

# Beurteilung von Systemen im Fahrzeug – welche Messmethoden sind geeignet?<sup>1</sup>

## 1 Problemstellung

Eines der wichtigsten Ziele bei der Durchführung von Fahrversuchen stellt die Erzielung von Ergebnissen mit einer hohen Aussagekraft dar. Hinter der Frage nach der Aussagekraft steht neben vielen anderen das Kriterium der Objektivität der Daten an erster Stelle. Jedoch wird die Objektivität der Daten dadurch eingeschränkt, dass sich jeder Fahrer anders verhält und Dinge aus seiner individuellen Sicht beurteilt. Und gerade diese Verhaltensweisen sowie die individuelle Sicht der Fahrer, die das Fahrzeug im Alltag nutzen, ist für die Entwicklung von Fahrzeugen unverzichtbar und spricht dafür, dass Fahrversuche mit „normalen“ Autofahrern durchgeführt werden, um das reale Fahrerverhalten so gut wie möglich zu erfassen und zu beurteilen.

Bei der Neu- bzw. Weiterentwicklung von Teilsystemen im Fahrzeug ergeben sich viele Fragen, die durch Fahrversuche beantwortet werden sollen (Anm.: Der Begriff Teilsystem wird hier stellvertretend für Fahrerassistenz- und -informationssysteme, die fahrdynamische Auslegung des Fahrzeuges sowie Elemente des Innenraums, wie Anzeigen und Bedienelemente verwendet). Typische Fragen sind: In welchen Situationen benutzt der Fahrer das jeweilige Teilsystem? Wie verändert

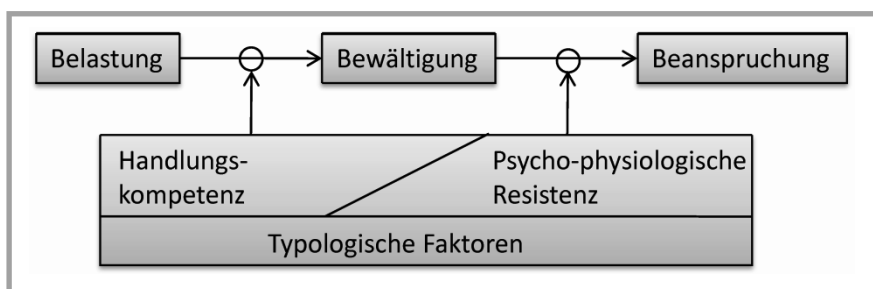


Bild 1: Funktioneller Ursachen-Wirkungs-Zusammenhang von Belastungen und Beanspruchungen (nach Luczak 1993)

sich das Fahrerverhalten durch das jeweilige Teilsystem? Welche Auswirkungen hat das Teilsystem auf die Sicherheit? Ist die Funktionalität des Teilsystems an den Fahrer angepasst? Ist das Teilsystem benutzerfreundlich gestaltet? Ist das Teilsystem für den Fahrer komfortabel? Wird das Teilsystem vom Fahrer als Unterstützung akzeptiert?

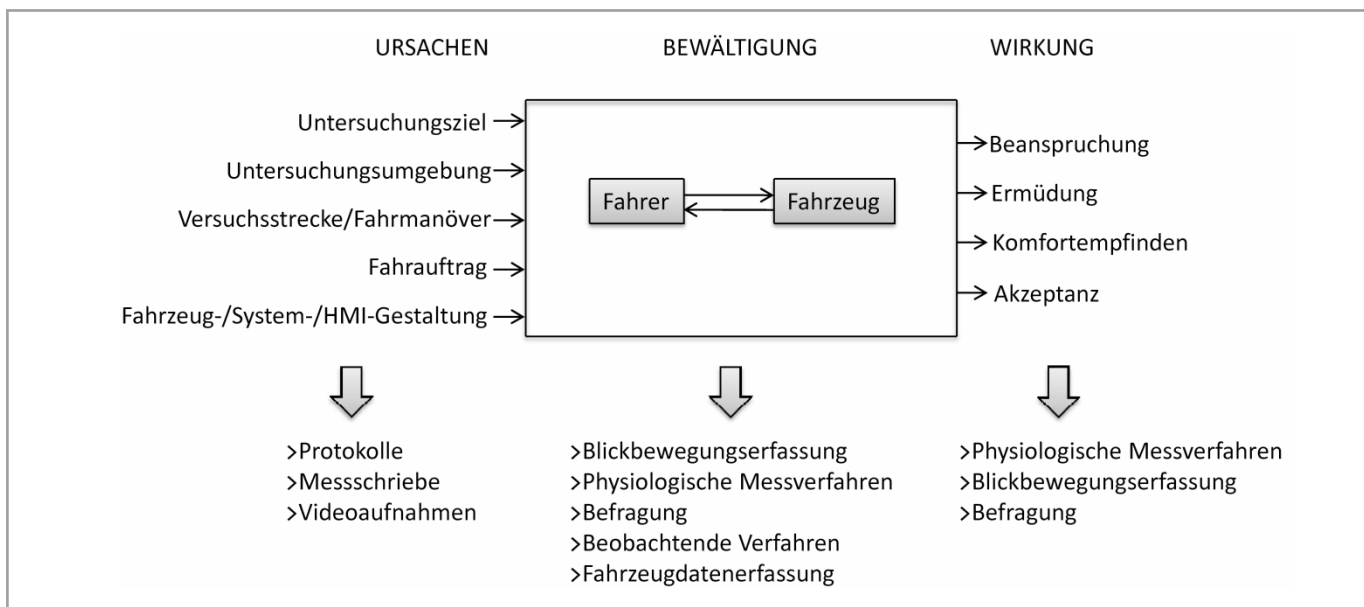
Eine Auswahl menschenbezogener Messgrößen und -faktoren, die zur Beantwortung dieser und ähnlicher Fragestellungen beitragen, werden in diesem Beitrag diskutiert. Aufgrund des unterschiedlichen Skalenniveaus der dargestellten Größen, sind Messgrößen von Messfaktoren eigentlich abzugrenzen (zu den Begriffen Belastungsfaktor und Belastungsgröße siehe Bokranz & Landau 1991). Aufgrund der Verständlichkeit wird in diesem Beitrag der Begriff der Messgröße auch für Messfaktoren verwendet.

## 2 Systematisierung von Messgrößen

Bei der Planung von Fahrversuchen, die zur Beurteilung der Gestaltungsgüte von Teilsystemen im Fahrzeug durchgeführt werden, sind für die Beantwortung der jeweiligen Fragestellung geeignete Messgrößen auszuwählen. Für eine systematische Betrachtung bietet es sich an, die Messgrößen in einen Ursachen-Wirkungs-Zusammenhang zu bringen (siehe Bild 1).

Werden diesem Ursachen-Wirkungs-Zusammenhang die Untersuchungsobjekte im Fahrversuch sowie die möglichen Messgrößen zugeordnet, ergibt sich die in Bild 2 dargestellte Systematik. Um eine hohe Aussagekraft der durch Fahrversuche erzielten Ergebnisse zu erreichen, ist es wichtig, die drei Bereiche Ursachen, Bewältigung und Wirkungen durch die erhobenen Messgrößen hinreichend abzudecken.

<sup>1</sup>Teil eines Vortrages von Prof. Dr.-Ing. R. Bruder anlässlich des 4. Kolloquiums Mensch&Fahrzeug, 18.-19. März 2009 an der TU Darmstadt



**Bild 2:** Ursache-Bewältigung-Wirkung: Zuordnung von Untersuchungsobjekten und Messmethoden

Das mit den Fahrversuchen verfolgte Untersuchungsziel sollte im Bereich der Ursachen genau definiert werden. Die Formulierung von Hypothesen, die durch die Versuche überprüft werden sollen, unterstützt die genaue Abgrenzung des Untersuchungsziels und dient dazu, die Messmethoden sinnvoll auszuwählen. Ebenso eng an das Untersuchungsziel geknüpft ist die Frage nach der für die jeweilige Fragestellung geeigneten Untersuchungsumgebung, d. h. sollen die Versuche im Labor, auf einem Testgelände oder im öffentlichen Straßenverkehr stattfinden (siehe hierzu Bruder et al. 2007), sowie der Zusammenstellung der Versuchsstrecke bzw. der Fahrmanöver. Eine standardisierte Anweisung an den Fahrer, (der Fahrauftrag) führt dazu, dass alle Fahrer über dieselben Informationen zu den durchzuführenden Versuch verfügen und eine genaue Anleitung bekommen, wie sie zu fahren haben oder worauf sie speziell achten sollen. Ebenfalls Einfluss auf die Bewältigung der Aufgabe sowie die Beanspruchungen des Fahrers hat die Gestaltung des untersuchten Fahrzeuges bzw. des untersuchten Teilsystems. Im Bereich der Ursachen werden in der Regel Protokolle und Messschriebe, unter Umständen auch in Form von

Videoaufnahmen der Umgebung als Messmethoden eingesetzt. Diese dienen dazu, Besonderheiten während der Fahrt bzw. den Status des untersuchten Teilsystems zu dokumentieren.

Dem Bereich der Handlungen werden Messgrößen zugeschrieben, die die Art und Weise der Bewältigung der Ursachen durch den Fahrer beschreiben. Hier wird das Zusammenwirken von Fahrer und Fahrzeug analysiert. Steht die Untersuchung des Fahrers im Vordergrund, so hat sich die Blickbewegungsanalyse in den letzten Jahren als eine wichtige Methode herausgebildet, um zu erfahren, wann der Fahrer wohin schaut und somit gemäß der methodologischen Grundannahmen von Just & Carpenter (1980) darauf zu schließen, welche Informationen er aufnimmt und verarbeitet. Ebenso können mit physiologischen Methoden (z. B. Elektromyographie der Bein- oder Armmuskulatur) über die Muskelanspannungen Kraftaufbringung und damit verbundene Bewegungen der Fahrer erfasst werden. Auch Befragungen sind eine geeignete Methode, um vom Fahrer direkt zu erfahren, wie er die Bewältigung der Fahraufgabe einschätzt. Die Frage wie der Fahrer mit dem Fahrzeug zusammen-

wirkt, wie er dieses „bedient“ kann bei Betrachtung der Mensch-Maschine-Schnittstellen geklärt werden. Aus den Fahrzeugdaten kann entnommen werden, welche Bedienelemente der Fahrer wann bzw. in welcher Situation nutzt. Aber auch beobachtende Verfahren wie Expertenratings zur Einstufung von Fahrermerkmalen z. B. anhand von Videoaufnahmen geben Auskunft über Zeitpunkt sowie Art und Weise der Nutzung von Systemen im Fahrzeug. Wie das Fahrzeug auf die Eingaben vom Fahrer reagiert, wird über fahrdynamische Messgrößen (z. B. Geschwindigkeit, Beschleunigungen) erfasst.

Die Wirkung der Ursachen und die Bewältigung dieser durch Fahrer zeigen sich in seiner Beanspruchung, infolgedessen auch in seiner Ermüdung sowie in seinem Komfortempfinden und seiner Akzeptanz der untersuchten Teilsysteme. Für die messtechnische Erfassung der Wirkungen kommen physiologische Messverfahren in Frage, um z. B. Aussagen zur emotionalen und/oder mentalen Beanspruchung der Fahrer oder der Ermüdung einzelner Muskelgruppen zu erhalten. Ebenso kann aus dem Blickbewegungsverhalten der Fahrer auf eine

Beanspruchung geschlossen werden. Ergänzend wird fast immer die weit verbreitete Methode der Befragung von Fahrern zu ihrem subjektiven Beanspruchungsempfinden eingesetzt.

### 3 Menschbezogene Messgrößen

#### 3.1 Blickbewegung

Die Blickbewegungsanalyse gibt bei Fahrversuchen objektive Auskünfte über die Bewältigung und Wirkung eines Fahrauftrages bzw. einer Nebentätigkeit. Da das Auge aktiv zur Exploration der visuellen Umgebung eingesetzt wird (Rötting 2001), besteht die Möglichkeit von den Augenbewegungen auf die Aufmerksamkeitsverteilung des Fahrers rückzuschließen. Dies ist von gesteigertem Interesse im Fahrzeugbereich, da nach Bartl (2006) 36% aller Unfälle durch Unaufmerksamkeit verursacht werden. Die Analyse der Aufmerksamkeitsverteilung bei Probandenversuchen mit neuen Fahrerassistenz- und -informations-systemen ist daher ein Werkzeug zur Absicherung gegenüber potentieller Unfallrisiken.

Das menschliche Auge kann sich auf vielfache Weise für die Informationsaufnahme adaptieren. Zwei dieser Möglichkeiten sind Fixationen und Sakkaden. Sie machen den größten Teil der bewussten Augenbewegungen aus. Während einer Fixation nimmt das Auge über die Netzhaut Informationen aus der Umgebung auf und leitet diese nach einer Vorverarbeitung an das Gehirn weiter. Während einer Sakkade hingegen nimmt das Auge keine visuellen Informationen auf. Die Bewegungen des menschlichen Auges, welche aus Sakkadensprüngen und Fixationen bestehen, werden in Verbindung mit dem Wahrnehmungsprozess als Blickbewegung bezeichnet. Rötting (2001) deklinierte drei aufgabenanalytische Ebenen der Informationsaufnahme. Sie zeigen, welche Informationen aus Blickbewegungsdaten abgeleitet werden können. Die 1. Ebene dient der Typisierung und Beschreibung der physiologischen Kosten bei der

Bearbeitung von Aufgabenelementen, Aufgabenkomponenten und gesamten Aufgaben. Sie beschreibt die Informativischen und energetische Kosten. Ebene 2 dient der Erklärung, Bemessung und Prognose des Zeitverbrauchs für die Bearbeitung von Aufgabenbestandteilen und kombinierten Aufgaben. Sie beschreibt die Zeitverbräuche. Zur Ebene 3 zählt die analytische Beschreibung und der Vergleich unterschiedlicher Bedingungen der Mensch-Maschine-Interaktion in mehreren Dimensionen. Drei Hypothesen, die auf Just & Carpenter (1980) zurückgehen, sind die methodologischen Grundannahmen für die Auswertungen von Blickbewegungen:

1. Die Eye-Mind Assumption postuliert, dass fixierte Objekte Gegenstand kognitiver Verarbeitung sind. Somit können Fixationen Aufschlüsse über den momentanen Gegenstand der Informationsverarbeitung der Versuchspersonen geben.
2. Die Immediacy Assumption postuliert, dass fixierte Informationen sofort verarbeitet werden. Die Fixationsdauer kann somit einen Aufschluss über die Dauer der Informationsverarbeitung der Versuchspersonen geben.
3. Die Sequence Assumption besagt, dass die Reihenfolge der Fixationen Rückschlüsse auf die Abfolge der Informationsverarbeitungsschritte zulässt.

Aufgrund dieser Annahmen werden Kennwerte, die aus den Blickzuwendungszeiten errechnet werden, abgeleitet. Beispiele sind Fixationsdauern, welche Rückschlüsse auf die Schwierigkeit der visuellen Aufgabe erlauben und Fixationshäufigkeiten, die Rückschlüsse auf das visuelle Prüfverhalten der Fahrer zulassen (Fairclough et al. 1993). Auch maximale Einzelfixationsdauern, die im Fahrzeugbereich Informationen darüber geben, wie unterbrechbar eine visuelle Tätigkeit ist, beziehungsweise wie lange ein Fahrzeugführer für diese Tätigkeit seinen Blick ununterbrochen von der Fahrbahn abwenden muss, führen zu relevanten Erkenntnissen.

Betrachtet man die Aufgaben des Fahrers, lassen sich diese anhand der

Schadenseintritts- und -ausmaßwahrscheinlichkeit in unbedingt notwendige Primäraufgaben, wie Fahrzeugführung und Stabilisierung, wichtige Sekundäraufgaben, wie Blinken und Beachten von Verkehrsregeln, sowie tertiäre Aufgaben, wie die Nutzung von Komfort-, Informations- und Kommunikationssystemen, unterteilen (Bubb 2003).

Für eine methodische Auswertung der Blickbewegungen werden Aufgaben und Objekte, welche für eine Studie von besonderem Interesse sind, einander zugeordnet, sogenannte „Areas of Interest“ (AOI). Eine Blickbewegungsanalyse, welche Fixationsdauern und Fixationshäufigkeiten nach diesen AOIs getrennt auswertet, ist geeignet zur Bewertung der Verteilung der Aufmerksamkeit und daraus abgeleitet, der visuellen Ablenkung eines Fahrers. Fixationsdauern und maximale Fixationsdauern können objektive Informationen über die Ablenkungsdauer und die Unterbrechbarkeit einer Nebentätigkeit geben. Abgeleitet aus der Eye-Mind Assumption wird davon ausgegangen, dass man bei einer hohen Blickdauer auf ein AOI einer sekundären oder tertiären Aufgabe auf eine Ablenkung des Fahrers von der primären Fahraufgabe schließen kann. Zur Ableitung von Aussagen über die visuelle Beanspruchung der Fahrer wird die Anzahl der Blickwechsel pro Zeiteinheit betrachtet. Die Blickbewegungsanalyse ermöglicht auch Rückschlüsse über das Situationsbewusstsein (Situational Awareness) des Fahrers. Eine wichtige Orientierungshilfe für die Begriffe und Kenngrößen bei der Messung des Blickverhaltens von Fahrern bei Fahrzeugen bietet die EN ISO 15007-1 (2003).

Die Blickbewegungsanalyse im Fahrzeug erhebt nicht den Anspruch der vollständigen Rekonstruktion der mentalen Aktivitäten des Menschen, bietet jedoch eine tragfähige Methode im Sinne einer anwendungsbezogenen Forschung. Sie ermöglicht es, den Verlauf der Informationsaufnahme- und -verarbeitung zu charakterisieren.

Aussagen, die durch den Einsatz der Blickbewegungsanalyse getroffen werden können, werden im Folgenden an dem Beispiel von Fahrversuchen mit einem Nachtsichtsystem mit Fuß-

gängerwarnung gezeigt (Fuchs et al. 2008b, Fuchs et al. i.V.).

Zur Überprüfung der unterschiedlichen Gestaltungsvarianten eines Night Vision Systems mit Fußgängermarkierung wurde eine Methodik zur Durchführung von Versuchen im Feld und im kontrollierten Feld entwickelt. Ziel der Untersuchung war die Abwägung von Nutzervorteilen und möglichen Gefahrenquellen. Hierfür wurden drei Systemausführungen mit hinsichtlich der Darstellungsdauer und des Abstraktionsgrades variierender HMI-Gestaltung der Fußgängermarkierung mit zwei Baselines (Fahrt ohne Nachtsichtsystem, Fahrt mit konventionellem Nachtsichtsystem) verglichen. Ein Schwerpunkt war die Analyse der Aufmerksamkeitsverteilung der Fahrer. Als AOIs wurden Straße, Fußgänger, Head up Display, Kombiinstrument und Innenraum definiert. Die maximale Fixationsdauer auf das HUD (Bild 3, links) quantifiziert die im Fahrzeug hervorgerufenen visuellen Ablenkungen durch verschiedene Systeme im Serien- und Prototypenstadium. Bei System C waren die maximalen Fixationsdauern auf das HUD im Mittel über alle Fahrer am geringsten (signifikant niedriger als bei Baseline 2). Der Vergleich der Kennwerte maximale Fixationsdauern, Gesamtfixationsdauern und Gesamtfixationshäufigkeiten zeigt,

dass die Blickabwendungen der Fahrer bei System C kürzer sind als bei den anderen Testbedingungen. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die visuelle Tätigkeit mit System C leichter unterbrechbar ist.

Die Blickbewegungsanalyse ermöglicht es, auch Verbesserungen der Informationsaufnahme von Probanden objektiv zu messen. Bild 3 (rechts) zeigt die Anzahl der Fußgänger, die von den Versuchspersonen bei den verschiedenen HMI Auslegungen entdeckt wurden, nur mit System B wurden alle Fußgänger erkannt. Es zeigt sich, dass nicht jede Darstellungsvariante die Warnmeldung dem Fahrer auf eine effiziente Art präsentiert.

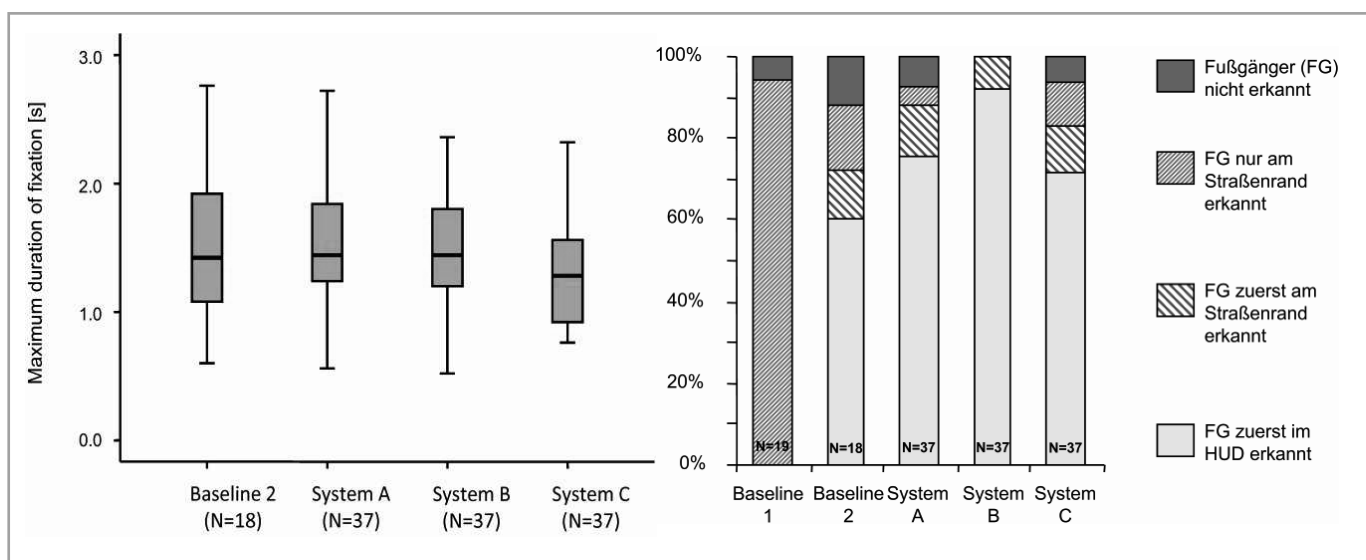
### 3.2 Fahrzeuglängs- und -querführung

Fahrdynamische Größen, die die Fahrzeuglängs- und -querführung quantifizieren, beschreiben das Fahrerverhalten und somit die Bewältigung der Fahraufgabe durch den Fahrer. Fahrdynamische Größen geben die Fahrzeugreaktionen wieder, die sich als Wirkungen infolge von Eingaben des Fahrers einstellen. Eingaben des Fahrers, wie die Betätigung von Steuer- oder Bedienelementen, sind

abhängig von der Fahraufgabe, seiner Fahrleistung sowie des Fahrerzustandes. Anhand seiner Eingaben lassen sich Rückschlüsse auf seinen Zustand und seine Absichten ziehen.

Einige dieser Informationen sind in heutigen Fahrzeugen einfach verfügbar. Die verschiedenen Steuergeräte neuerer Fahrzeuge kommunizieren über den sogenannten CAN-Bus beziehungsweise Flexray, der sie untereinander vernetzt. Jedes Steuergerät sendet diejenigen Botschaften, die es anhand der Informationen entsprechender Sensorik generiert, auf den Bus. Andere Steuergeräte hören ihn ab und filtern diejenigen Botschaften und Signale heraus, die für sie von Interesse sind. Dies erlaubt eine effiziente Verbreitung der Informationen. Vom CAN-Bus können unter anderem folgende Signale abgegriffen werden: Motordrehzahl, Motormoment, Fahrzeuggeschwindigkeit, Fahrzeugquer- und -längsbeschleunigung, Gierrate, Lenkwinkel, Fahrpedalstellung und Bremsdruck sowie Informationen über die Bedientätigkeiten des Fahrers. Der Abstand zum Vorausfahrenden bzw. der Abstand zur linken und rechten Begrenzungslinie des Fahrstreifens ist bei einigen Fahrzeugen ebenfalls messbar.

Um Informationen über Fahrerzustand und -charakteristik zu erhalten, stellt



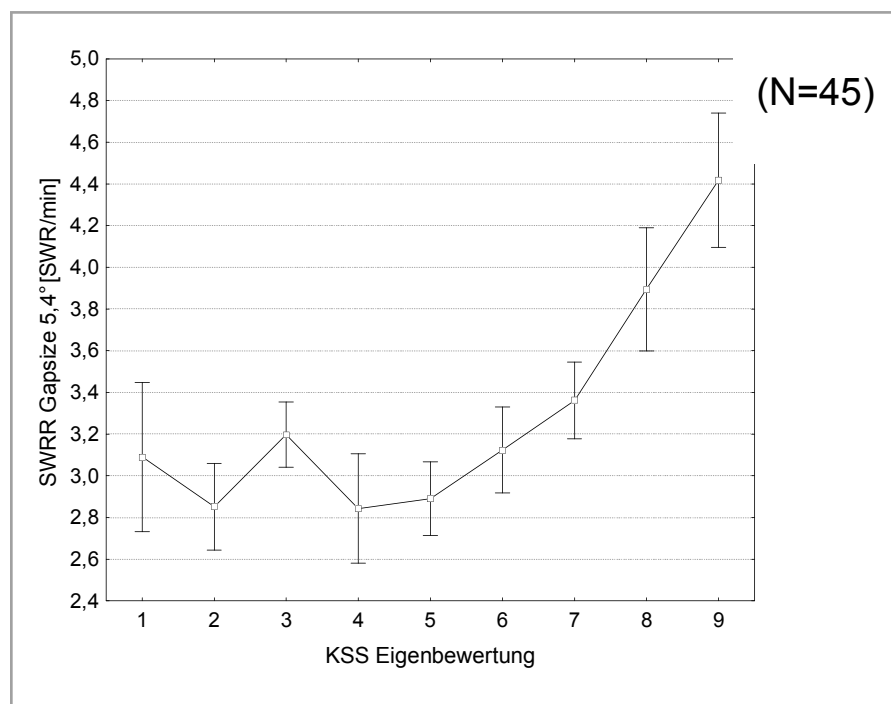
**Bild 3:** Links: Maximale Fixationsdauern des HUD (in s) rechts: Anzahl der erkannten Fußgänger bei verschiedenen Night Vision Systemen

sich die Frage, wie eine sinnvolle Interpretation von Fahrzeugsignalen aussehen kann. Je nach interessierender Messgröße müssen dazu verschiedene Fahrzeugsignale betrachtet werden. Eine wichtige Information des Fahrerzustandes ist sein Workload, d. h. seine Beanspruchung infolge aller Aufgaben, die an ihn gestellt werden, die hier in den Bereich der Wirkungen auf den Fahrer eingeordnet werden. Der Workload ist stark abhängig von der jeweiligen Fahrsituation.

Ein Indikator für Fahrsituationen mit höherem Workload ist beispielsweise die Betätigung des Blinkers. Diese Information wird in bereits entwickelten Workload-Managern genutzt. Wenn der Fahrer durch die Aktivierung des Blinkers einen Fahrstreifenwechsel ankündigt, reagiert das Fahrzeug mit einer Verzögerung von Warnmeldungen niederer Priorität. Erst wenn der Blinker deaktiviert wird, kommt es zur Ausgabe der Warnungen. So wird eine unnötige Erhöhung des Workloads in anspruchsvolleren Fahrsituationen vermieden.

Eine Fahrstilerkennung anhand von Fahrzeugsignalen ist gleichermaßen möglich. Sportliche Fahrer können durch das Betätigungsverhalten des Fahrpedals von komfortorientierten unterschieden werden. Speziell im Anfahrvorgang gibt es deutliche Unterschiede. Färber (2005) konnte zeigen, dass die Gaspedalstellung beim ersten Plateau nach einem Anfahrvorgang bei sportlichen Fahrern signifikant höher ist als bei den anderen Fahrern.

Eine weitere Größe des Fahrerzustandes ist sein Müdigkeitsgrad. Da ein großer Anteil der Unfälle durch Müdigkeit bedingt ist, kommt dieser Information eine besonders wichtige Rolle zu. Ein weit verbreiteter Kennwert zur Erfassung von Fahrermüdigkeit anhand des Lenkradwinkelsignals ist die Steering Wheel Reversal Rate (SWRR), die auf McLean & Hoffmann (1975) zurückgeht. Sie beschreibt die Anzahl der Lenkradumkehrungen innerhalb eines bestimmten Zeitraumes, die eine gewisse Winkeldifferenz (Gap Size) überschreitet. Thiffault & Bergeron (2003) konnten weiterhin zeigen, dass große Lenkbewegungen bei müden Fahrern zunehmen. Wird folglich eine große Gap Size gewählt,



**Bild 4:** SWRR mit Gap Size 5,4° über der KSS – Mittelwert und Standardfehler

ergibt sich für einen müden Fahrer eine höhere Häufigkeit an Lenkradumkehrungen.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Forschungsprojektes AKTIV wird innerhalb des Teilprojektes FSA (Fahrsicherheit und Aufmerksamkeit) das Ziel verfolgt, fahrerseitige Kennwerte zur Detektion von Müdigkeit zu ermitteln. Hierzu wurden Fahrversuche vom Institut für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt zusammen mit der Adam Opel GmbH durchgeführt.

Dazu wurden Versuche mit 46 Probanden auf dem Testgelände der TU Darmstadt mit dem Ziel durchgeführt, bei den Fahrern eine monotoniebedingte Müdigkeit zu erzeugen. Der Parcours bestand aus einem ca. 1,9 km langen Rundkurs, der von den Fahrern im Verlauf der Versuche ca. 70 Mal befahren wurde. Der monotone Charakter der Fahrt wurde durch den Fahrauftrag weiter verstärkt. Danach sollten die Probanden für eine Fahrdauer von 3 Stunden den Parcours mit einer Ge-

schwindigkeit von 50km/h befahren. Unterhaltungen mit dem Versuchsbegeleiter sowie Nebenaufgaben jeglicher Art waren untersagt. Während der Versuchsfahrten wurden fahrerseitige Messgrößen vom CAN-Bus, wie z. B. Lenkradwinkel, Fahrgeschwindigkeit und Pedalbetätigung abgegriffen. Um den Müdigkeitszustand der Fahrer zu dokumentieren, wurden diese in regelmäßigen Abständen gebeten, ihre Müdigkeit anhand der Karolinska Sleepiness Scale (KSS, nach Åkerstedt 1990) zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Zunahme der Müdigkeit über der Fahrdauer.

Ein aus den Daten bereits berechneter Kennwert ist die SWRR. Hierbei stand vor allem die Bestimmung einer geeigneten Gap Size im Vordergrund. Die SWRR wird hier ausschließlich auf geraden Streckenstücken betrachtet. Bild 4 zeigt die Mittelwerte des Kennwertes SWRR über alle Probanden. Ab den KSS-Stufen 4 bis 9 ergibt sich ein monoton steigender Verlauf der Mittelwerte. Auffällig ist der starke Anstieg des Kennwertes bei den KSS-Stufen 8 und 9. Eine Detektion ermüdeten

Fahrer anhand dieses Kennwertes ist folglich möglich.

### 3.3 Elektrophysiologie

Die Wirkungen der Fahraufgabe im untersuchten Kontext auf den Fahrer zeigen sich in seinen individuellen Beanspruchungen. Hohe Beanspruchungen des Fahrers während der Fahrt weisen auf vom Fahrer als kritisch erlebte Situationen hin. In solchen Situationen besteht die Gefahr, dass Fahrer z. B. aufgrund fehlender Erfahrungen mit diesen Situationen nicht angemessen reagieren. Anhand physiologischer Messgrößen können diese Beanspruchungen quantifiziert werden, sie werden in Abhängigkeit der Fragestellung mit unterschiedlichen Zielen eingesetzt. Während bei Komfortuntersuchungen z. B. elektrische Aktivitäten relevanter Muskeln gemessen werden, um Aussagen über diskomfortable Sitzhaltungen zu erhalten, stehen bei Untersuchungen des Fahrerverhaltens (mit und ohne Nutzung von Fahrerassistenzsystemen) die psychischen Beanspruchungen der Fahrer im Vordergrund. Hier wird mit physiologischen Messgrößen überprüft, wie sich die emotionale und möglicherweise auch die mentale Beanspruchung der Fahrer bei Unterstützung durch Fahrerassistenzsysteme verändert. Im Umkehrschluss ist es aber auch möglich, durch physiologische Messungen Situationen zu identifizieren, die zu hohen Beanspruchungen der Fahrer führen und somit Potenzial für die Unterstützung durch neuartige Fahrerassistenzsysteme bieten.

Aus dem Bereich der elektrophysiologischen Messgrößen können Herzschlagfrequenz, Herzschlagarrhythmie, Hautleitwert sowie elektrische Aktivitäten von Muskeln als relevant zur Untersuchung des Fahrerverhaltens während Fahrten im realen Fahrzeug bezeichnet werden.

Zur Analyse der muskulären Beanspruchung bieten sich als peripherphysiologische Kenngrößen die elektrischen Aktivitäten (EA) der zur Stellteilbetätigung an Lenkrad sowie Fahr- und Bremspedal (Fuchs et al. 2008a) oder der zur Aufrechterhaltung der Körperposition benötigten Muskeln an.

Nach der Aktivierungstheorie können aber auch die elektrischen Aktivitäten von nicht in den Arbeitsvollzug eingebundenen Muskelgruppen als Indikatoren der Tonuslage eingesetzt werden, die Aussagen über das Aktivierungsniveau des gesamten Nervennetzes erlauben. Dazu wurden während Fahrversuchen von Breuer (1996) die EA eines Bauchmuskels (m. rectus abdominis), die auf Beanspruchung durch Haltungsarbeit und emotionale Beanspruchungen reagiert, sowie der Stirn (m. epicranii pars frontalis) eingesetzt. Ebenfalls zur Beurteilung vorwiegend emotionaler Beanspruchungskomponenten dienen die Herzschlagfrequenz sowie der Hautleitwert des Fahrers als Indikatoren. Die mit Hilfe des Elektrokardiogramms (EKG) ermittelte Herzschlagfrequenz wird als eine integrierende Messgröße zur Ermittlung der Beanspruchung angesehen, die nicht nur auf die Belastungen des Herz-Kreislaufsystems, sondern auch auf mentale und emotionale Belastungen reagiert. Sie steigt unter informatorischer Belastung signifikant an, falls dieser Effekt nicht durch energetische Komponenten verdeckt wird (Philipp 1979). Unter dem Hautleitwert wird die elektrische Admittanz der menschlichen Haut verstanden. Aus Höhe und Dauer der Reizantwort lassen sich Rückschlüsse auf Zeitpunkt und Intensität einer erlebten Emotion ziehen. Es ist zwischen phasischen und tonischen Anteilen zu unterscheiden. Die phasischen Anteile werden durch die Hautleitfähigkeitsreaktion (Skin Conductance Response = SCR) und der tonische Anteil durch basale Leitfähigkeit (Skin Conductance Level = SCL) repräsentiert (Faber 1980, Boucsein 1988).

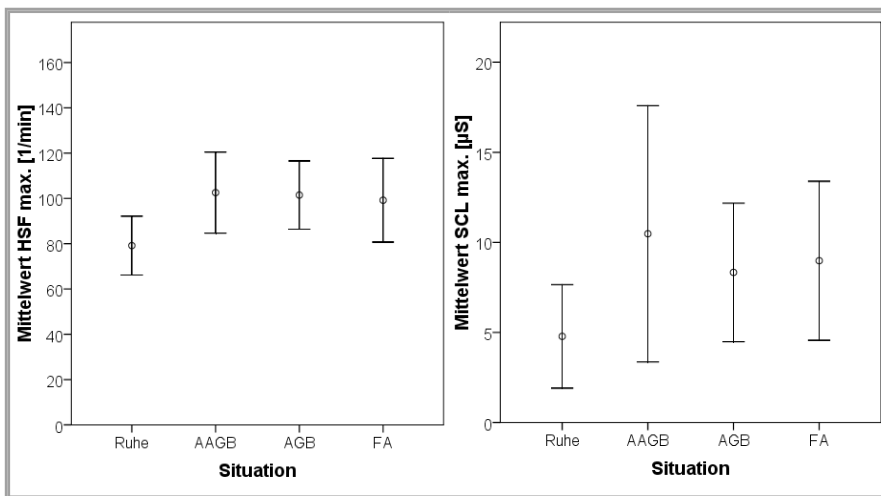
Welche Aussagen durch den Einsatz elektrophysiologischer Messungen während Fahrversuchen gewonnen werden können, wird im Folgenden an einem Beispiel gezeigt.

Wie sich Pkw- und Lkw-Fahrer bei Unterstützung durch ein Fahrerassistenzsystem, dass in kritischen Situationen eine aktive Notbremsung ohne Beteiligung des Fahrers vornimmt, verhalten, wurde vom Institut für Arbeitswissenschaft und dem Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt im Auftrag von sechs Fahrzeugherstellern und Zulieferern (Audi, Bosch, BMW,

MAN, Opel, Siemens) im Rahmen der Forschungsinitiative AKTIV (Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr), die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert wird, untersucht.

Hierzu wurden Fahrversuche mit 90 Probanden auf dem Testgelände der TU Darmstadt durchgeführt. Zur Erzeugung realistischer Notbremsituationen wurde das vom Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt entwickelte „dummy vehicle“ EVITA verwendet (Winner et al. 2009). Bei der Versuchsdurchführung wurden zwei Szenarien realisiert. Szenario 1 untersuchte das Fahrerverhalten bei einer tatsächlichen Gefahrensituation. In Szenario 2 wurde eine Fehlauflösung betrachtet. Beide Szenarien wurden in unterschiedlichen Reihenfolgen mit unterschiedlichen Auslegungsvarianten der AGB untersucht (Fecher et al. 2008, 2009). Mit Hilfe physiologischer Kennwerte wurden Aussagen zur emotionalen Beanspruchung des Fahrers sowie zur muskulären Beanspruchung des rechten Fuß-Bein-Systems während bzw. nach den Bremsituationen getroffen. Ziel war es, Veränderungen der Fahrerbeanspruchung durch den Einsatz von Aktiven Gefahrenbremsungen sowie Beanspruchungsunterschiede bei unterschiedlichen Unterstützungsvarianten zu untersuchen. Außerdem wurden Fahrzeugdaten wie Bremsdruck, Geschwindigkeit und Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug erhoben sowie Videoaufzeichnungen (z. B. Fahrerhandlungen und Umgebung), Blickbewegungsdaten und subjektive Beurteilungen.

Zur Analyse der emotionalen Beanspruchungen der Fahrer werden die Maximalwerte von Herzschlagfrequenz (HSF) und Hautleitwertes (SCL) betrachtet. Der Maximalwert der Herzschlagfrequenz bzw. des Hautleitwertes ist definiert als das Maximum der HSF bzw. des SCL innerhalb des Betrachtungszeitraums von einer Minute ab dem Beginn einer AGB Auflösung. Die Ruheherzschlagfrequenz und der Ruhehautleitwert wurden vor Beginn der Versuchsfahrt im Fahrzeug gemessen. In Bild 5 werden die Mittelwerte und Standardabweichungen der Kennwerte maximale Herzschlagfrequenz und maximaler Hautleitwert



**Bild 5:** Verteilung der Maximalwerte der Herzschlagfrequenzen (HSF) sowie der Hautleitwerte (SCL) der Pkw-Probanden (Mittelwerte und Standardabweichungen), dargestellt sind jeweils Ruhezustand, ausbleibende AGB (AAGB), AGB und Fehlauflösungen (FA) (N = 55)

aller PKW-Fahrer in unterschiedlichen Situationen dargestellt. Betrachtet werden bei den kritischen Bremssituationen (ausbleibende AGB (AAGB) und berechtigte AGB (AGB)) jeweils der erste Versuch eines Probanden, um Gewöhnungseffekte auszuschließen. Die Fehlauflösungen (FA) des Systems erfolgten, nachdem die Fahrer bereits Aktive Gefahrenbremsungen kennengelernt hatten.

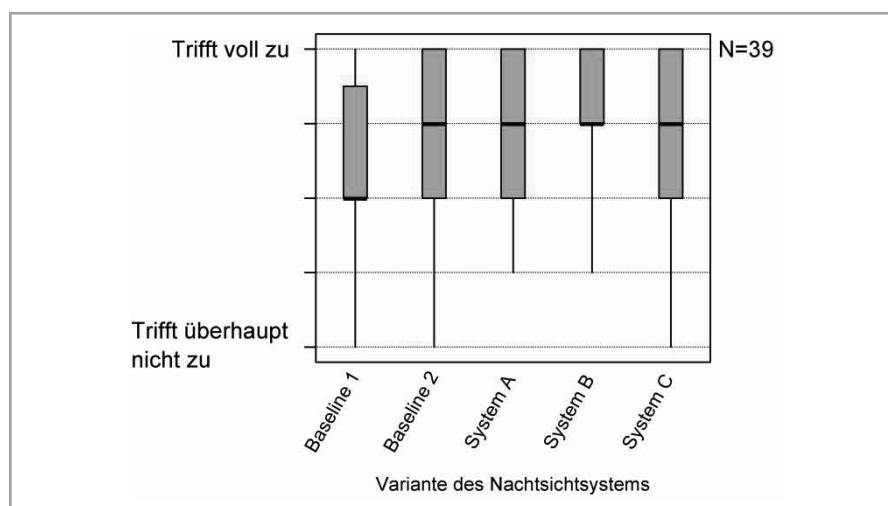
Die Kennwerte maximale Herzschlagfrequenz und maximaler Hautleitwert sind für die PKW-Probanden in kritischen Situationen signifikant höher als die Ruhewerte der Fahrer (bei den LKW-Probanden wurden vergleichbare signifikante Unterschiede zwischen diesen Situationen festgestellt). Dies zeigt, dass die Unterstützung des Fahrers in kritischen Auffahrsituationen durch Aktive Gefahrenbremsungen zwar die Wirksamkeit der Bremsung verbessert (z. B. Fecher et al. 2009), aber keine Auswirkungen auf die emotionale Beanspruchung des Fahrers hat, da die Erhöhung der Beanspruchung primär durch die Gefahrensituation ausgelöst wird. Jedoch führen Fehlauflösungen des Systems in unkritischen Situationen zu vergleichbar hohen Beanspruchungen des Fahrers wie kritische Bremssituationen. Daraus ergibt sich, dass bei der Auslegung

eines solchen Systems darauf zu achten ist, die Fehlauflösungen, die von der überwiegenden Anzahl der Fahrer auch als störend beurteilt wurden, zu minimieren – wohlwissend, dass bei der Systemauslegung ein Zielkonflikt zwischen den Fehlauflösungen aufgrund von fälschlicherweise erkannten potenziellen Konfliktfahrzeugen (false positives) und nicht erkannten Konfliktfahrzeugen (false negatives) besteht.

### 3.4 Subjektivbeurteilungen

Interviews und Fragebögen ermöglichen eine für Subjektivurteile möglichst quantitative Aussage und werden häufig zur Beurteilung der Bewältigung von Primär-, Sekundär und Tertiärtätigkeiten sowie zu deren Wirkung, wie Akzeptanz oder Komfortempfinden eingesetzt. Ebenso werden mit Fragebögen die demographischen Daten der Fahrer zur Klassifizierung objektiver Messwerte erfasst. Anhand der erhobenen Daten können auch objektive Messgrößen klassifiziert und validiert werden. Für viele Fragestellungen existieren schon validierte Tests.

Für an die jeweiligen Untersuchungsziele angepasste Fragestellungen müssen aus den Hypothesen speziell abgeleitete Fragebögen entwickelt werden. Neben Absolut- und Relativbeurteilungen bieten sich hierfür auch Prätest / -Posttest Vergleiche an. Festgelegte Antwortkategorien mit Ratingskalen ermöglichen eine standardisierte, differenzierte und strukturierte Datenerhebung, geben jedoch keinen Freiraum für eigene Anregungen der Probanden. Abhängig vom Untersuchungsziel der Fahrversuche muss festgelegt werden, ob eine Augenscheinvalidität erwünscht ist oder nicht, um gewisse Antworttendenzen zu vermeiden (Kubinger 2006). Es hat sich gezeigt, dass negativ formulierte Items einen Einfluss auf das Antwortverhalten haben (Amelang & Borke-



**Bild 6:** Bewertung der Aussage „das Fahren mit der jeweiligen Systemvariante war komfortabel“

nau 1981). Negative Formulierungen können bewusst eingesetzt werden, um der Akquieszenz entgegenzuwirken. Ein subjektives Beurteilungsverfahren sollte objektiv, reliabel, valide und darüber hinaus auch normierbar, vergleichbar, ökonomisch und natürlich nützlich sein. Die Bewertung ausgewählter Methoden zur Erfassung der individuellen Charakteristik kann nur in Abhängigkeit des Nutzungskontextes geschehen. Und auch die Auswahl der geeigneten subjektiven Methoden kann nur in Abhängigkeit des Untersuchungszieles festgelegt werden. Interviews und Fragebögen liefern einen wichtigen Beitrag zur Bewertung von Fahrzeugen und Fahrerassistenzsystemen und ergänzen objektive Messgrößen bei Fahrversuchen, um eine breite Beurteilung des Systems Mensch-Fahrzeug zu ermöglichen.

Bei den zur Überprüfung unterschiedlicher Gestaltungsvarianten eines Night Vision Systems durchgeführten Versuchen (siehe Kapitel 3.1) wurden auch subjektive Beurteilungen der unterschiedlichen Systeme erhoben.

In Bild 6 wird die Komfortbewertung der Nachtfahrt mit den jeweils eingesetzten Systemvarianten des Nachtsichtsystems mit Fußgängermarkierung den Fahrten mit den Baselines gegenübergestellt. Auffällig ist die signifikant unterschiedliche Bewertung der Systeme hinsichtlich des Komforts. Die Night Vision Varianten mit Fußgängermarkierung wurden signifikant komfortabler bewertet im Vergleich zu den beiden Baselines. Am besten wurde von den Fahrern im Hinblick auf den Komfort System B, ein System mit einer temporären Darstellung, bewertet.

#### 4 Beurteilung der Aussagekraft menschbezogener Messgrößen in Fahrversuchen

Die Aussagekraft von Messgrößen wird maßgeblich dadurch bestimmt, ob sie dazu geeignet sind, das angestrebte Untersuchungsziel zu erreichen, d. h. die am Anfang einer Untersuchung formulierten Hypothesen eindeutig zu

**Tabelle 1:** Summarische Bewertung der Aussagekraft ausgewählter menschbezogener Messgrößen (+: hoch, o: bedingt, -:gering) zur Analyse von Bewältigungen und Wirkungen (bei zwei Bewertungsangaben in einem Feld steht die erste für den Bereich Bewältigung und die zweite für den Bereich der Wirkungen)

BEWÄLTIGUNG/WIRKUNG	Verhalten	FAS	FIS	Bedienelemente & Anzeigen	Sitze	Ermüdung	Lernen
Blickbewegungserfassung	+	o/+	+	+	-	+	+
Physiologische Messverfahren	-	-/+	-	-	o/+	+	o
Befragung	+	+	+	+	+	+	o
Fahrzeugdatenerfassung	+	+	o	o	-	+	o

bewerten. Dies hängt in der Regel nicht alleine von der Messgröße ab, sondern zusätzlich vom Versuchsdesign und der Auswertungsmethodik.

Weitere Kriterien, die auch als Voraussetzung für aussagekräftige Ergebnisse bezeichnet werden können, sind die statistischen Gütekriterien Objektivität, Reliabilität und Validität. Wobei das Kriterium der Objektivität, wie eingangs bereits beschrieben, im Fall von Subjektivbeurteilungen durch die Probanden, wenn es um den Bereich der Wirkungen geht, nicht maßgeblich ist, jedoch für die Beschreibung des Ursachenbereiches höchste Priorität haben muss. Da die erzielten Ergebnisse im Bereich Bewältigung und Wirkungen immer auf die Ursachen bezogen werden müssen, kann es sinnvoll sein, unterschiedliche Belastungsabschnitte zu differenzieren. Die Reliabilität verlangt, dass Messungen unter gleichbleibenden Bedingungen reproduzierbar sein müssen. Dies wird jedoch dadurch eingeschränkt, dass dieselben Bedingungen bei Fahrversuchen selten wiederhergestellt werden können, selbst bei Versuchen im Labor bleibt die Leistungsbereitschaft des Probanden als variierende Größe. Hinter der Validität steht die Forderung, dass durch die Messgröße das Merkmal erfasst wird, über das eine Aussage gewünscht wird. Dies zielt, wie oben bereits beschrieben, darauf ab, dass die Messgröße dazu geeignet sein muss, die einer Untersuchung

mit Fahrversuchen zugrundeliegenden Fragen zu beantworten. Hier muss auch berücksichtigt werden, dass die eingesetzten Messmethoden keine Auswirkungen auf das Verhalten des Probanden haben dürfen. Schlussendlich wird die Aussagekraft der erhobenen Messgrößen aber davon bestimmt, wie gut es gelingt, die erzielten Ergebnisse auf die ursprüngliche Fragestellung zu übertragen und allgemeingültige Aussagen abzuleiten.

Auch die Einsatzmöglichkeiten der Messmethode unter realen Fahrbedingungen tragen zur Aussagekraft und Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse bei. Ebenso wird eine Methode, die im Hinblick auf den Nutzen für die Gestaltung des Systems direkt umsetzbare Ergebnisse liefert, eine höhere Aussagekraft zugeschrieben werden.

Die Aussagekraft der in diesem Beitrag näher beschriebenen Methoden wird anhand der oben aufgeführten Kriterien für unterschiedliche Untersuchungsziele summarisch bewertet (Tabelle 1): Analyse des Fahrerverhaltens (Verhalten), Beurteilung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) und Fahrerinformationssystemen (FIS) hinsichtlich ihrer Funktionalität, Beurteilung und Gestaltung des Fahrzeuginnenraums (Bedienelemente & Anzeigen, Sitze), Analyse und Beurteilung von Ermüdungswirkungen (Ermüdung), Analyse und Beurteilung des Umgangs mit neuen Systemen (Lernen).

Um aussagekräftige Ergebnisse in Fahrversuchen zu ermitteln, ist es notwendig, Messgrößen, die die drei Bereiche Ursachen, Bewältigung und Wirkungen beschreiben, auszuwählen. In Abhängigkeit des Untersuchungszieles sind dabei die unterschiedlichen Erhebungsmethoden mehr oder weniger gut geeignet, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen (siehe Tabelle 1).

## Literatur

- Åkerstedt, T.; Gillberg, M.: Subjective and Objective Sleepiness in the Active Individual. *International Journal of Neuroscience*, 52 (1990), S. 29 – 37
- Amelang, M.; Borkenau, P.: Untersuchungen zur Validität von Kontroll-Skalen für soziale Erwünschtheit und Aquieszenz. *Diagnostica*, 1981
- Bartl, G.: Der potenzielle Unfalllenker steckt in jedem von uns: Unaufmerksamkeit. *Presse-Information: Unfallursachenanalyse 4.5.2006* Wien, 2006
- Bokranz, R.; Landau, K.: Einführung in die Arbeitswissenschaft: Analyse und Gestaltung von Arbeitssystemen. Stuttgart: Ulmer. 1991
- Boucsein, W.: Elektrodermale Aktivität. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer. 1988
- Bubb, H.: Fahrerassistenz primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit? VDI-Bericht Nr. 1768. VDI, Düsseldorf. 2003, S. 257-268
- Breuer, J.: Ergonomische Beurteilung und Gestaltung der Sicherheit des Arbeitssystems Kraftfahrzeugführen. *Fortsch.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 271*. Düsseldorf: VDI. 1996
- Bruder, R.; Abendroth, B.; Landau, K.: Zum Nutzen von Fahrversuchen für die Gestaltung. In: Bruder, R.; Winner, H. (Hg.): *Wie objektiv sind Fahrversuche*. Stuttgart: Ergonomia. 2007, S. 79-96
- EN ISO 15007-1: Straßenfahrzeuge - Messung des Blickverhaltens von Fahrern bei Fahrzeugen mit Fahrerinformations- und -assistenzsystemen Teil 1: Begriffe und Parameter, Berlin: Deutsches Institut für Normung. 2003
- Fairclough, S.H.; Ashby, M.C.; Parkes, A.M.: Invehicle displays, visual workload and usability evaluation. In: A.G. Gale, I.D. Brown, C.M. Haslegrave, H.W. Krusysse & S.P. Taylor (Hg.): *Vision in Vehicles - IV*. Amsterdam: Elsevier. 1993, 245-254
- Faber, S.: Hautleitfähigkeitsuntersuchungen als Methode in der Arbeitswissenschaft. *VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 17 Nr. 9*, Düsseldorf: VDI. 1980
- Färber, B.: Erhöhter Fahrernutzen durch Integration von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen. In: Maurer, M., Stiller, C. (Hg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin: Springer. 2005, 148-151
- Fecher, N.; Hoffmann, J.; Winner, H.; Fuchs, K.; Abendroth, B.; Bruder, R.: Analysis of Driver Behaviour in Autonomous Emergency Hazard Braking Situations. *Fisita World Automotive Congress*. 14.-19. September 2008, Munich. F2008-02-030. 2008
- Fecher, N.; Hoffmann, J.; Winner, H.; Fuchs, K.; Abendroth, B.; Bruder, R.: Aktive Gefahrenbremsungen – wie reagiert das Fahrer-Fahrzeug-System? *ATZ* (2009) 2, 140-146
- Fuchs, K.; Abendroth, B.; Bruder, R.: Aktive Gefahrenbremsungen – Wie reagiert der Fahrer? 24. VDI/VW-Gemeinschaftstagung. Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. 29 und 30. Oktober 2008, Wolfsburg. Düsseldorf: VDI, 2008a, 241-251
- Fuchs, K.; Abendroth, B.; Bruder, R.: Ergonomische Bewertung eines Night Vision Systems mit Fußgängermarkierung im Head-up-Display, 54. Frühjahrskonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. 2008, 09. bis 11. April 2008, München. Dortmund: GfA-Press. 2008b, 121-124
- Fuchs, K.; Abendroth, B.; Bruder, R.: Night Vision - reduced drivers distraction, improved safety and satisfaction, 13th International Conference on Human-Computer Interaction 2009, 19. bis 24. Juli 2009, San Diego, USA. i.V.
- Just, M.A.; Carpenter, P.A.: A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, 87(1980), 329-354
- Kubinger, K.D.: *Psychologische Diagnostik – Theorie und Praxis psychologischen Diagnostizierens*. Göttingen: Hogrefe. 2006
- Luczak, H.: *Arbeitswissenschaft*. 1. Auflage. Berlin usw.: Springer. 1993
- McLeon, J.R.; Hoffmann, E.R.: Steering reversals as a measure of driver performance and steering task difficulty. *Human Factors*, 17 (1975), S. 248 – 256
- Philipp, U.: *Zur Beurteilung der Herzschlagfrequenz bei psychophysisch hoch belastenden Tätigkeiten*. Dissertation am Institut für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt. Darmstadt. 1979
- Rötting, M.: *Parametersystematik der Augen- und Blickbewegungen für arbeitswissenschaftliche Untersuchungen*. Dissertation, Schriftenreihe Rationalisierung und Humanisierung, Bd. 32. Aachen: Shaker. 2001
- Thiffault, P.; Bergeron, J.: Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study. *Accident Analysis and Prevention*, 35 (2003), 381 – 391
- Winner, H.; Fecher, N.; Regh F.; Hoffmann, J.: *Fahrversuche zur Untersuchung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen*. In: Winner, H.; Bruder, R.; (Hg.): *Wie realitätsnah lässt sich Fahrerverhalten messen? Neue Methoden und Werkzeuge*. Stuttgart: Ergonomia, 2009

### Anschrift der Verfasser

**Dr.-Ing. Bettina Abendroth**  
**Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder**  
**Dipl.-Ing. Klaus Fuchs**  
**Dipl.-Ing. Thomas Schramm**  
Institut für Arbeitswissenschaft  
Technische Universität Darmstadt  
Petersenstraße 30  
D-64287 Darmstadt  
E-Mail: [abendroth@iad.tu-darmstadt.de](mailto:abendroth@iad.tu-darmstadt.de)