten Müdigkeitsmessverfahren. Zudem liegen für eine Vielzahl unterschiedlicher Einzelindikatoren umfassende Forschungsbefunde vor, insbesondere für die Lidschlussdauer und die Lidschlussfrequenz. Geschwindigkeitsbasierte Indikatoren (Lidöffnungsgeschwindigkeit/Lidschlussgeschwindigkeit) scheinen nach der Expertenbefragung von hoher Relevanz, sind jedoch in der Forschungslandschaft vergleichsweise selten vertreten. Möglicherweise ist dies auf die Problematik der zeitlichen Auflösung der verwendeten Messtechnik (hohe Samplerate erforderlich) zurückzuführen. Die Abhängigkeit von den Ausgangswerten, d. h. die eingeschränkte Generalisierbarkeit, stellt eine „starke Limitierung des Verfahrens“ dar, sodass es „nur für bestimmte Anwendungen geeignet“ ist [DEL]. Der Wert des Lidschlussverhaltens bei Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Erfassung der Fahrermüdigkeit ist damit unbestritten. Die Eignung des Lidschlussverhaltens zum Monitoring des Fahrerzustands (Müdigkeitswarnsystem im Fahrzeug) gilt jedoch als eingeschränkt. Beim Einsatz der notwendigen

Messverfahren im realen Straßenverkehr können die jeweiligen Lichtbedingungen, die Physiognomie des Fahrers oder das Tragen einer Brille erhebliche Probleme bereiten. Weitere Forschungsaktivitäten bieten ein „eher“ großes Potenzial, die Validität der Müdigkeitserfassung weiter zu verbessern, z. B. über „verbesserte Sensortechnik“ [DEL]. Auch sind „die vielfältigen Eigenschaften der Lidschlussbewegungen noch nicht abschließend untersucht“, und die Studienlage ist „dünn in realen Fahrsituationen“ [DEL].

6.3.5 Videobasierte Expertenbeurteilung

Fünf der zwölf Experten wählten das videobasierte Expertenrating als eines der drei validesten Müdigkeitsmessverfahren. Konkrete Beurteilungsskalen zur Müdigkeitsbewertung wurden hier nicht namentlich aufgeführt.

Messgüte

Die Messgüte wird durchgehend als „eher“ gegeben beurteilt. Studien belegen die zufriedenstellende Intrarater-, Interrater- und Retestreliabilität (vgl. WIERWILLE & ELLSWORTH 1994) zumindest für das endgültige Gesamturteil (z. B. mittlere Müdigkeit), nicht für die einzelnen Dimensionen der Bewertungsskalen (z. B. Mimik, Körperspannung). Unerlässlich dafür ist jedoch die „genügende Schulung“ der Bewerter (daher: Expertenrating) [DEL]. Auch die Sensitivität ist „eher“ erfüllt. Sie ist jedoch „abhängig von den Beurteilungsvariablen“ [DEL]. Auch wenn „anfängliche Müdigkeitserscheinungen kompensiert werden“, sind „typische Verhaltensweisen beobachtbar, die schon Gegenmaßnahmen sind, z. B. hin und her rutschen“ [DEL]. Die Skalierung der Bewertungsskalen schafft die grundlegende Voraussetzung für eine Differenzierung zwischen Wachheit, beginnender, mittlerer und schwerer Müdigkeit. Eingeschränkt ist die Differenzierungsfähigkeit durch Fehlerurteile, die auch bei hoher Interraterreliabilität nicht auszuschließen sind, insbesondere bei der Erkennung beginnender Müdigkeit. Dass wache Probanden fälschlich als müde klassifiziert werden, ist nicht gänzlich auszuschließen. Möglich ist, dass reduzierte Blickaktivität oder Sekundärhandlungen als Müdigkeit ausgelegt werden, während sie vielmehr Folge der geringen Anforderungen an den Fahrer und auftretender Langeweile sind, z. B. bei monotonen Fahrbedingung (Autobahnfahrten mit wenig Verkehr). Hier stößt die „menschliche Expertise“ an ihre Grenzen [DEL].

Validität

Die Kriteriumsvalidität und die externe Validität werden als recht hoch bewertet. Die Beurteilungen korrelieren hoch mit anderen Messverfahren wie z. B. Lidschluss und Selbstbeurteilung, auch der Zusammenhang zur eingeschränkten Fahrperformanz ist belegt (SCHLEICHER et al. 2008; WIERWILLE et al. 1994). Die Generalisierbarkeit gilt als „eher“ gegeben. Doch reagieren Fahrer sehr unterschiedlich auf Müdigkeit [WS], das Auftreten und die Charakteristik einzelner Beobachtungsmerkmale (Lidschluss, Blickaktivität etc.) unterscheiden sich teils beträchtlich von Fahrer zu Fahrer. Ein individueller Baselinevergleich verbessert auch bei diesem Messverfahren die Güte der Beurteilung erheblich. Akzeptierte Grenzwerte, ab denen eine sichere Teilnahme am Straßenverkehr infrage gestellt ist, liegen auch für dieses Verfahren eher nicht vor.

Stabilität

Die Möglichkeit, einen wacheren Zustand vorzutäuschen, ist bei entsprechender Motivation gegeben, schwindet aber bei hoher Müdigkeit und längeren Beobachtungszeiträumen zunehmend [DEL]. Die Messung gilt als nicht reaktiv. Ein gewisses Maß an Intrusivität ist aufgrund der Videoaufnahmen des Fahrers nicht vermeidbar. Die Robustheit des Messverfahrens gilt als „eher“ erfüllt. Die Müdigkeit beeinflussende Umgebungsfaktoren, wie z. B. kurzfristige (Selbst-)Aktivierungen durch situative Faktoren (z. B. fordernde Fahrmanöver, Trinken, Unterhaltungen mit Mitfahrer), können in der Beurteilung mit berücksichtigt werden.

Praktikabilität

Die Messung ist mit der Fahraufgabe gut vereinbar, und die Auswertung erfolgt offline. Die Bewertung durch geschulte Experten ist zeitaufwändig. Das Ausmaß des zeitlichen Aufwands wird maßgeblich bestimmt durch Länge (meist 1-minütig) und Anzahl der zu bewertenden Videoabschnitte. Die Auswertung sollte ausschließlich von gut geschulten Bewertern durchgeführt werden. Bei einer Anwendung des Verfahrens im alltäglichen Straßenverkehr wäre die Akzeptanz bei den Fahrern mehr als zweifelhaft.

Fazit

Dieses Messverfahren erlaubt nach dem derzeitigen Stand eine („eher“) valide Erfassung der

Fahrermüdigkeit. Dissens herrscht bezüglich des Ausmaßes der Validität, denn nicht alle Experten sehen das Kriterium als uneingeschränkt erfüllt [WS]. Unstrittig bleibt die hohe Augenscheinvalidität. Vorteilhaft sind die Aggregation unterschiedlicher Verhaltensindikatoren (Lidschluss, Körperspannung, Mimik, ...) und damit die breitere Bewertungsbasis im abschließenden Urteil, sodass auch die hohen interindividuellen Unterschiede bei auftretender Müdigkeit festgehalten werden können. Im Gegensatz zu zeitlich hoch auflösender Messtechnik sind jedoch nuancierte Unterschiede bei der videobasierten Beurteilung des Lidschlussverhaltens nicht erkennbar. Weitere Vorteile des Messverfahrens liegen in der Berücksichtigung situativer und personenbedingter Einflüsse auf das beobachtbare Fahrerverhalten bei der Beurteilung der Fahrermüdigkeit. Im Gegensatz zur Selbstbeurteilung können Mehrfachbeurteilungen angewandt werden, um die Reliabilität der Messung zu verbessern. Nachteilig sind die aufwändige Erfassung und die Notwendigkeit einer gründlichen (und regelmäßig zu wiederholenden) Schulung der Bewerter. Das Messverfahren bietet aus Expertensicht ein recht hohes Potenzial zur validen Müdigkeitsdetektion bei weiteren Forschungsaktivitäten. Dieses Potenzial ist insbesondere in der nicht gegebenen Skalierbarkeit unterschiedlicher Müdigkeitsausprägungen der anderen objektiven Messverfahren begründet [WS]. Ein Einsatz außerhalb der Forschung und Entwicklung, so z. B. als Online-Monitoring für Berufskraftfahrer, erscheint aufgrund mangelnder Akzeptanz nicht umsetzbar.

6.3.6 Pupillografischer Schläfrigkeitstest

Vier der zwölf Experten wählten die Pupillografie als eines der drei validesten Müdigkeitsmessverfahren. Die einmalige Nennung „pupillografischer Variablen“ lässt sich nur eingeschränkt mit den drei anderen Nennungen des in seiner Durchführung standardisierten und hinsichtlich des Messvorgangs (und damit auch des Bewertungsprofils) nicht vergleichbaren Pupillografischen Schläfrigkeitstest (PST) vergleichen.

- Pupillografische Variablen,
- Pupillografischer Schläfrigkeitstest, kurz: PST (1 x),
- Pupillenunruheindex, kurz: PUI (2 x). Stellt die am häufigsten berichtete Kenngröße des PST dar.

Messgüte

Die Reliabilität und die Sensitivität des PST gelten als „eher“ erfüllt, ein „Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass es kontinuierliche Parameter liefert, die auch beginnende Schläfrigkeit detektieren lassen“ [DEL]. Der mittelmäßigen Spezifität zufolge ist eine Fehlklassifizierung wacher Fahrer als müde möglich (vgl. Reaktivität). Die Fähigkeit des PST zur validen Differenzierung zwischen beginnender und schwerer Müdigkeit ist unter Experten sehr umstritten [WS]. Die kritische Beurteilung steht in Zusammenhang mit der ebenfalls kritisch diskutierten Kriteriumsvalidität und Reaktivität [WS]. Die positiveren Bewertungen gründen zum einen auf dem Vorliegen von Normwerten für normale, auffällige und kritische Werte (WILHELM 2007) und zum anderen auf Studien, die signifikante Korrelationen des PUI zu anderen Müdigkeitsmessverfahren aufzeigen (SCHNIEDER et al. 2012; WILHELM 2007; WEIL VEGA 2007).

Validität

Die externe Validität des PST wird als gering bewertet. Ein Zusammenhang zwischen dem PUI und einer beeinträchtigten Fahrtüchtigkeit im realen Straßenverkehr ist bislang nicht belastbar belegt, es besteht „weiterer Forschungsbedarf“ [WS]. Strittig ist das Ausmaß der Generalisierbarkeit. Die einen verweisen auf die existierenden Normwerte: „Identische Messwerte bei unterschiedlichen Personen zeigen vergleichbare Müdigkeitsausprägungen“ [DEL], die anderen befürworten den „intraindividuellen Vergleich“ [DEL] mit der individuellen Baseline. Allgemein akzeptierte Grenzwerte, ab denen eine sichere Teilnahme am Straßenverkehr fraglich ist, liegen nicht vor. Die existierenden Normwerte wurden auf Basis einer „statistischen Norm festgelegt ohne Mapping zur Müdigkeit“ [WS].

Stabilität

Eine willentliche Verfälschung der Messergebnisse des PST gilt als ausgeschlossen. Da die Messung in einem ruhigen Raum unter Abschirmung äußerer Einflüsse stattfindet, ist die Robustheit gewährleistet, doch die Anwendung während der Fahrt ausgeschlossen. Der wohl umstrittenste Aspekt in der Diskussion um den PST betrifft das Ausmaß der Reaktivität der Messung. Die einen vertreten die Ansicht, dass durch das elfminütige ruhige Sitzen im Dunkeln eher ein Erholungseffekt eintritt, der

sich mit der müdigkeitsinduzierenden Testsituation in etwa die Waage hält [DEL]. Die anderen sind der Überzeugung, dass das Setting eher eine starke Müdigkeit bis hin zum Einschlafen hervorruft [DEL]. Dass Studien mehrfach vom Einschlafen der Probanden während der Messung berichten, wurde bislang auf die Müdigkeit der Probanden attribuiert. Eine Studie mit gesunden, nicht schlafdeprivierten Probanden, die Einschlafereignisse während der Messung berichtet, wirft jedoch berechtigte Zweifel an der Nichtreaktivität des PST auf (STUIBER 2006). Aufgrund der zur Messung erforderlichen Rahmenbedingungen (elfminütiges Sitzen im Dunkeln und Fixieren eines Lichtpunkts) wird das Verfahren als intrusiv bewertet.

Praktikabilität

Dass die Messung während der Fahrt nicht möglich ist, bedarf keiner weiteren Erklärung. Die zeitliche Ökonomie der Messung ist eingeschränkt. Derzeit laufen bei AmTech (Systemhersteller des PST) Bemühungen, die Messdauer von elf auf sechs Minuten zu verkürzen. Die Auswertung hingegen ist automatisiert und damit unaufwändig. Die zur Messung erforderliche Expertise kann in einer halbtägigen Schulung vermittelt werden [DEL]. Eher hoch wurde die Akzeptanz bewertet, mit der Fahrer im alltäglichen Straßenverkehr die zur Erfassung notwendige Prozedur aufnehmen würden. Das ist recht überraschend, da die Messung einen „starken Eingriff“ darstellt, der „nur in Extremsituationen akzeptabel“ ist [DEL].

Fazit

Der PST erlaubt nach dem derzeitigen Forschungsstand eine „eher“ valide Müdigkeitsdetektion. Die Eignung des PST in der schlafmedizinischen Diagnostik wird hier nicht infrage gestellt. Doch ist bislang der Zusammenhang zwischen dem PUI und einer beeinträchtigten Fahrtüchtigkeit im realen Straßenverkehr nicht belastbar belegt.

Bestechend ist der Vorteil der standardisierten Versuchsdurchführung und der objektiven Ergebnisinterpretation auf Basis der vorliegenden Normwerte. Dies dürfte neben der Unverfälschbarkeit und Robustheit mit der Grund dafür sein, dass von allen diskutierten Messverfahren einzig der PST für einen Einsatz bei Verkehrskontrollen durch die Polizei in Betracht gezogen wurde. Dafür wäre jedoch der belastbare Nachweis einer (v. a. extern) validen Messung ebenso erforderlich wie der glaub-

würdige Beleg der Nichtreaktivität der Messung. Auch zeugen hoch abweichende Normwerte nicht unmittelbar von vorliegender Fahrermüdigkeit – sie geben lediglich Aufschluss über die Verteilung der Werte in der Population der 20- bis 60-Jährigen. Die Anwendung der Normwerte zur Ableitung des Anteils müder Fahrer auf Autobahnen liefert angesichts des Forschungsstands keine belastbaren Aussagen.

Das Potenzial des PST zur validen Erfassung der Fahrermüdigkeit wird als hoch bewertet. Weitere Forschungsaktivitäten werden zeigen, wie sich der im Kontext der Fahrermüdigkeitserfassung noch nicht etablierte PST bewährt.

6.4 Eignung der Messverfahren für unterschiedliche Einsatzgebiete

6.4.1 Vorgehen

Ziel war es, die Eignung der Messverfahren für die drei folgenden Einsatzgebiete zu beurteilen:

- **Forschung & Entwicklung:** Grundlagenforschung und Entwicklung von Technologien zur Müdigkeitserfassung.
- **Müdigkeitswarnsystem im Fahrzeug:** anwendungsreifes Warnsystem für private und kommerziell tätige Kraftfahrzeugführer.
- **Verkehrskontrolle:** Identifizierung eines kritischen Müdigkeitszustands im Rahmen einer Verkehrsüberwachung mit den entsprechenden verkehrsrechtlichen Konsequenzen für den Fahrer.

Dazu beurteilten die zwölf Experten in Delphi-Runde 1 anhand des Kriterienkatalogs (vgl. Tabelle 7), ob die Erfüllung der Gütekriterien für die drei genannten Einsatzbereiche a) notwendig, b) wünschenswert oder c) nicht relevant ist. Die drei Anforderungsprofile mit den Kriterien, die die Messverfahren bei einem entsprechenden Einsatz erfüllen müssen, sind in Tabelle 15 aufgeführt. Nicht in das Anforderungsprofil aufgenommen wurden die Kriterien, deren Erfüllung lediglich als wünschenswert galt. Bei nicht einstimmigen Urteilen entschied man sich für das meistgenannte Urteil.

Auf Basis der in Tabelle 15 erstellten Anforderungsprofile beurteilten die zwölf Teilnehmer in Delphi-Runde 2 die Eignung der Messverfahren für die un-

terschiedlichen Einsatzgebiete. Folgende Antwortoptionen waren zur Auswahl gestellt:

- ja (geeignet),
- nein (nicht geeignet),
- vorausgesetzt, dass ... (bedingte Eignung unter der Voraussetzung, dass bestimmte Anforderungen erfüllt werden).

Die Ergebnisse der Zuordnung der sechs Müdigkeitsmessverfahren zu Einsatzgebieten werden nachfolgend erläutert. Eine Übersicht der Zuordnungen bietet Tabelle 16.

Die Reliabilität, die Kriteriumsvalidität und die Nichtreaktivität der Messverfahren müssen unabhängig vom Einsatzzweck gegeben sein. Ein Einsatz bei Forschung & Entwicklung stellt die vergleichsweise geringsten Anforderungen an die Messverfahren. Doch wird hoher Wert auf die Messgüte gelegt.

Beim Einsatz als Müdigkeitswarnsystem im Fahrzeug spielen die Praktikabilität und alle akzeptanzförderlichen Faktoren eine große Rolle. Überraschend ist, dass weder die Sensitivität noch die Spezifität als notwendig beurteilt wurden.

Die Praktikabilität ist hingegen beim Einsatz bei Verkehrskontrollen von nachgeordneter Bedeutung. Dahingegen wird insbesondere die hohe Relevanz der Validitätskriterien betont. Die Notwendigkeit, akzeptierte Grenzwerte zur Beurteilung der Fahrermüdigkeit vorweisen zu können, stellt neben der Generalisierbarkeit eine nach dem aktuellen Forschungsstand kaum realisierbare Anforderung an die Messverfahren.

6.4.2 Eignung für Forschung und Entwicklung

Alle sechs Messverfahren eignen sich für einen Einsatz in Forschung und Entwicklung. Dies ist wenig überraschend, da die in der Delphi-Studie diskutierten Messverfahren aus Expertensicht auch zu den validesten Messverfahren zählen. Bei fünf der sechs Verfahren erweist sich das Urteil der zwölf Teilnehmer als weitgehend übereinstimmend mit vergleichsweise wenig kritischen Stimmen. Eine größere Heterogenität besteht hingegen bei der Beurteilung des PST. Dies geht vermutlich auf die auch im Workshop kontrovers diskutierte Frage der Reaktivität und der Validität des PST zurück.

		Forschung und Entwicklung	Müdigkeitswarnsystem im Fahrzeug	Verkehrskontrolle
Messgüte	Reliabilität	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Sensitivität	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Differenzierungsfähigkeit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Spezifität	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
Validität	Kriteriumsvalidität	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Externe Validität		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Generalisierbarkeit			<input checked="" type="checkbox"/>
	Akzeptierte Grenzwerte			<input checked="" type="checkbox"/>
Stabilität	Unverfälschbarkeit	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
	Keine Reaktivität der Messung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Robustheit			<input checked="" type="checkbox"/>
	Keine Intrusivität		<input checked="" type="checkbox"/>	
Praktikabilität	Vereinbarkeit mit der Fahraufgabe		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Zeitliche Ökonomie		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Einfachheit der Nutzung		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Akzeptanz		<input checked="" type="checkbox"/>	

Tab. 15: Anforderungsprofile der drei Einsatzgebiete. Das kennzeichnet die Kriterien, die Messverfahren bei entsprechender Verwendung erfüllen müssen

	Forschung & Entwicklung			Müdigkeitswarnsystem im Fahrzeug			Verkehrskontrolle		
	Nein	Bedingt	Ja	Nein	Bedingt	Ja	Nein	Bedingt	Ja
Lenkverhalten	1	2	9	0	6	6	10	1	0
Spurhaltung	1	2	9	2	5	5	11	1	0
EEG	0	3	9	8	4	0	11	1	0
Lidschluss	0	3	9	2	8	2	10	1	0
Videobasiertes Expertenrating	1	2	9	11	0	1	10	1	1
PST	1	3	6	9	1	0	2	7	1

Tab. 16: Beurteilung der Eignung der Messverfahren für mögliche Einsatzgebiete auf Basis des in Tabelle 15 erstellten Anforderungsprofils. Berichtet ist die Anzahl der max. zwölf Experten, die das Verfahren für geeignet (ja), nicht geeignet (nein) oder nur unter bestimmten Voraussetzungen geeignet (bedingt) hält. Grau hinterlegt ist die mehrheitliche Meinung

6.4.3 Eignung als Müdigkeitswarnsystem im Fahrzeug

Als geeignet oder bedingt geeignet werden die Maße der Fahrperformanz und die des Lidschlussverhaltens beurteilt. Diese Messverfahren ermöglichen eine nicht bzw. nur gering intrusive zeitnahe Datenerfassung und -auswertung bei höherer Praktikabilität und insbesondere höherer Akzeptanz. „Wissen um die Spurgeometrie“ sollte bei Erfassung des Lenkverhaltens und der Spurhaltung gegeben sein [DEL]. „Stabile Messungen“ und eine

Lösung für das „Problem der wechselnden Augen- und Kopfpositionen“ gelten als notwendige Voraussetzungen für die Verwendung des Lidschlussverhaltens [DEL]. Bei allen drei Verfahren werden die Festlegung einer „individuellen Baseline“ und die „Kombination mit anderen Messverfahren“ empfohlen, um die notwendigen Voraussetzungen zu erfüllen [DEL]. Ein Einsatz des EEG scheitert an seiner derzeit noch zu geringen Praktikabilität und hohen Intrusivität [DEL]. Ein Einsatz des üblicherweise offline durchgeführten videobasierten Expertenratings wäre als kontinuierliche Online-Überwa-

chung technisch umsetzbar, doch aus unterschiedlichen Gründen (z. B. Akzeptanz der Fahrer, Aufwand und Kosten) bei Berufskraftfahrern und insbesondere Privatfahrern „unrealistisch“ [DEL].

6.4.4 Eignung zum Einsatz bei Verkehrskontrollen

Bei keinem einzigen Messverfahren gelten die Voraussetzungen zu einem Einsatz bei Verkehrskontrollen als erfüllt. Ein Grund dafür liegt in der geringen Praktikabilität der Anwendung. Erforderlich wären z. B. „Fahrtenschreiber“ zur kontinuierlichen und stets abrufbereiten Datenerfassung (Spurhaltung, Lenkverhalten oder Lidschluss), eine entsprechende „Laborausstattung“ und „geschulte Anwender“ (EEG) [DEL]. Eine „Begutachtung durch die Polizei könnte als Expertenrating gelten“, allerdings wäre dieses Verfahren aufgrund „mangelnder Schulung“ [DEL] und v. a. hoher situativer Aktivierung (→ hohe Reaktivität) nicht mit der gängigen Vorgehensweise vergleichbar. Dazu müssten Videoaufnahmen des Fahrers zur Begutachtung vorliegen. Mit der wichtigste Grund für die fehlende Eignung dieser Messverfahren liegt vermutlich in der eingeschränkten Objektivität der Messung und der Interpretation. In der standardisierten Testsituation und der Verfügbarkeit konkreter Grenzwerte zur Beurteilung des Messwerts wird der grundlegende Vorteil des PST gesehen. Als einziges Verfahren wird es für einen Einsatz bei Verkehrskontrollen zumindest in Betracht gezogen. Weniger dringlich erscheint für eine praktische Anwendbarkeit die vorgeschlagene „Verkürzung der Messdauer auf 5-7 min“ [DEL]. Hochrelevant wäre jedoch zum einen der Nachweis der Nichtreaktivität der Messung, zum anderen der Nachweis, dass die Grenzwerte, die wache, auffällige und kritische Fahrer voneinander trennen, hoch mit der eingeschränkten Fahrtauglichkeit korrelieren. Selbst bei Erfüllung dieser Voraussetzungen müsste für den Einsatz des Verfahrens bei Verkehrskontrollen der Nachweis der Einzelfallgerechtigkeit noch erbracht werden.

6.5 Fehlender Goldstandard zur Müdigkeitserfassung

Die meistgeäußerte Anmerkung der Experten bei der Beurteilung der Messverfahren nach dem Gütekriterienkatalog bezog sich auf das Fehlen

eines Goldstandards als Eichmaß der Gütebeurteilung. Ähnlich häufig wurde angemerkt, dass ein Messverfahren alleine keine valide Müdigkeitsdetektion ermöglicht. Um erschließen zu können, welche Kombination an Messverfahren dem Goldstandard der Müdigkeitserfassung am nächsten kommt, wurde in der zweiten Delphi-Runde folgende Frage an die Expertenrunde gerichtet:

„Sie stehen vor der Aufgabe, ein neues Müdigkeitsmessverfahren nach seiner Eignung zur Müdigkeitserfassung während der Fahrt zu beurteilen. Hierfür benötigen Sie ein maximal valides Referenzmaß. Kosten und Aufwand spielen keine Rolle, die Wahl des Settings obliegt ganz Ihnen. Welche Methode(n) wählen Sie?“

Die Antworten lauteten (in gekürzter Ausführung) wie folgt:

- „Lidschluss und Lenkverhalten“,
- „EEG in Zusammenhang mit EOG“
- „Spurhaltung, Lenkverhalten mit Lidschlussverhalten“,
- „Kombination aus Selbsteinschätzung und Experteneinschätzung“,
- „vor und nach der Fahrt PST und Daueraufmerksamkeitstest, während der Fahrt: EEG, Lenkverhalten, Spurhaltung“,
- „Expertenrating, EEG, subjektive Aussagen der Fahrer“,
- „Aufzeichnung mit allen Verfahren plus Selbstbeurteilung“.

Betont wurde auch die Bedeutsamkeit methodischer Aspekte bei der Datenerhebung und -auswertung:

- Kontextabhängigkeit der Erfassung (Fahrpausen bzw. während der Fahrt),
- Berücksichtigung interindividueller Motivationslagen,
- keine Linearkombination der Messverfahren,
- Verankerung an Quasi-Ground-Truth-Referenzkriterien.

Zwölf Vorschläge liegen vor – und alle zwölf Vorschläge unterscheiden sich voneinander. Einigkeit besteht in folgenden Aspekten: Ein Einsatz von

mind. zwei oder mehr Messverfahren wird von allen Teilnehmern als notwendig erachtet. Auch werden ausschließlich Kombinationen von Messverfahren aus unterschiedlichen Messverfahrensgruppen vorgeschlagen. Mehrere empfehlen eine Ergänzung der objektiven Messverfahren um die Selbstbeurteilung der Probanden. Auch circadiane Effekte, Time on Task und Time Awake sollten Berücksichtigung finden. Zusammenfassend lässt sich festhalten: Bei der Suche nach dem Referenzmaß, das dem Goldstandard am nächsten kommt, stehen viele – und viele gleichermaßen adäquate – Vorschläge nebeneinander. Eine Überlegenheit einer Messverfahrenskombination zeichnet sich nicht ab. Eine Entscheidung für oder gegen die Verwendung der genannten Messverfahren kann weniger auf Basis der gering differenzierenden Validität erfolgen und fällt zunehmend unter Berücksichtigung anderer Aspekte, wie z. B. des Erfassungskontexts, der Praktikabilität oder Ökonomie.

6.6 Einschränkungen

Die oben aufgeführten Bewertungen der Messverfahren aus Delphi-Runde 1 & 2 unterliegen einigen grundlegenden Einschränkungen. Diese sind teils methodisch bedingt, teils Folge einer unterschiedlichen Interpretation der definierten Gütekriterien; vor allem aber lassen sie sich auf das Fehlen eines allgemeingültigen Eichmaßes, des sogenannten Goldstandards, zurückführen.

Methodisch bedingte Einschränkungen

Die freie Auswahl und anschließende Erstbewertung des jeweils validesten Müdigkeitsindikators führten unweigerlich dazu, dass die Bewertung der Messverfahren auf unterschiedlichen (z. B. EEG: Auswahl von Alpha-Spindeln bzw. Mikroschlaf) und teils in der Befragung nicht näher präzisierten Indikatoren desselben Messverfahrens beruht. Auch sind Unterschiede zwischen dem Namen nach identischen Indikatoren (z. B. in Hinsicht auf die gewählte Abtaststrategie oder die weitere Verarbeitung) nicht auszuschließen.

Weiterhin ist die Anzahl der Beurteilungen innerhalb der sechs Messverfahren (von $N = 3$ bis $N = 8$) recht heterogen. Die Zusammenführung der Einzelurteile zum Median mag angesichts der kleinen Stichprobe und der diskreten Skala kritisch erscheinen; ob der gegenüber abweichenden Urteilen sensiblere Mittelwert die bessere Alternative darstellt, ist jedoch fraglich.

Definition der Gütekriterien

Ein gemeinsames Verständnis der Gütekriterien bei unterschiedlichen Beurteilern kann nicht als gegeben betrachtet werden. Zum einen ist die Bewertung durch den jeweiligen Kontext der Müdigkeitserfassung beeinflusst. So kann z. B. das Urteil über die Akzeptanz von Messmethoden durch den Fahrer vergleichsweise milder ausfallen, wenn man die Akzeptanz von Berufskraftfahrern statt Privatanutzern betrachtet. Auch mag die Vereinbarkeit von Müdigkeitserfassung und Fahraufgabe im Kontext Fahrsimulator anders beurteilt werden als im realen Straßenverkehr.

Zudem liegt bei der Auslegung der Formulierung der Gütekriterien noch Interpretationsspielraum vor. Wie definiert man beginnende Müdigkeit (→ Sensitivität)? Ab wann zählt die Fähigkeit zur Fahrzeugführung als beeinträchtigt (→ externe Validität)?

Fehlender Goldstandard

Das gravierendste Problem im Bereich der Müdigkeitserfassung ist nach wie vor der fehlende Goldstandard. Von den anderen diesbezüglichen Implikationen für das Thema Fahrermüdigkeit abgesehen, steht man bei einer Bewertung der Messverfahren vor dem klassischen Münchhausen-Problem, sich an den eigenen Haaren aus dem Sumpf ziehen zu müssen. Was wertet man als ein valides Außenkriterium? Welches Ausmaß an Fehlerurteilen verbleibt? Und was bedeutet ein Messwert für die Fahrtüchtigkeit und v. a. für das Unfallrisiko von Fahrern? Auch auf die Frage, was dem Goldstandard am nächsten kommt, gibt es viele – und viele gleichermaßen richtige – Antworten (Kapitel 6.5). Aus diesem Grund beruht ein bedeutsamer Anteil der Delphi-Ergebnisse mehr auf der „erfahrungsbasierten Intuition“ der Experten als auf einschlägigen Studien [WS].

6.6.1 Fazit

Im Rahmen des Workshops wurden diese Einschränkungen identifiziert und diskutiert. Die Beurteilung der Messverfahren wurde anschließend bei Bedarf modifiziert, auch der Kriterienkatalog wurde überarbeitet und ergänzt (siehe Kapitel 7). Trotz der in Delphi-Runde 1 & 2 heterogenen Einzelurteile können die hier berichteten Ergebnisse größtenteils als Konsens unter Experten verstanden werden. Dennoch muss man bei der Interpretation der Ergebnisse die genannten Einschränkungen im Blick

behalten und bei einem direkten Vergleich der Messverfahren über einzelne Gütekriterien Vorsicht walten lassen. Um bei einem weiteren Einsatz des Kriterienkatalogs diese Vergleichbarkeit zu gewährleisten, sollte Folgendes berücksichtigt werden:

- Präzisierung des Müdigkeitsindikators, der Messapparatur und des mit der Erfassung verbundenen Procedere.
- Berücksichtigung des Kontexts der Müdigkeits- erfassung sowohl bei der Bewertung als auch bei der Gewichtung der einzelnen Gütekriterien.
- Erarbeitung von Arbeitsdefinitionen, um ein gemeinsames Verständnis der Gütekriterien weitestmöglich sicherzustellen.

7 Überarbeiteter Gütekriterienkatalog

Der in der Delphi-Studie verwendete Kriterienkatalog wurde anhand des Feedbacks aus beiden Delphi-Runden und des Expertenworkshops modifiziert und ergänzt. Die Formulierung wurde präzisiert und bislang fehlende Aspekte nachgetragen. Auch wenn die Anzahl der Kriterien nur geringfügig gestiegen ist, führt die Ausdifferenzierung innerhalb der Gütekriterien zu einer Verdoppelung (Schätzwert) des Erhebungsaufwandes.

Dieser in Tabelle 17 dargestellte Gütekriterienkatalog ließe sich mit geringem Aufwand modifizieren und bei anderen Fragestellungen zur Beurteilung von Messverfahren und/oder Messsystemen einsetzen. Hier sei auf die bereits genannten Einschränkungen und Empfehlungen (siehe Kapitel 6.6) verwiesen.

Gütekriterienkatalog zur Beurteilung der Messverfahren und Messsysteme		
Messgüte	Objektivität	Das Messverfahren ist standardisiert in seiner <ul style="list-style-type: none"> • Durchführung, • Auswertung, • Interpretation.
	Reliabilität	Wiederholte Messungen unter vergleichbaren Bedingungen führen zu einem vergleichbaren Messwert.
	Sensitivität	Beginnende Müdigkeit wird valide erkannt.
	Differenzierungsfähigkeit	Unterschiedliche Ausprägungen von Müdigkeit lassen sich valide voneinander abgrenzen. Möglich sind die <ul style="list-style-type: none"> • Differenzierung von beginnender zu schwerer Müdigkeit, • Differenzierung von mittlerer zu schwerer Müdigkeit.
	Spezifität	Es ist ausgeschlossen, dass wache Fahrer aus unterschiedlichen Gründen (Messfehler, personen- oder umweltbedingte Störgrößen, ...) als müde klassifiziert werden.
Validität	Kriteriumsvalidität	Ein hoher Zusammenhang zur Müdigkeit, festgestellt durch ein valides Außenkriterium , ist überzeugend belegt.
	Akkuratheit	Es besteht keine bzw. nur eine unwesentliche Abweichung zwischen den ermittelten Messwerten und den wahren Müdigkeitswerten.
	Externe Validität	Ein hoher Zusammenhang zu einer eingeschränkten Fähigkeit zur Fahrzeugführung im realen Straßenverkehr ist überzeugend belegt.
	Prädiktionsgüte	<ul style="list-style-type: none"> • Eine Vorhersage über das Ausbleiben eines kritischen Müdigkeitszustands binnen der nächsten [...] Minuten ist möglich. • Eine Vorhersage über das Auftreten eines kritischen Müdigkeitszustands binnen der nächsten [...] Minuten ist möglich.
	Generalisierbarkeit	Zeigen unterschiedlichen Personen vergleichbare Messwerte, so indiziert das ein vergleichbares Maß an Müdigkeit. Es besteht keine Abhängigkeit der Messwerte zu <ul style="list-style-type: none"> • Geschlecht, Alter, Phänotyp etc., • den Anfangsbedingungen (keine Baselinemessung notwendig).
	Akzeptierte Grenzwerte	Es gibt allgemein akzeptierte Grenzwerte, ab denen eine Teilnahme am Straßenverkehr infrage gestellt ist.

Tab. 17: Überarbeiteter Gütekriterienkatalog

Gütekriterienkatalog zur Beurteilung der Messverfahren und Messsysteme		
Stabilität	Keine Intrusivität	Die Messung bzw. die notwendige Messausrüstung wird von den Fahrern unter optimalen Bedingungen nicht als störend empfunden.
	Manipulationsfreiheit	Eine willentliche Verfälschung der Messergebnisse, also ein Vortäuschen eines wacheren Zustandes, ist ausgeschlossen.
	Keine Reaktivität der Messung	Eine Veränderung der Fahrermüdigkeit durch den Messvorgang ist ausgeschlossen.
	Robustheit	Die Messwerte sind unbeeinflusst durch Umgebungsfaktoren (Straßengeometrie, Lichtverhältnisse, Verkehr, ...).
Praktikabilität	Vereinbarkeit mit der Fahraufgabe	Eine Erfassung des Fahrerzustandes ist während der Fahrt im realen Straßenverkehr möglich.
	Zeitliche Auflösung	Die zeitliche Auflösung der Messung liegt bei [...] je Einheit (ms/s/min).
	Real-Time-Assessment	Die Datenauswertung ist in Echtzeit möglich.
	Zeitliche Ökonomie	Der Aufwand für die <ul style="list-style-type: none"> • Datenerhebung, • Datenauswertung, ist (unter optimalen Bedingungen) gering.
	Einfachheit der Nutzung	Die Durchführung der <ul style="list-style-type: none"> • Datenerhebung, • Datenauswertung a) ... erfordert Expertise des Anwenders, b) ... ist nach einer kurzen Einführung möglich, c) ... ist unmittelbar ohne Vorkenntnisse möglich. Der Anwender ist definiert als I) Forscher, II) Fahrzeugführer, III) Kontrollinstanz.
	Wirtschaftlichkeit	Die Kosten für <ul style="list-style-type: none"> • Messausrüstung (Anschaffung, Wartung, Haltbarkeit), • Messvorgang (finanziell und personell), sind gering.
Akzeptanz	Die zur Erfassung notwendige Methode ist (unter optimalen Bedingungen) akzeptiert von <ul style="list-style-type: none"> • Experten im Bereich der Müdigkeitserfassung, • Personen im alltäglichen Straßenverkehr. 	
Status quo vs. Potenzial	Rechtssicherheit	Die Interpretation eines Messergebnisses, das eine kritische Müdigkeitsausprägung zeigt, hätte vor Gericht Bestand.
	Status quo	Der Indikator erlaubt nach dem derzeitigen Stand der Technik eine valide Erfassung der Fahrermüdigkeit.
	Potenzial	Der Indikator bietet bei weiteren Forschungsbemühungen ein großes Potenzial zur validen Erfassung der Fahrermüdigkeit.

Tab. 17: Fortsetzung

8 Zusammenfassung

Müdigkeitsmess- und -Warnsysteme

- Bei Analyse der Fachliteratur wurden 70 Müdigkeitsmesssysteme identifiziert. Diese Systeme unterscheiden sich u. a. nach Anwendungszweck (Online-Monitoring, Fitness-For-Duty, Forschung), Datenbasis (Augenaktivität, Lenkverhalten, Kopfnicken etc.), dem Vorliegen einer Warnfunktion (v. a. bei Online-Monitoring), dem Ausmaß ihrer Validierung (meist eingeschränkt und ohne Angaben zur Sensitivität und Spezifität) und der Verbreitung (nur vergleichsweise hoch bei im Fahrzeug implementierten Müdigkeitswarnsystemen).
- Die in Mittel- und Oberklassefahrzeugen zunehmend verbreiteten Müdigkeitswarnsysteme bieten aus Nutzersicht oftmals keine zufriedenstellende Detektionsgüte. Zu häufig wird selbst bei zutreffenden Systemwarnungen keine Folge geleistet und die Fahrt trotz erkannter und selbst eingestandener Müdigkeit fortgesetzt. Es be-

steht weiterer Forschungsbedarf zur Systementwicklung und ihrer Evaluierung auf Basis objektiver Daten.

- Bislang weist kein Messverfahren eine genügend hohe Güte auf, die für einen Einsatz bei Verkehrskontrollen erforderlich ist. Eine valide Müdigkeitserfassung unter Gewährleistung der Einzelfallgerechtigkeit ist (noch) nicht gewährleistet und ein routinemäßiger Einsatz mit möglicher Sanktionierung bei Auffälligkeit daher nicht gerechtfertigt.

Bewertung der Müdigkeitsmessverfahren

- Peripherphysiologische Verfahren können nachweislich müdigkeitsbedingte Veränderungen erfassen. Doch ist der Zusammenhang eher schwach ausgeprägt und nicht müdigkeitsspezifisch. Die Messverfahren sind teilweise sehr intrusiv (Elektrokardio- und -myogramm) oder sogar mit der Fahraufgabe unvereinbar (Bestimmung des Melantonin- oder Cortisolspiegels, Posturografie).
- Alle in der Delphi-Runde diskutierten Verfahren ermöglichen einen validen Einsatz im Bereich Forschung und Entwicklung. Geordnet nach Anzahl ihrer Nennungen gehören dazu Indikatoren des Lidschlussverhaltens (8), des Lenkverhaltens (6), des videobasierten Expertenratings (5), des EEG (4) und pupillografischen Schläfrigkeitstests (4) und der Spurhaltung (3).
- Die Erfassung der Fahrperformanz über Parameter der Lenk- und Spurhaltung bietet eine hohe externe Validität bei nicht intrusiver Erfassung während der Fahrt. Wohl der größte Nachteil besteht in der Störanfälligkeit der Datenerfassung durch Streckencharakteristika. Nur bei Erfassung auf gerader Strecke über einen längeren Zeitraum sind die Daten eindeutig interpretierbar. Das schließt die Möglichkeit der Müdigkeitserfassung im Stadtverkehr aus. Für einen Einsatz der Messverfahren bei Müdigkeitswarnsystemen im Fahrzeug erscheinen die fahrperformanzbasierten Messverfahren am praktikabelsten. Sie liefern seit geraumer Zeit die Datengrundlage für die Zustandserkennung bei Müdigkeitswarnsystemen im Fahrzeug. Doch sind die müdigkeitsbedingten Veränderungen der Parameter abhängig vom Fahrzeugtyp und -modell und daher modellspezifisch anzupassen.
- Für Forschungszwecke ist das EEG ein etabliertes Verfahren, das mit der Weiterentwicklung der Signalanalyse und zunehmend kontaktärmeren Erfassungsmethoden noch erhebliches Potenzial erkennen lässt. Die klassischen Frequenzbänder Alpha, Beta und Theta, die vor zehn Jahren bei der Müdigkeitserfassung präferiert eingesetzt wurden, scheinen allmählich ersetzt zu werden durch die Analyse der robusteren Spindeln im Alpha- und Thetaband. Ein Einsatz des EEG im alltäglichen Straßenverkehr wird erst bei Gewährleistung einer nicht intrusiven Erfassung – diskutiert wird bspw. die EEG-Ableitung im Fahrzeughimmel oder die Verwendung „trockener Elektroden“ – möglich.
- Geschwindigkeit, Frequenz und Dauer des Lidschlusses gehören zu den derzeit validesten Indikatoren der Fahrermüdigkeit. Bei der höchsten Anzahl an Nennungen als valides Müdigkeitsmessverfahren (8 von 12 Experten) weist das Bewertungsprofil ein im Vergleich zu den anderen fünf Messverfahren konformeres Ergebnismuster auf. Bei verbesserter Sensortechnik, geringerer Störanfälligkeit und selbstverständlich einer kamerabasierten Erfassung (statt EOG) wäre ein Einsatz im Fahrzeug realisierbar. Die auf das Fahrergesicht gerichtete Kamera mag intrusiver sein als die unauffällige Aufzeichnung von Lenkverhalten und Spurhaltung, doch mit der angehenden Einführung von Systemen, die bei Unaufmerksamkeit warnen (z. B. bei Lexus), wäre die Einbindung der Müdigkeitserkennung in im Fahrzeug verfügbare Technologien möglich.
- Die videobasierte Verhaltensbeobachtung durch Experten ist ein insbesondere in der Automobilindustrie gängiges Verfahren zur Offline-Bestimmung der Müdigkeit mit hoher externer Validität. Ein Einsatz außerhalb der Forschung und Entwicklung ist aufgrund mangelnder Akzeptanz (Videoaufnahme, -speicherung und -sichtung zu intrusiv) und des hohen zeitlichen Aufwandes bei der Datenauswertung unwahrscheinlich.
- Die Güteeigenschaften des Pupillografischen Schläfrigkeitstests wurden kontrovers diskutiert. Während das Verfahren in der Schlafmedizin als etabliert und umfassend validiert gilt, ist die Eignung des PST zur Vorhersage von Fahrleistungsbeeinträchtigungen unklar. Das Ausmaß der Reaktivität der Messung sollte kritisch geprüft werden. Die angestrebte Verkürzung der

Messzeit von elf auf sechs Minuten könnte sich positiv auf die zeitliche Ökonomie der Testdurchführung und v. a. auf die mögliche Reaktivität auswirken. Wenn sich belastbare Belege für die valide und nicht reaktive Erfassung der Fahrermüdigkeit bei gesunden Fahrern zeigen, kann über mögliche Einsatzgebiete des PST diskutiert werden.

- Die hohe Heterogenität der Bewertung sämtlicher in der Delphi-Befragung diskutierten Messverfahren ist teils inhaltlich und teils methodisch begründet durch die unterschiedliche Auslegung der Gütekriterien und durch das Fehlen eines weithin akzeptierten Eichmaßes für Müdigkeit.
- Wie in zahlreichen Forschungsarbeiten bislang aufgeführt, gibt es nach wie vor keinen Goldstandard für die Müdigkeitserfassung. Die Wahl der Messverfahren sollte daher in Abhängigkeit des jeweiligen Ziels und Kontexts der Müdigkeitserfassung erfolgen. Die Abwesenheit eines Goldstandards führt dazu, dass die Experten für eine valide Müdigkeitsdetektion die Kombination von zwei oder mehr Messverfahren als erforderlich erachten.

Gütekriterienkatalog

- Der im Rahmen des Projekts entwickelte und anhand des Expertenfeedbacks überarbeitete Kriterienkatalog bietet eine Diskussions- und Bewertungsgrundlage zum Vergleich von Messverfahren.
- Die vorliegenden Güteprofile der sechs Müdigkeitsmessverfahren bieten einen guten Überblick über deren jeweilige Vor- und Nachteile. Die als abschließend deklarierten Urteile sollten auch bei Konsens der Experten als begründeter Schätzwert interpretiert werden. Bewertungsunterschiede von einem halben Punkt zwischen Messverfahren dürfen nicht als erwiesene Überlegenheit eines Verfahrens über ein anderes interpretiert werden.
- Die Urteile zu den Gütekriterien variieren über die Kriterien und die Messverfahren. Während die Reliabilität und die Validität bei den sechs Messverfahren als eher erfüllt angesehen werden, gehen die Urteile bei der Intrusivität oder der Vereinbarkeit mit der Fahraufgabe weit auseinander. Die Kriterien Rechtssicherheit (im Sinne der Einzelfallgerechtigkeit) und Prädik-

tionsgüte (4 h in Anlehnung an die Lenkzeitverordnung) sind für kein einziges Verfahren auch nur ansatzweise als erfüllt angesehen worden.

- Müdigkeitsbedingte Messwertänderungen sind im statistischen Gruppenvergleich und weniger im Einzelfall nachweisbar. Die Voraussetzungen für eine Generalisierbarkeit der Messwerte und damit für eine Formulierung allgemeingültiger Grenzwerte sind derzeit von keinem Verfahren erfüllt. Die Anzeichen und Folgen von Müdigkeit sind weder inter- und intraindividuell noch über unterschiedliche Situationen vergleichbar, insbesondere bei noch moderaten Müdigkeitsausprägungen.
- Wie bei den anderen Gütekriterien ist auch beim Vergleich der Sensitivität und Spezifität der Messverfahren allein ein intuitionsgeleitetes Expertenurteil möglich, da einschlägige empirische Befunde meist nicht vorliegen. Nur äußerst selten wird in Studien die Klassifikationsgüte, also der Anteil korrekter Klassifizierungen und fehlerhafter Erkennungen bzw. Zurückweisungen, berichtet, zumeist belässt man es bei Korrelationsmaßen. Die damit implizierte Annahme eines linearen Zusammenhangs wird selten hinterfragt, auch wenn sie angesichts des heutigen Wissenstandes fraglich scheint.
- Der fehlende Goldstandard, die Seltenheit von Studien im Realverkehr mit großen Stichproben und die mangelnde Vergleichbarkeit der Studien untereinander erschweren den Vergleich der Messverfahren. So wurde auch im Rahmen der Expertenbefragung wiederholt angemerkt, dass viele der in der Befragung getroffenen Aussagen mehr auf der Expertenintuition als auf einschlägigen Studien beruhen. Dies erschwert die Untermuerung der Ergebnisse mit konkreten empirischen Belegen. Die im vorliegenden Projekt durchgeführte Expertenbefragung kann diese nicht ersetzen, doch stellen die gesammelten Expertenurteile das wohl geeignetste Bewertungsinstrument dar, das angesichts des aktuellen Forschungsstands verfügbar ist.

9 Ausblick

Maßnahmen

Im Rahmen des Expertenworkshops wurden Mittel und Wege zur wirksamen Vermeidung müdigkeitsbedingter Unfälle diskutiert. Die genannten Maßnahmen werden nachfolgend erläutert. Betont wurde die besondere Relevanz, dem gesamtgesellschaftlichen Problem der Fahrermüdigkeit auf mehreren Ebenen zu begegnen. Zielführende Maßnahmen in den Bereichen Education, Engineering und Enforcement müssen den Fahrer, das Fahrzeug und die Umwelt mit berücksichtigen. Auch bedarf es weiterer Forschung, um die Eignung von Müdigkeitsmessverfahren und Gegenmaßnahmen zu prüfen.

Obwohl Fahrer ihre Müdigkeit meist selbst erkennen, müssen sie sich bewusst sein, dass sie den Zeitpunkt ihres Einschlafens nicht adäquat einschätzen können. Notwendig ist daher eine umfassende Aufklärung von Fahrern über die Müdigkeitsfolgen, die daraus resultierenden Gefahren und mögliche Verhaltensoptionen zur Gefahrenvermeidung. Dazu zählen derzeit nur die Einnahme koffeinhaltiger Mittel und eine Ruhepause (bei Erschöpfung) bzw. Schlaf (bei erhöhtem Schlafdruck). Fahrer müssen von der alleinigen Verwendung der weitaus beliebteren Gegenmaßnahmen (z. B. Radio hören, Fenster öffnen etc.), die keine Fahrtunterbrechung verlangen, Abstand nehmen. Wünschenswert, doch aus Fahrersicht nur eingeschränkt umsetzbar, wäre eine gezielte Fahrtenplanung zur vorausschauenden Vermeidung von Müdigkeit (z. B. keine Nachtfahrten).

Bei Berufskraftfahrern regelt zwar die EU-weit verpflichtende Lenkzeitverordnung die wöchentlichen und täglichen Lenk- und Ruhezeiten, doch ist die Einhaltung der Vorschriften nicht ausreichend gewährleisten. Hier gilt es, den Einfluss arbeitsorganisatorischer Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Allein beim Fahrer ansetzende Maßnahmen wären im Vergleich zu einem umfassenden Risikomanagement nur eingeschränkt wirksam.

Zusätzliche Möglichkeiten bietet die Gestaltung der Autobahnumgebung über die Einführung von Rüttelstreifen, die den Fahrer beim Verlassen der Spur zumindest kurzfristig wieder aktivieren. Ein früheres Setzen der Raststättenbeschilderung gibt dem Fahrer mehr Zeit für die Entscheidung, eine Fahrpause einzulegen.

Dem flächendeckenden Einsatz von Müdigkeitswarnsystemen ist nach dem derzeitigen Wissensstand weder zu- noch abzuraten. Eine umfassende Evaluierung der Systeme steht noch aus, die Ergebnisse der hier durchgeführten Nutzerbefragung legen jedoch nahe, dass Verbesserungen der Müdigkeitsdetektion und des Fahrerfeedbacks wünschenswert sind.

Neben der Erkennung von Müdigkeit und der Warnung bei Müdigkeit ist es wichtig zu diskutieren, wie Fahrer zu einem Verhalten bewegt werden können, das Gefahren durch Müdigkeit vermeidet. Dies ist nicht allein eine Frage der Compliance im Falle einer Warnung. Vielmehr müssen gefahrenvermeidende Verhaltensweisen entwickelt und etabliert werden, die gleichermaßen individuell wie gesellschaftlich akzeptiert werden. Was soll ein müder Fahrer tun, der noch mehrere Stunden Fahrt vor sich hat, die er voraussichtlich auch durch ein 20-minütiges Nickerchen nicht gefahrungsfrei überstehen wird? Wie lässt sich das Nutzen-Kosten-Verhältnis zugunsten der (auch längeren) Fahrtunterbrechung oder gar des Verzichts auf den Fahrtantritt verschieben? Ein kontinuierliches Fahrermonitoring (z. B. Black Box zur Erfassung von Fahrzeug- und Fahrerzuständen) ist im Forschungskontext umsetzbar. Ein verpflichtender Einsatz mit entsprechenden Sanktionen und haftungsrechtlichen Konsequenzen erscheint aus unterschiedlichsten Gründen derzeit nicht als gesellschaftlich akzeptierter Weg.

Forschungsbedarfe

Müdigkeitswarnsysteme in Pkw bieten schon aufgrund ihrer zunehmenden Verbreitung prinzipiell ein erhebliches Potenzial zur Vorbeugung müdigkeitsbedingter Unfälle. Auf die hier berichtete Nutzerumfrage sollte eine umfangreichere und repräsentative Nutzerbefragung folgen, um die dargestellten Ergebnisse auf eine fundierte Basis zu stellen.

Die Entwicklung und Optimierung von Müdigkeitswarnsystemen durch Automobilhersteller und Zulieferer sollten durch eine stetige Evaluierung begleitet werden, sodass Nutzen und Risiken der Systeme objektiv bewertet werden können. So gilt es, die Sensitivität und Spezifität der Systeme auf Basis objektiver Daten zu prüfen, die Wirksamkeit des Fahrerfeedbacks auszubauen.

Bislang weist kein Messverfahren eine genügend hohe Mess- und Testgüte auf, die seinen routinemäßigen Einsatz bei Verkehrskontrollen und ggf. sich anschließenden Sanktionen rechtfertigen würden. Allen in der Delphi-Studie diskutierten Müdigkeitsmessverfahren wird jedoch ein bedeutsames Potenzial zugestanden, mithilfe verbesserter Sensortechnik, Auswertungsalgorithmen u. a. die Testgüte weiter auszubauen. Die Notwendigkeit einer entwicklungsbegleitenden Evaluierung bedarf sicher keiner weiteren Erwähnung. Abschließend steht die Ermittlung kriterienbezogener Grenzwerte an.

Belastbare Aussagen zur Quantifizierung von Müdigkeitsunfällen und -zwischenfällen sowie zur relativen Steigerung des Unfallrisikos bei Müdigkeit sind derzeit noch selten. Der Zusammenhang zwischen Müdigkeitskennwerten und dem damit verbundenen Unfallrisiko ist kaum untersucht. Sehr umfangreiche Naturalistic Driving Studies könnten hier Abhilfe schaffen.

10 Literatur

- AGBINYA, J.I., BIERMANN, E., HAMAM, Y., ROCARIES, F., LAL, S.K. (2009): Biomedical and environmental sensing, River Publishers, Aalborg, Denmark
- AHLSTRÖM, C., ANDERSSON, J., ANUND, A., BÖRJEJESSON, E., JOHANSSON, H., JOHNSON, J. (2010): Detecting sleepiness by Optalert: Final report, VTI, Linköping
- ÅKERSTEDT, T., GILLBERG, M. (1990): Subjective and Objective Sleepiness in the Active Individual. *International Journal of Neuroscience*, (52), 29-37
- ANUND, A. (2009): Sleepiness at the wheel. Dissertation, Karolinska Institutet, Stockholm
- ARNEDT, J.T., GEDDES, M.A.C., MACLEAN, A.W. (2005): Comparative sensitivity of a simulated driving task to self-report, physiological, and other performance measures during prolonged wakefulness. *Journal of psychosomatic research* 58, (1), 61-71
- AVNI, N., AVNI, I., BARENBOIM, E., AZARIA, B., ZADOK, D., KOHEN-RAZ, R., MORAD, Y. (2006): Brief posturographic test as an indicator of fatigue. *Psychiatry and Clinical Neurosciences* 60, (3), 340-346
- BAGNALL, A.D., DORRIAN, J., FLETCHER, A. (2011): Some Vocal Consequences of Sleep Deprivation and the Possibility of "Fatigue Proofing" the Voice With Voicecraft® Voice Training. *Journal of Voice* 25, (4), 447-461
- BARR, L., HOWARTH, H., POPKIN, S., CARROLL, R.J. (2005): A review and evaluation of emerging driver fatigue detection measures and technologies, Proceedings from the International Conference on Fatigue Management in Transportation, Seattle, USA
- BARR, L., POPKIN S., HOWARTH, H. (2009): An Evaluation of Emerging Driver Fatigue Detection Measures and Technologies. Final Report FMCSA-RRR-09-005. Federal Motor Carrier Safety Administration, Washington, DC
- BEKIARIS, E. (1999): System for effective Assessment of the driver state and Vehicle control in Emergency situations. Final Report TR1047, SAVE, Athens, Greece
- BEKIARIS, E. (2004): Towards the development of design guidelines handbook for driver hypovigilance detection and warning — the AWAKE approach, 12th IEE International Conference on Road Transport Information & Control — RTIC 2004, London, UK, 314-320.
- BOUCHNER, P., PIEKNÍK, R., NOVOTNY, S., PEKNY, J., HAJNY, M., BORZAVÁ, C. (2006): Fatigue of car drivers — detection and classification based on the experiments on car simulators, 6th WSEAS International Conference on Simulation, Modeling and Optimization, Lisbon, Portugal, 727-732
- BROOKHUIS, K.A., de WAARD, D. (1993): The use of psychophysiology to assess driver status. *Ergonomics* 36, (9), 1099-1110
- BROOKHUIS, K.A., de WAARD, D., PETERS, B., BEKIARIS, E. (1998): SAVE: System for detection of driver impairment and emergency handling. *IATSS research* 22, (2), 37-42
- BROWN, I.D. (1997): Prospects for technological countermeasures against driver fatigue. *Accident Analysis & Prevention* 29, (4), 525-531
- CAFFIER, P.P., ERDMANN, U., ULLSPERGER, P. (2003): Experimental evaluation of eye-blink parameters as a drowsiness measure. *European Journal of Applied Physiology* 89, (3), 319-325

- CAMPAGNE, A., PEBAYLE, T., MUZET, A. (2004): Correlation between driving errors and vigilance level: influence of the driver's age. *Physiology & Behavior* 80, (4), 515-524
- DINGES, D.F., MAISLIN, G., POWELL, J.W., MALLIS, M.M. (1998): Evaluation of Techniques for Ocular Measurement as an Index of Fatigue and the Basis for Alertness Management. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC
- DINGUS, T.A., KLAUER, S.G., NEALE, V. L., PETERSEN, A., LEE, S.E., SUDWEEKS, J.D., PEREZ, M.A., HANKEY, J., RAMSEY, D.J., GUPTA, S., BUCHER, C., DOERZAPH, Z.R., JERMELAND, J., KNIPLING, R.R. (2006): The 100-car naturalistic driving study, phase II—results of the 100-car field experiment. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC
- DINGUS, T.A., HARDEE, H.L., WIERWILLE, W.W. (1987): Development of Models for on-board Detection of Driver Impairment. *Accident Analysis & Prevention* 19, (4), 271-283
- DONG, Y., HU, Z., UCHIMURA, K., MURAYAMA, N. (2011): Driver inattention monitoring system for intelligent vehicles: A review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 12, (2), 596-614
- DUREMAN, E.I., BODÉÉN, C. (1972): Fatigue in Simulated Car Driving. *Ergonomics* 15, (3), 299-308
- EDWARDS, D.J., SIROIS, B., DAWSON, T., AGUIRRE, A., DAVIS, B., TRUTSCHEL, U. (2007): Evaluation of Fatigue Management Technologies Using Weighted Feature Matrix Method, Proceedings of the 4th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Washington, USA
- EOH, H.J., CHUNG, M.K., KIM, S.-H. (2005): Electroencephalographic study of drowsiness in simulated driving with sleep deprivation. *International Journal of Industrial Ergonomics* 35, (4), 307-320
- EVERS, C., AUERBACH, K. (2005): Verhaltensbezogene Ursachen schwerer Lkw-Unfälle. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
- FRIEDRICHS, F., YANG, B. (2010): Camera-based drowsiness reference for driver state classification under real driving conditions, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, San Diego, USA
- GILLBERG, M., KECKLUND, G., ÅKERSTEDT, T. (1994): Relations Between Performance and Subjective Ratings of Sleepiness During a Night Awake. *Sleep* 17, (3), 236-241
- GOLZ, M., SOMMER, D., KRAJEWSKI, J., TRUTSCHEL, U., EDWARDS, D. (2011): Microsleep episodes and related crashes during overnight driving simulation, 6th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Olympic Valley, USA, 39-45
- GOLZ, M., SOMMER, D., TRUTSCHEL, U., SIROIS, B., EDWARDS, D. (2010): Evaluation of fatigue monitoring technologies. *Somnologie — Schlaf-forschung und Schlafmedizin* 14, (3), 187-199
- GRACE, R., STEWART, S. (2002): The Copilot: A low cost Drowsy Driver Inattention Monitor. International Truck and Bus Safety Research and Policy, Knoxville, Tennessee, USA, 411-420
- HARGUTT, V. (2003): Das Lidschlussverhalten als Indikator für Aufmerksamkeits- und Müdigkeitsprozesse bei Arbeitshandlungen, VDI-Verlag, Düsseldorf
- HARTLEY, L., HORBERRY, T., MABBOTT, N., KRUEGER, G.P. (2000): Review of Fatigue Detection and Prediction Technologies. National Road Transport Commission, Melbourne
- HAWORTH, N.L., VULCAN, P. (1991): Testing of commercially available fatigue monitors, Monash University Accident Research Centre, Melbourne
- HEITMANN, A., GUTTKUHN, R., AGUIRRE, A., TRUTSCHEL, U., MOORE-EDE, M. (2001): Technologies for the monitoring and prevention of driver fatigue. Proceedings of the First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design. Aspen, CO, USA
- HODDES, E., ZARCONE, V., SMYTHE, H., PHILLIPS, R., DEMENT, W.C. (1973): Quantification of Sleepiness: A New Approach. *Psychophysiology* 10, (4), 431-436

- HORNE, J.A., BAULK, S.D. (2004): Awareness of sleepiness when driving. *Psychophysiology* 41, (1), 161-165
- INGRE, M., ÅKERSTEDT, T., PETERS, B., ANUND, A., KECKLUND, G. (2006a): Subjective sleepiness, simulated driving performance and blink duration: examining individual differences. *Journal of Sleep Research* 15, (1), 47-53
- INGRE, M., ÅKERSTEDT, T., PETERS, B., ANUND, A., KECKLUND, G., PICKLES, A. (2006b): Subjective sleepiness and accident risk avoiding the ecological fallacy. *Journal of Sleep Research* 15, (2), 142-148
- JAP, B.T., LAL, S., FISCHER, P. (2011): Comparing combinations of EEG activity in train drivers during monotonous driving. *Expert Systems with Applications* 38, (1), 996-1003
- JI, Q., ZHU, Z., LAN, P. (2004): Real Time Non-intrusive Monitoring and Prediction of Driver Fatigue. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 53, (4), 1052-68
- JOHNS, M.W. (2000): Sensitivity and specificity of the multiple sleep latency test (MSLT), the maintenance of wakefulness test and the Epworth sleepiness scale: Failure of the MSLT as a gold standard. *Journal of Sleep Research* 9, (1) 5-11
- JOHNS, M.W., CROWLEY, K.E., CHAPMAN, R.J., TUCKER, A.J., HOCKING, C.A. (2008): The test-retest reliability of an ocular measure of drowsiness. *Sleep* 31 (Suppl): A118
- JOHNS, M.W., TUCKER, A., CHAPMAN, R., CROWLEY, K., MICHAEL, N. (2007): Monitoring Eye and Eyelid Movements by infrared Reflectance Oculography to measure Drowsiness in Drivers. *Somnologie* 11, (4), 234-242
- JÜRGENSOHN, T., ZENTSCH, E., ROSE, A., KOLREP-ROMETSCH, H., OEHME, A. (2005): Der Hautleitwiderstand als empfindliches Maß zur Fahrerzustandserkennung. In: L. URBAS & C. STEFFENS (Hrsg): *Zustandserkennung und Systemgestaltung*, VDI-Verlag, Berlin, 155-160
- KAIDA, K., ÅKERSTEDT, T., KECKLUND, G., NILSSON, J.P., AXELSSON, J. (2007): Use of subjective and physiological indicators of sleepiness to predict performance during a vigilance task. *Industrial Health* 45, (4), 520-526
- 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, (7), 1574-1581
- KARRER-GAUß, K. (2011): *Prospektive Bewertung von Systemen zur Müdigkeitserkennung – Ableitung von Gestaltungsempfehlungen zur Vermeidung von Risikokompensation aus empirischen Untersuchungen*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin
- KECKLUND, G., ÅKERSTEDT, T. (1993): Sleepiness in long distance truck driving: an ambulatory EEG study of night driving. *Ergonomics* 36, (9), 1007-1017
- KECKLUND, G., ÅKERSTEDT, T., SANDBERG, D., WAHDE, M., DUKIC, T., ANUND, A., HJÄLMDAHL, M. (2006): State of the art review of driver sleepiness. DROWSI project report, Deliverable 1.1
- KIRCHER, A., UDMAN, M., SANDIN, J. (2002): *Vehicle control and drowsiness*. Swedish National Road and Transport Research Institute, VTI-922A, Linköping, Sweden
- KIRCHER, K., KIRCHER, A., AHLSTRÖM, C. (2009): Results of a field study on a driver distraction warning system, VTI-639A, Linköping, Sweden
- KLAUER, S.G., DINGUS, T.A., NEALE, V.L., SUDWEEKS, J.D., RAMSEY, D.J. (2006): The impact of driver inattention on near crash/crash risk: An analysis using the 100-car naturalistic driving study data. National Highway Traffic Safety Administration. Washington, DC
- KOH, A., JONES, G.R., SPENCER, J.W., THOMAS, I. (2007): Chromatic analysis of signals from a driver fatigue monitoring unit. *Measurement Science and Technology* 18, (3), 747-754
- KRAJEWSKI, J., BATLINER, A., GOLZ, M. (2009): Acoustic sleepiness detection: Framework and validation of a speech-adapted pattern recognition approach. *Behavior Research Methods* 41, (3), 795-804

- LAL, S.K., CRAIG, A. (2001): A critical review of the psychophysiology of driver fatigue. *Biological Psychology* 55, (3), 173-194
- LAL, S.K., CRAIG, A. (2002): Driver fatigue: Electroencephalography and psychological assessment. *Psychophysiology* 39, (3), 313-321
- LIU, C.C., HOSKING, S.G., LENNÉ, M.G. (2009): Predicting driver drowsiness using vehicle measures: Recent insights and future challenges. *Journal of Safety Research* 40, (4), 239-245
- LOWDEN, A., ÅKERSTEDT, T., WIBOM, R. (2004): Suppression of sleepiness and melatonin by bright light exposure during breaks in night work. *Journal of Sleep Research* 13, (1), 37-43
- MABBOTT, N. (2003): ARRB Pro-Active Fatigue Management System. *Road and Transport Research* 12, (1), 56-62
- MABBOTT, N., LYDON, M., HARTLEY, L., ARNOLD, P. (1999): Procedures and devices to monitor operator alertness whilst operating machinery in open-cut coal mines. Research Report ARR-344, ARRB Transport Research Ltd, Vermont, Australia
- MACCHI, M.M., BOULOS, Z., SIMMONS, L., CAMPBELL, S.S. (2002): Effects of an afternoon nap on nighttime alertness and performance in long-haul drivers. *Accident Analysis and Prevention* 34, (6), 825-834
- MAKEIG, S., JOLLEY, K. (1995): COMPTRACK: A compensatory tracking task for monitoring alertness. Technical Document 93-3C, Naval Health Research Center, San Diego, CA
- MALIK, M., BIGGER, J.T., CAMM, A.J., KLEIGER, R.E., MALLIANI, A., MOSS, A.J. (1996): Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal* 17, (3), 354-381
- MAY, J.F., BALDWIN, C.L. (2009): Driver fatigue: The importance of identifying causal factors of fatigue when considering detection and countermeasure technologies. *Transportation Research Part F*, (12), 218-224
- MEINOLD, P.E. (2005): Psychologie des Lid-schlags: eine literatur- und methodenkritische Studie. Dissertation, Universität zu Köln, Köln
- MIMURO, T., MIICHI, Y., MAEMURA, T., HAYAFUNE, K. (1996): Functions and Devices of Mitsubishi Active Safety ASV. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Tokyo, Japan, 248-253
- MOHS, C., PLATHO, C., KOLREP-ROMETSCH, H., JÜRGENSOHN, T. (2011): Integrative Skala für die Selbsteinschätzung und Expertenbewertung von Fahrerzuständen zur Auslegung von Müdigkeitswarnsystemen. In: SCHMID, M., ELEPFANDT, J., ADENAUER und A. LICHTENSTEIN (Hrsg.): Reflexionen und Visionen der Mensch-Maschine-Interaktion – Aus der Vergangenheit lernen, Zukunft gestalten. VDI-Verlag, Berlin, 56-57
- MOLLER, H.J., KAYUMOV, L., BULMASH, E.L., NHAN, J., SHAPIRO, C.M. (2006): Simulator performance, microsleep episodes, and subjective sleepiness: Normative data using convergent methodologies to assess driver drowsiness. *Journal of psychosomatic research* 61, (3), 335-342
- MONK, T.H. (1989): A Visual Analogue Scale Technique to Measure Global Vigor and Affect. *Psychiatry Research* 27, (1), 89-99
- MORRIS, T.L., MILLER, J.C. (1996): Electrooculographic and performance indices of fatigue during simulated flight. *Biological Psychology* 42, (3) 343-360
- MÜNSTERBERG, H. (1914): Grundzüge der Psychotechnik, J.A. Barth, Leipzig
- NÅBO, A. (2009): Driver Attention – Dealing with Drowsiness and Distraction. IVSS Project Report, IVSS/Swedish Road Administration, Borlänge, Sweden
- NORDBAKKE, S., SAGBERG, F. (2007): Sleepy at the wheel: Knowledge, symptoms and behaviour among car drivers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 10, (1), 1-10
- OKEN, B.S., SALINSKY, M.C., ELSAS, S.M. (2006): Vigilance, alertness, or sustained attention: physiological basis and measurement. *Clinical Neurophysiology* 117, (9), 1885-1901
- ORON-GILAD, T., RONEN, A., SHINAR, D. (2008): Alertness maintaining tasks (AMTs) while driving. *Accident Analysis & Prevention* 40, (3), siehe 851-860

- OTMANI, S., PEBAYLE, T., ROGE, J., MUZET, A. (2005): Effect of driving duration and partial sleep deprivation on subsequent alertness and performance of car drivers. *Physiology & Behavior* 84, (5), 715-724
- PAPADELIS, C., CHEN, Z., KOURTIDOU-PAPADELI, C., BAMIDIS, P.D., CHOUVARDA, I., BEKIARIS, E., MAGLAVERAS, N. (2007): Monitoring sleepiness with on-board electrophysiological recordings for preventing sleep-deprived traffic accidents. *Clinical Neurophysiology* 118, (9), 1906-22
- PATEL, M., LAL, S.K.L., KAVANAGH, D., ROSSITER, P. (2011): Applying neural network analysis on heart rate variability data to assess driver fatigue. *Expert Systems with Applications* 38, (6), 7235-42
- PHILIP, P., SAGASPE, P., MOORE, N., TAILLARD, J., CHARLES, A., GUILLEMINAULT, C., BIOULAC, B. (2005): Fatigue, sleep restriction and driving performance. *Accident Analysis & Prevention* 37, (3), 473-478
- RAUCH, N., KAUSSNER, A., KRÜGER, H.-P., BOVERIE S., FLEMISCH, F. (2009): The importance of driver state assessment within highly automated vehicles. Presented at 16th ITS World Congress, Stockholm, Sweden
- REYNER, L.A., HORNE, J.A. (1998): Falling asleep whilst driving: are drivers aware of prior sleepiness? *International Journal of Legal Medicine* 111, (3), 120-123
- ROGÉ, J., PEBAYLE, T., MUZET, A. (2001): Variations of the level of vigilance and of behavioural activities during simulated automobile driving. *Accident Analysis & Prevention* 33, (2), 181-186
- ROSENTHAL, L., ROEHRS, T., ROTH, T. (1993): The sleep-wake activity inventory: A self-report measure of daytime sleepiness. *Biological Psychology*, (34), 810-820
- RUSSO, M., THOMAS M., SING H., THORNE, D., BALKIN, T., WESENSTEN, N., REDMOND, D., WELSH, A., ROWLAND, L., JOHNSON, D., CEPHUS, R., HALL, S., BELENKY, G., KRICHMAR, J. (1999): Sleep deprivation related changes correlate with simulated motor vehicle crashes. In: R.J. CARROLL (Hrsg.), *Ocular Measures of Driver Alertness: Technical conference proceedings*. Office of Motor Carrier and Highway Safety/Federal Highway Administration, Washington DC, 119-127
- SCHLEICHER, R., GALLEY, N., BRIEST, S., GALLEY, L. (2008): Blinks and saccades as indicators of fatigue in sleepiness warnings: looking tired? *Ergonomics* 51, (7), 982-1010
- SCHMIDT, E.A., SCHRAUF, M., SIMON, M., BUCHNER, A., KINCSES, W.E. (2011): The short-term effect of verbally assessing drivers' state on vigilance indices during monotonous daytime driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 14, (3), 251-260
- SCHMIDT, E. A.; SCHRAUF, M.; SIMON, M.; FRITZSCHE, M.; BUCHNER, A.; KINCSES, W. E. (2009): Drivers' misjudgement of vigilance state during prolonged monotonous daytime driving. *Accident Analysis & Prevention* 41 (5), 1087-1093
- SCHNIEDER, S., KRAJEWSKI, J., ESCH, T., BALUCH, B., WILHELM, B. (2012): Nur valide oder auch akkurat? *Somnologie* 16, (2), 106-117
- SHEN, J., BARBERA, J., SHAPIRO, C.M. (2006): Distinguishing sleepiness and fatigue: focus on definition and measurement. *Sleep Medicine Reviews* 10, (1), 63-76
- SIMON, M., SCHMIDT, E. A., KINCSES, W. E., FRITZSCHE, M., BRUNS, A., AUFMUTH, C., BOGDAN, M., ROSENSTIEL, W., SCHRAUF, M. (2011): EEG alpha spindle measures as indicators of driver fatigue under real traffic conditions. *Clinical Neurophysiology* 122, (6), 1168-78
- SIREVAAG, E.J., STERN, J.A. (2000): Ocular measures of fatigue and cognitive factors. In: R. W. BACKS & W. BOUCSEIN (Hrsg.), *Engineering psychophysiology: Issues and applications*, Erlbaum, Mahwah, 269-287
- STAMPI, C., STONE, P., MICHIMORI, A. (1995): A new quantitative method for assessing sleepiness: The alpha attenuation test. *Work & Stress* 9, 368-376
- STEPHAN, K., HOSKING, S., REGAN, M., VERDOON, A., YOUNG, K., HAWORTH N. (2006): The relationship between driving

- performance and the John drowsiness scale as measured by the Optalert system. Report No. 0.252, Monash University Accident Research Centre, Melbourne
- STUIBER, G. (2006): Studie zur Untersuchung der Auswirkungen von Koffein auf den Pupillografischen Schläfrigkeitstest bei gesunden Probanden. Dissertation, Eberhard Karls Universität, Tübingen
- THIFFAULT, P., BERGERON, J. (2003): Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study. *Accident Analysis & Prevention* 35, (3), 381-391
- TEN THOREN, C., GUNDEL, A. (2003): Müdigkeit als Unfallursache im Stadtbereich — eine Befragung von Unfallbeteiligten. *Fatigue as Cause of Road Accidents in Urban Areas — A Questionnaire Study. Somnologie* 7, (4), 125-133
- TSAI, P., HU, W.-C.C., KUO, T.B.J., SHYU, L.-Y.Y. (2009): A portable device for real time drowsiness detection using novel active dry electrode system. 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Minneapolis, USA, 3775-78
- Van den HEUVEL, C.J., NOONE, J.T., LUSHINGTON, K., DAWSON, D. (1998): Changes in sleepiness and body temperature precede nocturnal sleep onset: evidence from a polysomnographic study in young men. *Journal of Sleep Research* 7, (3), 159-166
- Van der HULST, M., MEIJMAN, T., ROTHENGATTER, T. (2001): Maintaining task set under fatigue: a study of time-on-task effects in simulated driving. *Transportation Research Part F* 4, (2), 103-118
- Van WINSUM, W., BROOKHUIS, K.A., de WAARD, D. (2000): A comparison of different ways to approximate time-to-line crossing (TLC) during car driving. *Accident Analysis & Prevention* 32, 47-56
- VERWEY, W.B., ZAIDEL, D.M. (2000): Predicting drowsiness accidents from personal attributes, eye blinks and ongoing driving behaviour. *Personality and Individual Differences* 28, 123-142
- VÖHRINGER-KUHNT, T., BAUMGARTEN, T., KARRER, K., BRIEST, S. (2004): Wierwille's method of driver drowsiness evaluation revisited. 3rd International Conference on Traffic & Transport Psychology, Nottingham, UK
- WEIL de VEGA, C. (2007): Fahrerschläfrigkeit gemessen mit den pupillografischen Schläfrigkeitstest an süddeutschen Autobahnraststätten. Dissertation, Eberhard-Karls-Universität, Tübingen
- WHITLOCK, A. (2002): Driver Vigilance Devices: Systems Review. Quintec Associates Limited, Surrey, UK
- WIEGAND, D.M., McCLAFFERTY, J., McDONALD, S.E., HANOWSKI, R.J. (2009): Development and Evaluation of a Naturalistic Observer Rating of Drowsiness Protocol. National Surface Transportation Safety Center for Excellence. Blacksburg, VA
- WIERWILLE, W.W., ELLSWORTH, L.A. (1994): Evaluation of driver drowsiness by trained raters. *Accident Analysis & Prevention* 26, (5), 571-581
- WIERWILLE, W.W., ELLSWORTH, L.A., WREGGIT, S.S., FAIRBANKS, R.J., KIRN, C.L. (1994): Research on Vehicle-Based Driver Status/Performance Monitoring; Development, Validation, and Refinement of Algorithms for Detection of Driver Drowsiness. Final Report: DOT HS 808 247. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC
- WIERWILLE, W.W., LEWIN, M.G., FAIRBANKS, R.J. (1996): Research on vehicle-based driver status/performance monitoring Part III. Final Report: DOT HS-808 640. National Highway Traffic Safety Administration, Washington DC
- WILHELM, B. (2007): Über die Spontanzillationen der Pupille und ihre Beziehung zum zentralnervösen Aktivierungsniveau, Steinbeis-Edition, Stuttgart, Berlin, 1. Aufl., S. 264
- WILHELM, B., RÜHLE, K.-H., WIDMAIER, D., LÜDTKE, H., WILHELM, H. (1998a): Objektivierung von Schweregrad und Therapieerfolg beim obstruktiven Schlafapnoe-Syndrom mit dem pupillografischen Schläfrigkeitstest. *Somnologie* 2, (2) 51-57
- WILHELM, H., LÜDTKE, H., WILHELM, B. (1998b): Pupillographic sleepiness testing in hypersomniacs and normals. *Graefe's Archive*

for *Clinical and Experimental Ophthalmology*,
236, (10), 725-729

WRIGHT, N.A., STONE, B.M., HORBERRY, T.J.,
REED, N. (2007): A review of in-vehicle
sleepiness detection devices. Published project
Report 157. TRL Limited, Crowthorne, UK

YAMAGUCHI, M., DEGUCHI, M., WAKASUGI, J.,
ONO, S., TAKAI, N., HIGASHI, T., MIZUNO, Y.
(2006): Hand-held monitor of sympathetic
nervous system using salivary amylase activity
and its validation by driver fatigue assessment.
Biosensors and Bioelectronics 21, (7), 1007-14

YU, X. (2009): Real-time nonintrusive detection of
driver drowsiness: Final Report: CTS 09-15,
Center for Transportation Studies, University of
Minnesota, USA

ZHAO, C., ZHENG, C., ZHAO, M., LIN, J. (2010):
Physiological Assessment of Driving Mental
Fatigue Using Wavelet Packet Energy and
Random Forests. *American Journal of
Biomedical Sciences* 2, (3), 262-274

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

2000

- F 29: Verkehrssicherheit runderneuerter Reifen
Teil 1: Verkehrssicherheit runderneuerter PKW-Reifen
Glaeser
Teil 2: Verkehrssicherheit runderneuerter Lkw-Reifen
Aubel € 13,00
- F 30: Rechnerische Simulation des Fahrverhaltens von Lkw mit Breitreifen
Faber € 12,50
- F 31: Passive Sicherheit von Pkw bei Verkehrsunfällen – Fahrzeugsicherheit '95 – Analyse aus Erhebungen am Unfallort
Otte € 12,50
- F 32: Die Fahrzeugtechnische Versuchsanlage der BAST – Einweihung mit Verleihung des Verkehrssicherheitspreises 2000 am 4. und 5. Mai 2000 in Bergisch Gladbach € 14,00

2001

- F 33: Sicherheitsbelange aktiver Fahrdynamikregelungen
Gaupp, Wobben, Horn, Seemann € 17,00
- F 34: Ermittlung von Emissionen im Stationärbetrieb mit dem Emissions-Mess-Fahrzeug
Sander, Bugsel, Sievert, Albus € 11,00
- F 35: Sicherheitsanalyse der Systeme zum Automatischen Fahren
Wallentowitz, Ehmanns, Neunzig, Weilkes, Steinauer, Bölling, Richter, Gaupp € 19,00
- F 36: Anforderungen an Rückspiegel von Krafträdern
van de Sand, Wallentowitz, Schrüllkamp € 14,00
- F 37: Abgasuntersuchung - Erfolgskontrolle: Ottomotor – G-Kat
Afflerbach, Hassel, Schmidt, Sonnborn, Weber € 11,50
- F 38: Optimierte Fahrzeugfront hinsichtlich des Fußgängerschutzes
Friesen, Wallentowitz, Philipps € 12,50

2002

- F 39: Optimierung des rückwärtigen Signalbildes zur Reduzierung von Auffahrunfällen bei Gefahrenbremsung
Gail, Lorig, Gelau, Heuzeroth, Sievert € 19,50
- F 40: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Spritzschutzsysteme an Kraftfahrzeugen
Domsch, Sandkühler, Wallentowitz € 16,50

2003

- F 41: Abgasuntersuchung: Dieselfahrzeuge
Afflerbach, Hassel, Mäurer, Schmidt, Weber € 14,00
- F 42: Schwachstellenanalyse zur Optimierung des Notausstiegssystems bei Reisebussen
Krieg, Rüter, Weißgerber € 15,00
- F 43: Testverfahren zur Bewertung und Verbesserung von Kinderschutzsystemen beim Pkw-Seitenaufprall
Nett € 16,50

- F 44: Aktive und passive Sicherheit gebrauchter Leichtkraftfahrzeuge
Gail, Pastor, Spiering, Sander, Lorig € 12,00

2004

- F 45: Untersuchungen zur Abgasemission von Motorrädern im Rahmen der WMTC-Aktivitäten
Steven € 12,50
- F 46: Anforderungen an zukünftige Kraftrad-Bremssysteme zur Steigerung der Fahrsicherheit
Funke, Winner € 12,00
- F 47: Kompetenzerwerb im Umgang mit Fahrerinformationssystemen
Jahn, Oehme, Rösler, Krems € 13,50
- F 48: Standgeräuschmessung an Motorrädern im Verkehr und bei der Hauptuntersuchung nach § 29 StVZO
Pullwitt, Redmann € 13,50
- F 49: Prüfverfahren für die passive Sicherheit motorisierter Zweiräder
Berg, Rücker, Bürkle, Mattern, Kallieris € 18,00
- F 50: Seitenairbag und Kinderrückhaltesysteme
Gehre, Kramer, Schindler € 14,50
- F 51: Brandverhalten der Innenausstattung von Reisebussen
Egelhaaf, Berg, Staubach, Lange € 16,50
- F 52: Intelligente Rückhaltesysteme
Schindler, Kühn, Siegler € 16,00
- F 53: Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbag
Klanner, Ambos, Paulus, Hummel, Langwieder, Köster € 15,00
- F 54: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern an Kreuzungen durch rechts abbiegende Lkw
Niewöhner, Berg € 16,50

2005

- F 55: 1st International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 3rd/4th September 2004 at Hannover Medical School € 29,00

2006

- F 56: Untersuchung von Verkehrssicherheitsaspekten durch die Verwendung asphärischer Außenspiegel
Bach, Rüter, Carstengerdes, Wender, Otte € 17,00
- F 57: Untersuchung von Reifen mit Notlaufeigenschaften
Gail, Pullwitt, Sander, Lorig, Bartels € 15,00
- F 58: Bestimmung von Nutzfahrzeugemissionsfaktoren
Steven, Kleinebrahm € 15,50
- F 59: Hochrechnung von Daten aus Erhebungen am Unfallort
Hautzinger, Pfeiffer, Schmidt € 15,50
- F 60: Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit Vollrath, Briest, Schießl, Drewes, Becker € 16,50

2007

- F 61: 2nd International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 1st/2nd September 2006 at Hannover Medical School € 30,00
- F 62: Einfluss des Versicherungs-Einstufungstests auf die Belange der passiven Sicherheit
Rüter, Zoppke, Bach, Carstengerdes € 16,50
- F 63: Nutzerseitiger Fehlgebrauch von Fahrerassistenzsystemen
Marberger € 14,50

F 64: Anforderungen an Helme für Motorradfahrer zur Motorradsicherheit

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

Schüler, Adolph, Steinmann, Ionescu € 22,00

F 65: Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugbeleuchtung im Hinblick auf ein NCAP für aktive Fahrzeugsicherheit

Manz, Kooß, Klinger, Schellinger € 17,50

2008**F 66: Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen**

Jebas, Schellinger, Klinger, Manz, Kooß € 15,50

F 67: Optimierung von Kinderschutzsystemen im Pkw

Weber € 20,00

F 68: Cost-benefit analysis for ABS of motorcycles

Baum, Westerkamp, Geißler € 20,00

F 69: Fahrzeuggestützte Notrufsysteme (eCall) für die Verkehrssicherheit in Deutschland

Auerbach, Issing, Karrer, Steffens € 18,00

F 70: Einfluss verbesserter Fahrzeugsicherheit bei Pkw auf die Entwicklung von Landstraßenunfällen

Gail, Pöppel-Decker, Lorig, Eggers, Lerner, Ellmers € 13,50

2009**F 71: Erkennbarkeit von Motorrädern am Tag – Untersuchungen zum vorderen Signalbild**

Bartels, Sander € 13,50

F 72: 3rd International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 5th/6th September 2008 at Hannover Medical School

€ 29,50

F 73: Objektive Erkennung kritischer Fahrsituationen von Motorrädern

Seiniger, Winner € 16,50

2010**F 74: Auswirkungen des Fahrens mit Tempomat und ACC auf das Fahrerverhalten**

Vollrath, Briest, Oeltze € 15,50

F 75: Fehlgebrauch der Airbagabschaltung bei der Beförderung von Kindern in Kinderschutzsystemen

Müller, Johannsen, Fastenmaier € 15,50

2011**F 76: Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II**

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

Bovenkerk, Gies, Urban € 19,50

F 77: 4th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

€ 29,50

F 78: Elektronische Manipulation von Fahrzeug- und Infrastruktursystemen

Dittmann, Hoppe, Kiltz, Tuhscheerer € 17,50

F 79: Internationale und nationale Telematik-Leitbilder und ITS-Architekturen im Straßenverkehr

Boltze, Krüger, Reusswig, Hillebrand € 22,00

F 80: Untersuchungskonzepte für die Evaluation von Systemen zur Erkennung des Fahrerzustands

Eichinger € 15,00

F 81: Potenzial aktiver Fahrwerke zur Erhöhung der Fahrsicherheit von Motorrädern

Wunram, Eckstein, Rettweiler € 15,50

F 82: Qualität von on-trip Verkehrsinformationen im Straßenverkehr – Quality of on-trip road traffic information – BAST-Kolloquium 23. & 24.03.2011

Lotz, Luks

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 20,00

2012**F 83: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung – Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe**

Gasser, Arzt, Ayoubi, Bartels, Bürkle, Eier, Flemisch, Häcker, Hesse, Huber, Lotz, Maurer, Ruth-Schumacher, Schwarz, Vogt € 19,50

F 84: Sicherheitswirkungen von Verkehrsinformationen – Entwicklung und Evaluation verschiedener Warnkonzepte für Stauendwarnungen

Bogenberger, Dinkel, Totzke, Naujoks, Mühlbacher € 17,00

F 85: Cooperative Systems Stakeholder Analysis

Schindhelm, Calderaro, Udin, Larsson, Kernstock, Jandrisits, Ricci, Geißler, Herb, Vierkötter € 15,50

2013**F 86: Experimentelle Untersuchung zur Unterstützung der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen für ältere Kraftfahrer**

Hoffmann, Wipking, Blanke, Falkenstein € 16,50

F 87: 5th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 88: Comparative tests with laminated safety glass panes and polycarbonate panes

Gehring, Zander € 14,00

F 89: Erfassung der Fahrermüdigkeit

Platho, Pietrek, Kolrep € 16,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Carl Schünemann Verlag GmbH

Zweite Schlachtpforte 7

D-28195 Bremen

Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53

Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48

www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Komplettverzeichnis erhältlich.