

## 9. VDI-Tagung

# Der Fahrer im 21. Jahrhundert

Der Mensch im Fokus  
technischer Innovationen



# VDI-Berichte 2311

# VDI-BERICHTE

Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH



# 9. VDI-Tagung

## Der Fahrer im 21. Jahrhundert

### Der Mensch im Fokus technischer Innovationen

Braunschweig, 21. und 22. November 2017



# VDI-Berichte 2311

**Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie

(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuskriptdruck. Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder.

Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092311-6

## Inhalt

	Seite	
Vorwort	1	
<i>S. Hergeth, F. Platten, M. Kümmel</i>	<i>Die Bedeutung der Mensch-Maschine-Interaktion beim automatisierten Fahren</i>	3

## Der Mensch als Fahrer

<i>K. Preuk, C. Schießl</i>	Menschliche Leistungsfähigkeit als Gütekriterium für die Zulassung automatisierter Fahrzeuge: Methode zur Ermittlung der Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit	15
<i>L. Borkowski, F. Tigges, R. Henze, F. Küçükay</i>	Kontrollierbarkeitsgrenzen zur Identifikation potenzieller kritischer Freigabeszenarien von Fahrwerkregelsystemen	25

## Der Mensch als Fahrer

<i>K. Simon, A. C. Bullinger</i>	Was stresst, ärgert und beunruhigt Fahrer? Emotionale Reaktionen auf alltägliche Fahrsituationen bei jüngeren und älteren Fahrem	35
--------------------------------------	--	----

## Posterausstellung

<i>M. Rieger, M. Marutzky, S. Bogdanow</i>	IAV Cloud-Car und kontextbasierte Innenraumbeleuchtung	47
<i>B. Kleinert, M. Marutzky, S. Bogdanow</i>	Worauf es im Alter ankommt – „Blendende“ Sichtbedingungen bei Nacht	53
<i>P. Mörtl, P. Wimmer, M. Rudigier</i>	Praktikable Fahrermodelle mit psychologisch fundierten Prozessannahmen	63

<i>N. Richardson,</i>	Erfassung und Bewertung des Informationsbedarfs von	77
<i>B. Michel,</i>	Lkw-Fahrern während hochautomatisierter Fahrt	
<i>A. Zimmermann,</i>		
<i>F. Diermeyer</i>		

## Die Automatisierung als Fahrer

<i>A. Biedermann,</i>	Bedeutung und Herausforderungen der Fahrerzustands-	91
<i>S. Cieler</i>	erkennung im Kontext des vollautomatisierten Fahrens	
<i>M. Kühn,</i>	Müdigkeit und lange Fahrt dauern im Zusammenhang mit	107
<i>T. Vogelpohl,</i>	Übernahmeaufforderungen beim automatisierten Fahren	
<i>M. Vollrath</i>		

## Die Automatisierung als Fahrer

<i>G. Weller,</i>	Die Angemessenheit der Risikowahrnehmung des	127
<i>J.-C. Lenk,</i>	Fahrers – ein Beitrag zum automatisierten Fahren	
<i>C. Strümpler,</i>		
<i>A. Lüdtke</i>		
<i>T. Heine,</i>	Welche Informationen lassen sich aus antizipatorischen	141
<i>G. Pöhler,</i>	Hautleitfähigkeitsdaten für Mensch-Maschine-	
<i>J. Imbsweiler,</i>	Schnittstellen ableiten? – Eine experimentelle	
<i>B. Deml</i>	Untersuchung situativer Einflussfaktoren	

## Ergonomie & Usability

<i>J. Sandbrink,</i>	3D-Displays – Das ungenutzte Potential? Die	153
<i>J. Rhede,</i>	Wahrnehmung von stereoskopischen Informationen	
<i>M. Vollrath,</i>	im Fahrzeug	
<i>F. Flehmer</i>		
<i>D. Krun,</i>	Gestaltung eines Fahrzeuginterieurs aus ergonomischer	165
<i>G. Schmidt,</i>	Sicht – Gutes Raumgefühl oder verloren im Raum?	
<i>M. Rötting</i>		

## Menschen und Automation

<i>C. Lex,</i>	Objektive Erfassung und subjektive Bewertung	177
<i>M. Schabauer,</i>	menschlicher Trajektorienwahl in einer Naturalistic	
<i>M. Semmer,</i>	Driving Study	
<i>J. Holzinger,</i>		
<i>T. Schlömicher,</i>		
<i>Z. Magosi,</i>		
<i>A. Eichberger,</i>		
<i>I. Koglbauer</i>		
<i>N. Kauffmann,</i>	Entwicklung einer kooperativen Bremsstrategie als	193
<i>E. Raeth,</i>	Reaktion auf Einscherer im dichten Verkehr auf der	
<i>F. Winkler,</i>	Autobahn	
<i>M. Vollrath</i>		

## Der Motorradfahrer als Anforderungsgeber für Fahrerassistenzsysteme

<i>M. Köbe,</i>	Der Motorradfahrer als Anforderungsgeber für	207
<i>H. Liers,</i>	Fahrerassistenzsysteme	
<i>M. Mai,</i>		
<i>G. Prokop,</i>		



## Vorwort

Fahrzeugsysteme werden immer ausgeklügelter und individueller – daher gewinnt die Mensch-Maschine-Interaktion zunehmend an Bedeutung. Die Maschine unterstützt den Menschen zum Teil sogar automatisch und generiert ihre Information zur Steuerung immer intelligenter. Sie liest ihren Arbeitsauftrag vom Verhalten des Menschen ab oder bewegt sich gänzlich autonom. Wie stellt man hierbei sicher, dass Missverständnisse vermieden werden und statt Sicherheit Gefahr durch den Fortschritt entsteht?

Das Auto ist heute kein reines Fortbewegungsmittel mehr, sondern wird zunehmend als Kommunikationszentrale, Kino oder Arbeitsplatz genutzt. Ingenieure und Psychologen aus Automobilindustrie, Forschung und Entwicklung arbeiten daher kontinuierlich an innovativen Möglichkeiten der Fahrerunterstützung und Interaktion.

Gibt es Unterschiede zwischen jungen und älteren Fahrern, wie erkennen die Systeme Überforderung und welche Möglichkeiten eröffnet die Option von Echtzeit-Analysen großer Datenmengen im laufenden Betrieb? Darüber hinaus: Wie schätzt man den Einfluss der Digitalisierung auf die Mensch-Maschine-Interaktion ein? Diesen und vielen anderen Fragen widmet sich die kommende 9. VDI-Tagung „Fahrer im 21. Jahrhundert – Der Mensch im Fokus technischer Innovationen“. Im Mittelpunkt stehen folgende Themen:

- Der Fahrer und seine Eigenschaften – Fahrermodellierung
- Systemauslegung, Mensch-Maschine-Interaktion und Fahrerarbeitsplatz
- Einfluss des Alters
- Effizienz und Akzeptanz von Systemen
- Herausforderungen durch Hochautomatisiertes Fahren
- Trends und Zukunftsthemen der Mensch-Maschine-Interaktion

Ich möchte Sie hiermit einladen, diese und noch viel mehr Themen mit anderen Fach- und Führungskräften aus den Bereichen Forschung und Entwicklung mit den Schwerpunkten HMI, Ergonomie, Fahrerassistenz, Fahrerinformation und Cockpit zu beleuchten. Nutzen Sie unsere Tagung, um sich mit Ihren neuesten Entwicklungen zu präsentieren und sie mit anderen Teilnehmern und Referenten zu diskutieren.

Der Programmausschuss und ich freuen uns auf den Austausch mit Ihnen.

**Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer,**

DLR

Vorsitzender des Programmausschusses



# Die Bedeutung der Mensch-Maschine-Interaktion beim automatisierten Fahren

Dr. rer. nat. **Sebastian Hergeth**, Dr. rer. nat. **Frederik Platten**,  
Dr.-Ing. **Martin Kümmel**, BMW Group, München

## Kurzfassung

Im Zuge der zunehmenden Automatisierung der Fahraufgabe ändert sich die Rolle des Fahrers fundamental. In Abhängigkeit des Automatisierungsgrades der Fahraufgabe ergeben sich dabei spezifische Chancen und Herausforderungen für die Konzeption, Gestaltung und Bewertung der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI), die zusätzlich zu bestehenden Anforderungen berücksichtigt werden müssen. Aus diesem Grund sind sowohl neue Anzeige-Bedienkonzepte (ABK) für das automatisierte Fahren notwendig, die diese jeweiligen Besonderheiten berücksichtigen, als auch neue Evaluations- und Absicherungsmethoden mit denen die Güte der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion adäquat bewertet und gegebenenfalls verbessert werden kann. Der vorliegende Beitrag soll in diesem Zusammenhang einen Überblick über ausgewählte Aspekte der MMI beim automatisierten Fahren geben und so zur weiteren Diskussion anregen.

## Einleitung

Menschliches Fehlverhalten gilt heute weltweit als Hauptursache von Straßenverkehrsunfällen [1]. Eine naheliegende Schlussfolgerung lautet daher, dass die Häufigkeit von Verkehrsunfällen durch eine möglichst vollständige Automatisierung der Fahraufgabe verringert werden könnte [2]. Allerdings kann der Fahrer<sup>1</sup> auch bereits durch eine nur teilweise Automatisierung der Fahrzeugführung unterstützt und so Sicherheit, Komfort und Effizienz im Straßenverkehr verbessert werden – vorausgesetzt, dass gewisse Rahmenbedingungen erfüllt sind. Beispielsweise zitiert der Verband der Automobilindustrie eine Studie, laut derer sich die Häufigkeit kritischer Situationen auf Autobahnen um 32 bis 82 Prozent reduzieren ließe, wenn dort 51 Prozent aller PKW Abstandregeltempomat und Frontalkollisionsschutzsysteme verwenden würden [3]. Gleichzeitig entstehen durch eine zunehmende Automatisierung der Fahrzeugführung jedoch auch neue Herausforderungen [4], die im Folgenden näher beleuchtet werden sollen. Einen zentralen Baustein für den erfolgreichen Einsatz von Automatisierung stellt dabei die Gestaltung der Mensch-Maschine Interaktion dar, der mit zunehmender Automatisierung eine umso entscheidendere Rolle zukommt [5].

<sup>1</sup>Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichwohl für beiderlei Geschlecht.

## 1. Die Rolle des Fahrers angesichts zunehmender Automatisierung

In Abhängigkeit des Automatisierungsgrades der Fahraufgabe ergeben sich dabei spezifische Chancen und Herausforderungen für die Konzeption, Gestaltung und Bewertung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, die zusätzlich zu bestehenden Anforderungen berücksichtigt werden müssen. Die vergleichsweise „einfachsten“ Ausprägungen stellen dabei die beiden Extreme dar: In nicht automatisierten Fahrzeugen fährt der Fahrer, und in „voll automatisierten“ Fahrzeugen fährt das Fahrzeug [6]. Was aber ist die Rolle des Fahrers in einem assistierten, teil- oder hochautomatisierten Fahrzeug, wenn nur gewisse Teile der Fahraufgabe für eine bestimmte Zeit von einem automatisierten System übernommen werden [6]? Diese Zwischenstufen stellen die Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) vor die größten Herausforderungen, weshalb sie für die folgende Betrachtung im Mittelpunkt stehen werden.

Für eine tiefergehende Auseinandersetzung ist jedoch zunächst eine klare Taxonomie beziehungsweise Definition verschiedener Automatisierungsgrade notwendig. Der Taxonomie der *Society of Automotive Engineers* (SAE, [7]) zufolge können insgesamt 6 Automatisierungsstufen mit zunehmendem Grad der Automatisierung der Fahrzeugführung unterschieden werden. Ein aus Sicht der MMI fundamentaler Unterschied besteht dabei vor allem zwischen Systemen der SAE Level 1 bis 2 und solchen der SAE Level 3 bis 5: Während Erstere permanent vom Fahrer überwacht werden müssen, müssen Letztere nicht beaufsichtigt werden und ermöglichen somit prinzipiell eine – vorübergehende – Beschäftigung mit anderen Tätigkeiten als dem Fahren. Insbesondere die beiden Grenzfälle (also SAE Level 2 und 3 Systeme) erfordern hierbei eine genauere Auseinandersetzung.

Diese Unterscheidung ist insbesondere deshalb wichtig, weil sich daraus grundlegend unterschiedliche Anforderungen an die Gestaltung der MMI bzw. an das jeweilige Anzeige-Bedien-Konzept (ABK) ergeben. Nach Donges [8] lässt sich eine Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe ableiten, die sich aus den Ebenen Navigation, Führung und Stabilisierung zusammensetzt [9]. Dem Fahrer steht für die Bewältigung dieser Aufgaben eine begrenzte Menge an mentalen Ressourcen zur Verfügung, die er mehr oder weniger bewusst zwischen den verschiedenen Ebenen verteilen kann [10]. Beim manuellen (d.h. nicht assistierten bzw. automatisierten Fahren) liegt das Hauptaugenmerk bei der Gestaltung der MMI daher typischerweise darauf, die Ressourcen des Fahrers zu schonen und möglichst wenig von der eigentlichen Fahraufgabe abzulenken (siehe z.B. [11]). Werden nun einzelne (SAE Level 1) oder mehrere (SAE Level 2) Ebenen der Fahraufgabe automatisiert, ändert sich neben der Rolle also auch die Beanspruchung des Fahrers, der nun tendenziell eher unter- als überfordert wird (siehe Abbildung 1). Wendet man das Yerkes-Dodson-Law [12] auf die Automatisierung der Fahraufgabe an, lässt sich erklären warum eine (kontrollierte) Beschäftigung mit Nebenaufgaben beim

automatisierten Fahren eine völlig andere Wirkung auf den Fahrer als beim manuelle Fahren haben kann.

## 2. Aktuelle Schwerpunkte in Forschung und Entwicklung

Je nach Automatisierungsgrad der Fahraufgabe ergeben sich damit unterschiedliche Herausforderungen für die MMI, weshalb sich mehrere verschiedene – wenn auch teilweise überlappende – Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte identifizieren lassen.

Die Ausgangsbasis bildet dabei zum einen die jahrzehntelange Forschung zur Gestaltung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion beim manuellen Fahren, deren Fokus die bestmögliche Verringerung beziehungsweise Vermeidung von Fahrerablenkung ist und bleibt. Die weiterhin unverminderte Relevanz dieses Themas zeigt sich beispielsweise an der kontinuierlichen Weiter- und Neuentwicklung entsprechender Richtlinien [14]. Zum anderen besteht bereits aus anderen Anwendungsfeldern ein reichhaltiger Erfahrungsschatz zum Einfluss von Automatisierung auf die MMI. Insbesondere in der Luftfahrt gibt es eine beträchtliche Menge einschlägiger Forschungsergebnisse. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass sich diese Befunde manchmal nicht oder nur teilweise auf den Automobilbereich übertragen lassen: So sind etwa die Reaktionszeiten in der Luftfahrt teils deutlich länger als im Straßenverkehr, ebenso haben Piloten (oder auch Zugführer) meist einen deutlich höheren Ausbildungs- und Trainingsstand als die durchschnittliche Bandbreite der Autofahrer.

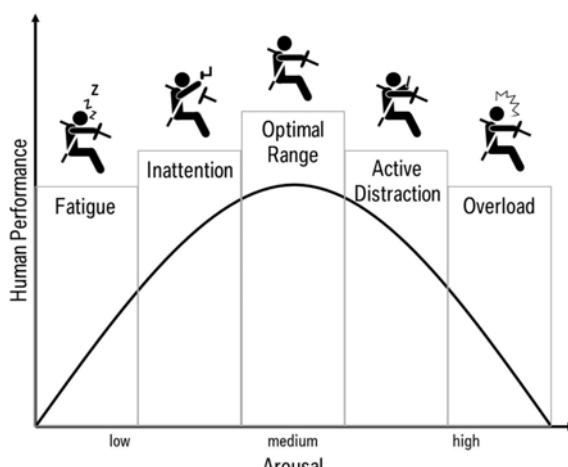


Bild 1: Adaptiertes Yerkes-Dodson-Law (Abbildung in Anlehnung an [13])

Insbesondere für Assistenz- und zunehmend auch für teilautomatisierte Systeme (SAE Level 1 und 2) findet sich darüber hinaus eine stetig wachsende Wissensbasis, die sich spezifisch mit Fragestellungen im Automobilbereich beschäftigt. Dominierende Themen hierbei sind unter anderem angemessenes Vertrauen des Fahrers in automatisierte Systeme, Workload, Situationsbewusstsein während und nach automatisierten Fahrabschnitten, die Bildung und Auswirkungen mentaler Modelle, Aufmerksamkeit, Vigilanz bzw. Daueraufmerksamkeit und Gewöhnungseffekte an Automatisierung [6, 15, 16]. Da dem Fahrer die Führungs- und Stabilisierungsaufgabe hier ganz bzw. teilweise abgenommen und stattdessen durch eine Überwachungsaufgabe ersetzt wird, ergibt sich hier zudem eine paradoxe Situation: So finden sich Hinweise darauf, dass diese Art der Automatisierung den Fahrer ermüden, die Fähigkeit zur Daueraufmerksamkeit verringern und die Reaktionszeit auf Ereignisse verlängern kann [6]. Einige Befunde weisen sogar darauf hin, dass eine kontrollierte Beschäftigung mit Nebenaufgaben die Überwachungs- und Übernahmefähigkeit verbessern kann [17, 18]. Um diesen scheinbaren Widerspruch von bestehenden Anforderungen beim manuellen Fahren (möglichst geringe Fahrerablenkung) und Anforderungen beim automatisierten Fahren (möglichst gute Überwachungs- und Übernahmefähigkeit) aufzulösen werden aktuell verschiedene neue Ansätze untersucht, mit denen sich die Güte der MMI bewerten lässt (z.B. 19, 20).

Bei Verfügbarkeit von SAE Level 3 und 4 Systemen treten schließlich einige frühere Themen der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion gänzlich in den Hintergrund: Beispielsweise wird Fahrerablenkung dann irrelevant, wenn der Fahrer nicht mehr von der Fahraufgabe abgelenkt werden kann – da sie gänzlich von einem automatisierten System ausgeführt wird. Gleichzeitig kommen jedoch andere, teilweise vollkommen neue Fragestellungen zu Tage. Im Rahmen eines Projekts des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur wurde vor diesem Hintergrund ein Bericht erarbeitet, demzufolge sich im Hinblick auf den Forschungsbedarf für das hoch- bzw. vollautomatisierte Fahren 9 Schwerpunktthemen der MMI identifizieren lassen [21]: Fahrerzustände und Übernahmefähigkeit, Übergabe-Interaktion-Interfaces, MMI für die soziale Interaktion mit dem Außenraum, Fahrfremde Tätigkeiten, Gestaltung zum sinnvollen Gebrauch und Vermeidung von Missbrauch, Testmethoden, Lernen und Training, Personenunterschiede, Aufgabeneinflüsse und zuletzt Standards. Der interessierte Leser sei an dieser Stelle auch an [22] und [23] verwiesen, um einen weiterführenden Überblick aus verschiedenen Perspektiven zu den Herausforderungen des hochautomatisierten Fahrens zu erhalten.

### 3. Anforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten zukünftiger Anzeige-Bedien-Konzepte

Die in den vorangehenden Kapiteln vorgestellten Abstufungen und Definitionen erleichtern den Entwicklern die Diskussion und Bewertung von verschiedenen ABKs für die jeweiligen Automatisierungszustände. Einem Fahrer, der sich möglichst sicher, schnell und komfortabel von einem Ort zu einem anderen fortbewegen möchte, sind diese Abstufungen jedoch häufig unbekannt und zum Teil vermutlich auch irrelevant. Wichtig ist daher zunächst einem Fahrer, der Unterstützungssysteme nutzen möchte, deutlich zu machen, welcher Teil der Fahraufgabe vom Fahrzeug übernommen wird und welche in der Verantwortung des Fahrers liegen. Bereits weit verbreitet dafür ist beispielsweise die Anzeige im Kombidisplay sobald ein Abstandsregeltempomat (Adaptive Cruise Control, ACC) die Längsführung des Fahrzeugs übernommen hat. Hierbei wird häufig ein stilisierter Tacho als Symbol angezeigt. Für eine zusätzlich zur Längsführung vom Fahrzeug übernommene Querführung wird ergänzend häufig eine stilisierte Fahrbahnmarkierung und / oder ein Lenkrad im Kombidisplay angezeigt. Auch wenn derartige Symbole nicht völlig selbsterklärend sein sollten, kann der Fahrer anhand des Fahrzeugverhaltens erkennen sobald das System in die Fahrzeugregelung eingreift und beispielsweise die Geschwindigkeit beibehält, auch wenn das Fahrpedal nicht betätigt wird. Das Systemverhalten wird dann durch Versuch und Irrtum erlernt. Der Fahrer ist jedoch jederzeit vollständig verantwortlich und muss das Fahrzeug- und Regelverhalten des Systems dauerhaft und vollständig überwachen. Dabei sind insbesondere Übergänge zwischen verschiedenen Regelungszuständen relevant. Eine falsche Erwartung kann dabei zu kritischen Fahrsituativen führen. Daher ist insbesondere die Erwartungskonformität ein zentrales Bewertungskriterium für die MMI. Erwarten Fahrer beispielsweise, dass ein ACC System regelt, wenn man das System angeschaltet hat, dann eine Zeitlang aktiv schneller gefahren ist und anschließend den Fuß vom Fahrpedal nimmt? Wie ist es, wenn der Fahrer gebremst hat? Was erwartet der Fahrer wenn ein System zur Querführungsunterstützung eine kurze Zeit nicht regeln kann (beispielsweise weil die Kamera die Spurmarkierung nicht erkennt) und dann aber wieder regeln könnte? Aktiviert sich das System automatisch? Eine weitere spannende Frage ist was erwartet wird, wenn ein Fahrer sowohl mit Längs- als auch Querführungsunterstützung fährt und dann bremst; was passiert mit der Querführungsunterstützung? Den jeweiligen Erwartungen muss systemseitig optimal entsprochen werden. Dem Fahrer muss also nicht nur bewusst sein, a) welche Regelungsaufgaben das Fahrzeug übernehmen kann und b) welche Anzeigen ihm mitteilen, welches System aktuell aktiv ist, sondern auch c) wie ein Eingriff in einem Automatisierungszustand diesen verändert. Um ein möglichst hohes Systemverständnis zu ermöglichen muss das MMI möglichst nachvollziehbar gestaltet werden. Dabei spielen sowohl allge-

meine Gestaltungsgrundsätze, als auch Fahrzeug,- Industriespezifische und Markenspezifische Gestaltungsrichtlinien eine zentrale Rolle. Bei Fahrzeugen der BMW Group findet beispielsweise die Bedienung von Fahrerassistenzsystemen an der linken Lenkradspeiche von Multifunktionslenkräder statt. In Abbildung 2 ist die Funktionseinheit eines BMW SAE Level 2 Systems abgebildet. Dabei werden Icons verwendet, die den genannten Gestaltungsrichtlinien entsprechen.



Bild 2: Bedienelement für ein SAE Level 2 System.

Der Automatisierungszustand des hoch automatisierten Fahrens erweitert diese bereits komplexe Anforderungslage noch um den zentralen Faktor der Verantwortung. Wie oben beschrieben übernimmt bei SAE Level 3 Systemen das Fahrzeug dauerhaft die Fahrzeugführung und gewährleistet, dass sich das Fahrzeug sicher durch den Verkehr bewegen kann. Einen Verantwortungsübergang mithilfe eines Icons zu visualisieren und verschiedenen Nutzern eindeutig zu vermitteln stellt eine besondere Herausforderung dar. Diese ist möglicherweise nur mit Einschränkungen zu gewährleisten, insbesondere wenn das Vorwissen, dass es einen Verantwortungsübergang überhaupt gibt, dem Fahrer nicht bewusst ist. Des Weiteren muss der Fahrer während der Level 3 Fahrt übernahmebereit bleiben und darf sich beispielsweise nicht vom Fahrerarbeitsplatz entfernen. Demzufolge muss dem Fahrer vermittelt werden, dass bestimmte fahrfremde Tätigkeiten bei Nutzung eines SAE Level 3 Systems möglich sein könnten (zum Beispiel Nutzung des Onboard-Infotainmentsystems), jedoch andere Tätigkeiten weiterhin nicht möglich sind (zum Beispiel schlafen). Besonderes Augenmerk sollte des Weiteren auf den Transitionen zwischen Level 3 und niedrigeren Automatisierungszuständen liegen.

Auch wenn in Level 2 sowohl die Längs- als auch die Querführung vom Fahrzeug übernommen wird, besteht ein fundamentaler Unterschied bezüglich der Verantwortung und der dauerhaft nötigen Überwachung des Verkehrs zwischen den Automatisierungszuständen. Dabei kann das Fahrzeugregelungsverhalten nicht mehr als ein eindeutiger Indikator des Automatisierungslevel gelten, da in beiden Automatisierungsstufen das System sowohl die Längs- als auch die Querführung regelt. Daher muss dieser Übergang dem Kunden möglichst deutlich und über bestehende ABK-Elemente hinaus angezeigt werden, z.B. in Form eines wie in Abbildung 3 dargestellten beleuchteten Lenkrads. Eine wichtige Erweiterung dabei kann zudem der auditive Kanal sein, der ein multimodales Feedback mithilfe Sprachausgabe und/oder Earcons ermöglicht (s.u.) Die zusätzlichen Herausforderungen durch SAE Level 3 Systeme können also durch unterschiedliche Maßnahmen bewältigt werden. Einen wichtigen Ansatzpunkt stellt dabei auch das Wissen des Fahrers über das System dar, wobei Tutorials eine Möglichkeit darstellen das Systemverständnis des Fahrers zu verbessern. Insbesondere während der Fahrt mit einem Level 3 System besteht die Möglichkeit dem Fahrer durch interaktive Tutorials das System besser verständlich zu machen, da die Fahrerablenkung in diesem Fall nur eine untergeordnete Rolle spielt.



Bild 3: Fahrt in einem prototypischen Versuchsträger mit SAE Level 3 System

Nochmals schwieriger als die Vermittlung eines generellen Systemverständnisses ist es dafür Sorge zu tragen, dass der Fahrer während der Fahrt bereit für eine eventuelle Übernahme der

Fahraufgabe bleibt. Auch einen Beitrag dazu können Tutorials leisten, indem darin die während der hochautomatisierten Fahrt weiterhin bestehenden Anforderungen an den Fahrer beschrieben werden. Des Weiteren könnte jedoch auch eine Überwachung des Fahrerzustands gewährleisten, dass der Fahrer übernahmebereit bleibt. Verschiedene Sensoren sind hier möglich, zentraler Informationslieferant ist entsprechend dem Stand der Technik vorzugsweise eine auf den Fahrer gerichtete Kamera. Deren Notwendigkeit muss dem Fahrer angemessen vermittelt werden und die erhobenen, persönlichen Daten müssen sicher sowie transparent verarbeitet und zweckgebunden genutzt werden.

Die klare Kommunikation ob ein Level 2 oder Level 3 System aktiv ist, sollte also nicht nur mithilfe der herkömmlichen Anzeigeeorte und Kommunikationskanäle geschehen, sondern aufgrund der Wichtigkeit der Unterscheidbarkeit auch weitere Kanäle umfassen. Hierbei spielen multimodale Informationsstrategien eine zentrale Rolle. Dadurch, dass ein Zustandswechsel nicht nur durch eine Modalität (meist visuell) vermittelt wird, sondern durch eine Kombination mehrerer (z.B. zusätzlich akustisch in Form von Ton / Sprache und haptisch) wird die Wahrscheinlichkeit, dass der Fahrer die Information bemerkt, deutlich erhöht. Verschiedene Ausprägungsarten sind dabei denkbar, beispielsweise die Vibration von Sitz und/oder Lenkrad, ein generelles Verfahren des Sitzes, eine Veränderung der Beleuchtung (siehe Abbildung 2) oder sogar eine Veränderung des Fahrverhaltens. Die verschiedenen Möglichkeiten müssen dabei einzeln und in Kombination miteinander bezüglich ihrer Effektivität in Nutzertests bewertet und abgesichert werden.

#### **4. Methodische Herausforderungen für die MMI Entwicklung, Bewertung und Absicherung**

Ebenso wie die Gestaltung der MMI selbst muss bei einer zunehmenden Automatisierung der Fahraufgabe auch die methodische Herangehensweise angepasst werden, mit der ABKs entwickelt, bewertet und abgesichert werden.

Zum einen können viele etablierte Methoden nicht oder nur teilweise auf Fragestellungen im Bereich des automatisierten Fahrens angewendet werden, da sie vor allem im Hinblick auf das nicht-automatisierte Fahren konzipiert wurden. Beispielhaft dafür sind etwa heutige Verfahren zur Quantifizierung von Fahrerablenkung, die als Kriterien (unter anderem) Maße wie die Spur- oder Abstandshaltegüte zu einem Vorderfahrzeug heranziehen (siehe z.B. [11]). Derartige Maße können natürlich nur dann sinnvoll interpretiert werden, wenn die jeweilige Regelungsaufgabe auch vom Fahrer selbst ausgeführt wird – für Untersuchungen der Fahrerablenkung beim automatisierten Fahren sind derartige Verfahren nicht geeignet.

Zum anderen existiert für viele Fragestellungen im Bereich des automatisierten Fahrens bislang noch keine allgemein etablierte bzw. standardisierte Methodik. Ein besonders deutliches Beispiel dafür sind Studien zur Übernahmefähigkeit des Fahrers beim hochautomatisierten Fahren. Diese unterscheiden sich methodisch teilweise so fundamental voneinander, dass eine sinnvolle Integration der Ergebnisse verschiedener Befunde nur mit größter Sorgfalt möglich ist [24].

Darüber hinaus bleiben, je nach Automatisierungsgrad der Fahraufgabe, auch bereits bestehende Anforderungen an die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion weiterhin von Bedeutung. Die Herausforderung besteht in diesen Fällen darin, teilweise widersprüchliche Anforderungen in der Entwicklung zu berücksichtigen und im Rahmen der Bewertung messbar zu machen. Beispielsweise sollte der Fahrer beim teilautomatisierten Fahren gar nicht oder möglichst wenig von der Überwachung der Fahraufgabe abgelenkt werden, um im Bedarfsfall die Fahrzeugführung übernehmen zu können. Aus diesen Gründen müssen für das automatisierte Fahren neue Methoden bzw. Verfahren entwickelt oder bestehende Verfahren angepasst und erweitert werden. Entsprechende Bemühungen lassen sich sowohl für das assistierte bzw. teilautomatisierte Fahren [25, 26] als auch das hochautomatisierte Fahren [27] beobachten. Ein konkretes Praxisbeispiel dafür stellt auch das erstmals 2016 veröffentlichte [28] und 2017 überarbeitete [29] Grundsatzdokument der US-amerikanischen *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) dar.

Die Entwicklung von ABKs für das hoch automatisierte Fahren findet also in einem Umfeld statt, das viele methodische Neuentwicklungen erfordert und alte Gewissheiten in Frage stellt. Des Weiteren beeinflussen technische Neuentwicklungen im Bereich der Sensorentwicklung, der Sensorsdatenfusion und der künstlichen Intelligenz die Rahmenbedingungen der Mensch-Maschine Schnittstelle. Diese verschiedenen, hoch dynamischen Einflussfaktoren verlangen einen Entwicklungsprozess in dem agil und kurzfristig auf Veränderungen im Umfeld reagiert werden kann und Prämissen zeitnah angepasst werden können. Gleichzeitig muss die Nähe zum Endkunden stets gewährleistet werden und dessen Erfahrungshorizont gegebenenfalls an technische Neuerungen herangeführt werden. Um dieser Vielzahl an Anforderungen gerecht zu werden, wird bei der BMW Group ein agiler Entwicklungsansatz verfolgt in dem zum Einen die Anzeige- und Bedienkonzeptentwickler eng mit den technischen Entwicklern der Automatisierungsfunktion, als auch mit den Vertretern der absicherungsrelevanten Stellen zusammenarbeiten um technische und rechtliche Rahmen- und Neuentwicklungen direkt bei Entwicklung der Mensch-Maschine Schnittstelle zu berücksichtigen. Zum anderen werden zusätzlich entwicklungsbegleitende Probandenstudien durchgeführt, in denen potentielle Nutzer mit

den jeweiligen ABKs interagieren. Dabei wird ein möglichst hoher und gleichzeitig dem Entwicklungsstand angemessener Grad an Realismus in Bezug auf das Fahrzeug- und Funktionsverhalten hergestellt. Aufgrund der Verhaltensbeobachtung und den Rückmeldungen aus diesen Studien werden die Konzepte fortlaufend verbessert und optimal an die Kundenanforderungen angepasst. Nur durch einen agilen Entwicklungsprozess kann gewährleistet werden, dass ABKs zukünftig schneller entwickelt und gleichzeitig besser sowohl an wechselnde Kundenanforderungen als auch an wechselnde Rahmenbedingungen angepasst werden können.

### Zusammenfassung

Durch die zunehmende Automatisierung der Fahraufgabe ändern sich die Rolle des Fahrers und damit die Anforderungen an die Gestaltung der MMI fundamental. Daraus ergeben sich sowohl neue Chancen als auch Herausforderungen für die Konzeption, Gestaltung und Bewertung von ABKs für das automatisierte Fahren, die zusätzlich zu bereits bestehenden Anforderungen berücksichtigt werden müssen. Letztere bestehen insbesondere darin die Vorteile von Automatisierung bestmöglich auszunutzen, ohne nachteilige Effekte zu erzeugen. Aus diesem Grund sind innovative ABKs, die die jeweiligen Besonderheiten der MMI bei unterschiedlichen Automatisierungsgraden der Fahraufgabe berücksichtigen, ebenso notwendig wie neue bzw. adaptierte Evaluations- und Absicherungsmethoden mit denen die Güte der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion adäquat bewertet werden kann.

- [1] Peden, M., et al., Eds. 2004. World Report on Road Traffic Injury Prevention. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- [2] Stanton, N. A., & Marsden, P. (1996). From fly-by-wire to drive-by-wire: safety implications of automation in vehicles. *Safety Science*, 24(1), 35-49.
- [3] VDA. (2015). Automation: From Driver Assistance Systems to Automated Driving. VDA MAGAZINE, AUTOMATION.
- [4] Winner, H., Hakuli, S. & Wolf, G. (2009). Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- [5] Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6), 775-779.
- [6] Casner, S. M., Hutchins, E. L., & Norman, D. (2016). The challenges of partially automated driving. *Communications of the ACM*, 59(5), 70-77.
- [7] SAE. (2016). Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems (J3016R) (Bericht). Society of Automotive Engineers.
- [8] Donges, E. (1982). Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *AUTOMOB-IND*, 27(2).

- [9] Donges, E. (2015). Fahrerverhaltensmodelle. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (pp. 17-26). Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [10] Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical issues in ergonomics science*, 3(2), 159-177.
- [11] National Highway Traffic Safety Administration. (2012). Visual-manual NHTSA driver distraction guidelines for in-vehicle electronic devices. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Department of Transportation (DOT).
- [12] Teigen, K. H. (1994). Yerkes-Dodson: A law for all seasons. *Theory & Psychology*, 4(4), 525-547.
- [13] Coughlin, J. F., Reimer, B., & Mehler, B. (2011). Monitoring, managing, and motivating driver safety and well-being. *IEEE Pervasive Computing*, 10(3), 14-21.
- [14] Ranney, T. A., Garrott, W., & Goodman, M. (2001). NHTSA driver distraction research: past, present, and future. In *Proceedings: International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles* (Vol. 2001, pp. 9-p). National Highway Traffic Safety Administration.
- [15] Sullivan, J. M., Flannagan, M. J., Pradhan, A. K., & Bao, S. (2016). Literature Review of Behavioral Adaptations to Advanced Driver Assistance Systems.
- [16] Trimble, T.E., R. Bishop, J.F. Morgan, and M. Blanco. 2014. Human Factors Evaluation of Level 2 and Level 3 Automated Driving Concepts: Past Research, State of Automation Technology, and Emerging System Concepts. (Report No. DOT HS 812 043). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- [17] Miller, D., Sun, A., Johns, M., Ive, H., Sirkin, D., Aich, S., & Ju, W. (2015, September). Distraction becomes engagement in automated driving. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*(Vol. 59, No. 1, pp. 1676-1680). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- [18] Lorenz, L., & Hergeth, S. (2015). Einfluss der Nebenaufgabe auf die Überwachungsleistung beim teilautomatisierten Fahren. *VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.)*, 8, 159-172.
- [19] Shen, S., & Neyens, D. M. (2017). Assessing drivers' response during automated driver support system failures with non-driving tasks. *Journal of safety research*, 61, 149-155.
- [20] Pätzold, A., Schmidt, S., Rauh, N., Cocron, P., Hergeth, S., Keinath, A., & Krems, J.F. (2017). From distraction to controlled engagement: How secondary tasks affect drivers' supervisory and fall-back performance of the driving task while using SAE level 2 driving automation. Poster Session presented at the Europe Chapter Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 2017

- [21] Gasser, T. M., Schmidt, E. A., Bengler, K., Chiellino, U., Diederichs, F., Eckstein, L., & Zeeb, E. (2015). Bericht zum Forschungsbedarf: Runder Tisch Automatisiertes Fahren-AG Forschung.
- [22] Kyriakidis, M., de Winter, J. C., Stanton, N., Bellet, T., van Arem, B., Brookhuis, K., ... & Reed, N. (2017). A human factors perspective on automated driving. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 1-27.
- [23] Radlmayr, J., & Bengler, K. (2015). Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren. *FAT-Schriftenreihe*, 276, 1-57.
- [24] Gold, C., & Huesmann, A. (2017). Beherrschbarkeit hochautomatisierter Fahrzeugführung – Zwischen Übernahmezeit und Zeitbudget. *Haus der Technik*, (144). In book: Methodenentwicklung für Aktive Sicherheit und Automatisiertes Fahren, Publisher: Expert Verlag, Editors: Klaus Kompaß u.a., pp.42-53
- [25] Miller, D., Sun, A., Johns, M., Ive, H., Sirkin, D., Aich, S., & Ju, W. (2015, September). Distraction becomes engagement in automated driving. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 59, No. 1, pp. 1676-1680). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- [26] Shen, S., & Neyens, D. M. (2017). Assessing drivers' response during automated driver support system failures with non-driving tasks. *Journal of safety research*, 61, 149-155.
- [27] Gibson, M., Lee, J., Venkatraman, V., Price, M., Lewis, J., Montgomery, O., ... & Foley, J. (2016). Situation Awareness, Scenarios, and Secondary Tasks: Measuring Driver Performance and Safety Margins in Highly Automated Vehicles. *SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems*, 9(2016-01-0145), 237-242.
- [28] NHTSA. 2016. Federal Automated Vehicles Policy: Accelerating the Next Revolution in Roadway Safety. Washington, DC: US Department of Transportation (US DOT).
- [29] NHTSA. 2017. Automated Driving Systems 2.0: A Vision for Safety. Washington, DC: US Department of Transportation (US DOT).

# Menschliche Leistungsfähigkeit als Gütekriterium für die Zulassung automatisierter Fahrzeuge: Methode zur Ermittlung der Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit

M.Sc. Katharina Preuk, Dr. Caroline Schießl,  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Braunschweig

## Kurzfassung

In dem Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen werden Lücken in den Bereichen Testen und Freigabe von automatisierten Fahrzeugen geschlossen. Dazu soll ein Vorgehen für das Testen hochautomatisierter Fahrfunktionen und damit verbunden Gütekriterien und Methoden entwickelt werden. Ein Gütekriterium, an dem die Leistungsfähigkeit automatisierter Fahrzeuge gemessen werden soll, stellt die Leistungsfähigkeit des Menschen dar. Wie leistungsfähig sind jedoch Menschen beim Fahren? Wo sind die Grenzen der menschlichen Leistungsfähigkeit und wie kann man sie ermitteln? In diesem Beitrag wird neben einer Definition für das Konstrukt der menschlichen Leistungsfähigkeit ein methodisches Vorgehen zur Ermittlung und Analyse vorgestellt.

## 1. Motivation

Wie leistungsfähig müssen hochautomatisierte Fahrzeuge sein? Mit dieser Frage beschäftigt sich das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderte Verbundprojekt PE-GASUS (Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen), das wesentliche Lücken im Bereich des Testens bis hin zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen schließen soll. Ein Gütekriterium, an dem die Leistungsfähigkeit hochautomatisierter Fahrzeuge gemessen werden soll, stellt die Leistungsfähigkeit des Menschen dar [1]. Menschen weisen ein relativ geringes Unfallrisiko auf, obwohl der Verkehr auf deutschen Straßen und damit die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Menschen stetig steigen [2, 3]. Die menschliche Leistungsfähigkeit scheint demnach eine sinnvolle Mindestanforderung dessen darzustellen, wie leistungsfähig hochautomatisierte Fahrzeuge mindestens sein sollten. Darüber hinaus stellt die mit der Leistungsfähigkeit hochautomatisierter Fahrzeuge einhergehende Sicherheit ein entscheidendes Akzeptanzkriterium für potentielle

Kunden dar [4, 5]. Demzufolge soll im Rahmen von PEGASUS die Leistungsfähigkeit des Menschen der Leistungsfähigkeit einer hochautomatisierten Fahrfunktion gegenübergestellt werden, um das Sicherheitsniveau, das die hochautomatisierte Fahrfunktion mindestens aufweisen muss, abzuleiten [6]. Als hochautomatisierte Fahrfunktion wird der sogenannte Autobahn-Chauffeur betrachtet, der den Fahrer auf der Autobahn bei monotonen Fahraufgaben (z.B. Langstreckenfahrten) entlasten soll, in dem die Längs- und Querführung des Fahrzeugs übernommen wird. Der Fahrer muss das System und die umliegende Fahrzeugumgebung nicht mehr dauerhaft überwachen und kann sich von seiner Fahraufgabe abwenden. Fahrfremde Tätigkeiten sind jedoch nur begrenzt möglich, da das System Grenzen aufweist (z.B. Fahrten in Baustellen), wo der Fahrer die Führung des Fahrzeugs wieder übernehmen muss [7].

In diesem Beitrag wird dargestellt, was unter menschlicher Leistungsfähigkeit verstanden wird (Kapitel 2) und wie diese im Anwendungsfall des Autobahn-Chauffeurs methodisch erfasst wird (Kapitel 3). Im besonderen Fokus steht eine Methode zur Erfassung der Grenze menschlicher Leistungsfähigkeit und der Einsatz der Methode im Rahmen einer aktuellen Studie. Abschließend wird dargelegt, welche weiteren konzeptionellen Herausforderungen bei der Ableitung der Leistungsfähigkeit des Menschen für den Vergleich mit der Leistungsfähigkeit der hochautomatisierten Fahrfunktion im Rahmen weiterer Forschung diskutiert werden sollten (Kapitel 4).

## **2. Was ist menschliche Leistungsfähigkeit?**

Die menschliche Leistungsfähigkeit beschreibt, wie gut ein Handlungsziel bewältigt werden kann (z.B. unfallfrei im Verkehr auf einen plötzlichen Einscherer zu reagieren), in dem eine bestimmte Leistung des Menschen im Sinne von körperlichen und geistigen Fähigkeiten und Fertigkeiten eingesetzt werden [8]. Bild 1 stellt das theoretische Modell zur Betrachtung der menschlichen Leistungsfähigkeit in PEGASUS dar, das verschiedene Modelle des menschlichen Fahrverhaltens berücksichtigt.

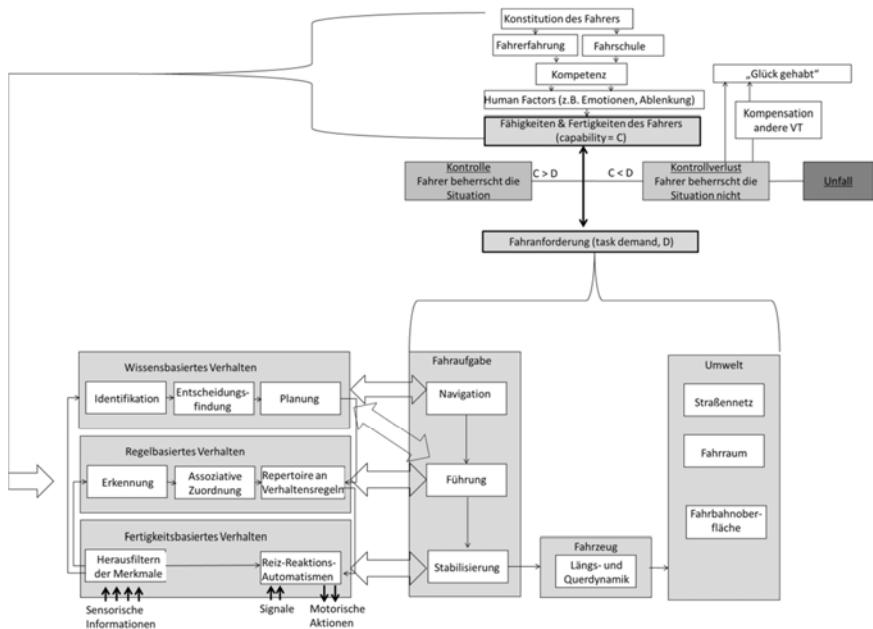


Bild 1: Theoretisches Modell zur Betrachtung der menschlichen Leistungsfähigkeit in PE-GASUS angelehnt an das Task-Capability-Interface Model [9], die Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe [10] und das Drei-Ebenen-Modell der Verhaltensregulation [11].

Eines dieser Modelle ist das *Task-Capability-Interface Model*, das menschliche Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von den Anforderungen der Fahrsituation betrachtet [9]. In dem Modell steht den Fahranforderungen einer Situation (*task demands*, D) das Leistungsvermögen des Menschen (*capabilities*) gegenüber. Das Leistungsvermögen umfasst Fähigkeiten und Fertigkeiten eines Fahrers. Darunter werden prozedurale Verhaltensregeln, aber auch die Fahrerfahrung subsumiert, die die Kompetenz eines Fahrers ausmachen. Die Kompetenz eines Fahrers wiederum kann von *Human Factors* wie z.B. Emotionen, Ablenkung, aber auch Stress und Drogen beeinflusst werden.

Die Fahranforderungen stellen ein Zusammenspiel aus der Umwelt, Verkehrsteilnehmern, der gefahrenen Geschwindigkeit, Trajektorie und dem Fahrzeug dar und spiegeln die eigentliche Fahraufgabe wider. Diese besteht nach dem Modell der Drei-Ebenen-Hierarchie aus

den Teilaufgaben der Navigation, Bahnführung und Stabilisierung [10]. Je nach Teilaufgabe des Fahrens kann das Fahrverhalten nach dem Drei-Ebenen-Modell der Verhaltensregulation fertigkeits-, regel- oder wissensbasiert reguliert werden [11, 12]. So beschreibt die Teilaufgabe der Navigation, dass Fahrer geeignete Fahrtrouten auswählen. Hierbei handelt es sich primär um Fahrverhalten, das wissensbasiert und damit bewusst reguliert wird. In der Teilaufgabe der Bahnführung passt der Fahrer Fahrverhalten an den Straßenverlauf, Verkehr und Straßenverkehrsregeln an. Damit wird das Fahrverhalten sowohl regel- als auch wissensbasiert reguliert. Die Teilaufgabe der Stabilisierung umfasst die Anforderung an den Fahrer, das Fahrzeug innerhalb längs- und querdynamischen Vorgaben zu stabilisieren, indem z.B. gebremst oder gelenkt wird. Das Fahrverhalten in der Stabilisierung wird primär fertigkeitsbasiert reguliert, auch wenn es Fälle gibt, wo es regel- (z.B. bei Fahrten in einem ungewohnten Fahrzeug) oder wissensbasiert (z.B. Fahrten eines Fahranfängers) reguliert sein kann [13]. Die Stabilisierung spiegelt Reiz-Reaktions-Automatismen wider und verläuft binnen kürzester Zeit [14]. Hier setzt der Prozess der menschlichen Informationsverarbeitung an, der ausschlaggebend dafür ist, ob und welches Fahrverhalten der Fahrer zeigt: Signale der Fahrsituation werden detektiert, wahrgenommen, verarbeitet und entsprechend darauf reagiert [15]. In der Stabilisierung verhält sich der Fahrer primär reaktiv, der Einfluss von Kognitionen und der dargestellten Human Factors ist im Vergleich zu den anderen beiden Teilaufgaben verhältnismäßig gering [10].

Die menschliche Leistungsfähigkeit ist demnach das Produkt aus dem Leistungsvermögen eines Fahrers und den Fahranforderungen der Fahraufgabe. Die beobachtbare Größe der menschlichen Leistungsfähigkeit ist das Fahrverhalten. Die menschliche Leistungsfähigkeit könnte prinzipiell für jede Teilaufgabe der Fahraufgabe bestimmt werden. Allerdings weist die Stabilisierung die höchste Priorität auf, da sie direkt Einfluss auf die Kritikalität einer Fahrsituation hat. Da die Sicherheit das entscheidende Kriterium in PEGASUS darstellt, soll die Leistungsfähigkeit des Fahrers im Sinne des fertigkeitsbasierten Fahrverhaltens während der Stabilisierung betrachtet werden.

In dem TCI-Modell wird die menschliche Leistungsfähigkeit in Bezug zur Kritikalität einer Fahrsituation gesetzt. Dabei beschreibt die Kritikalität einer Fahrsituation die räumliche oder zeitliche Nähe zu einem Unfall [16]. Eine Fahrsituation wird dann kritisch, wenn die Fahranforderungen das Leistungsvermögen des Fahrers übersteigen. Dann droht ein Kontrollverlust: Der Fahrer beherrscht die Situation nicht und kann verunfallen, sofern nicht z.B. andere Verkehrsteilnehmer (VT) den Unfall durch ihr Fahrverhalten kompensieren. Dabei scheint das Leistungsvermögen des Fahrers nicht linear mit den Fahranforderungen zusammenzuhangen: Je kritischer Fahrsituationen sind und demnach je höher die Fahranforderungen

ausfallen, desto „besser“ reagieren Fahrer, allerdings nur bis zu einer gewissen Kritikalität, ab der die Fahrer „schlechter“ reagieren [17, 18]. Dies stellt die Grenze menschlicher Leistungsfähigkeit dar, bei der die Fahranforderungen das Leistungsvermögen des Fahrers übersteigen.

### **3. Methoden zur Bestimmung menschlicher Leistungsfähigkeit**

#### **3.1 Naturalistic Driving Studies, Field Operational Tests und Fahrsimulatorstudien**

In PEGASUS werden verschiedene Methoden genutzt, um die menschliche Leistungsfähigkeit von Fahrern zu erfassen. Eine dieser Methoden stellen naturalistischen Fahrstudien (Naturalistic Driving Studies, NDS) und Field Operational Tests (FOT) dar. In diesen Feldstudien fahren Probanden in Fahrzeugen, die mit entsprechender Sensorik zur Fahr- und Videodataaufzeichnung ausgestattet sein können [19]. Somit können Fahrer über einen längeren Zeitraum im Realverkehr beobachtet werden, ohne das Versuchsleiter während der Fahrten anwesend sind, die Einfluss auf das Fahrverhalten der Probanden haben könnten. Die gewonnenen Daten weisen demnach ein hohes Maß an externer Validität (d.h. Generalisierbarkeit) auf [20, 21]. Der Einsatz dieser Methoden erlaubt primär, das alltägliche Fahren abzubilden und umfasst in der Regel nur wenige Fahrsituationen mit hoher Kritikalität, da diese verhältnismäßig selten auftreten [22]. Erste Analysen im Rahmen von PEGASUS fokussierten sich auf die menschliche Leistungsfähigkeit in Situationen, in denen der Egofahrer auf ein plötzlich einscherendes Fahrzeug reagieren musste [23]. Diese Fahrsituation kann potentiell kritisch sein, wenn das einscherende Fahrzeug eine niedrigere Geschwindigkeit als der Egofahrer aufweist. Der Egofahrer muss nun fertigbasiertes Verhalten wie Bremsen zeigen, um das Fahrzeug entsprechend unfallfrei zu stabilisieren. Die Kritikalität der Fahrsituation kann über die *Time-To-Collision* (TTC) bestimmt werden und beschreibt die verbleibende Zeit bis zu einem Unfall bei gleichbleibender Geschwindigkeit und Trajektorie des Einscherrers und Fahrers [24, 25]. Dabei kann die TTC bei Eintritt des einscherenden Fahrzeugs auf die Spur des Egofahrers berechnet werden. Hier zeigen Analysen des Projektpartners BMW im Rahmen von PEGASUS, dass nur Einschersituationen bis zu einer gewissen Kritikalität (TTC 1.7 s) in den Daten zu finden waren und entsprechend nur für diese Situationen die Leistungsfähigkeit der Fahrer beschrieben werden kann [23]. In der Regel geben NDS und FOT-Daten demnach zum einen Aufschluss über Fahrsituationen, die der Fahrer beherrscht, d.h. in denen das Leistungsvermögen des Fahrers die Fahranforderungen der Fahraufgabe übersteigt (Bild 2 links). Zum anderen können sie Fahrsituationen enthalten, die der Fahrer zwar nicht mehr beherrscht, aber nicht zu Unfällen führen, da z.B. andere Verkehrsteilnehmer den Unfall durch ihr Fahrverhalten vermeiden. Die Fahrsituationen, die besonders hohe

Fahranforderungen aufweisen, da sie besonders kritisch sind, finden sich demnach nur selten in NDS/FOT Daten. Es ist somit ungewiss, welche Leistungsfähigkeit Fahrer in eben solchen Fahrsituationen aufweisen ebenso wo sich die Grenze der Leistungsfähigkeit befindet, ab der das Leistungsvermögen des Fahrers nicht mehr den Anforderungen der Fahraufgabe genügt. Um genau diese Fahrsituationen zu untersuchen, wird der Fahrsimulator als Versuchsinfrastruktur eingesetzt (Bild 2 rechts).

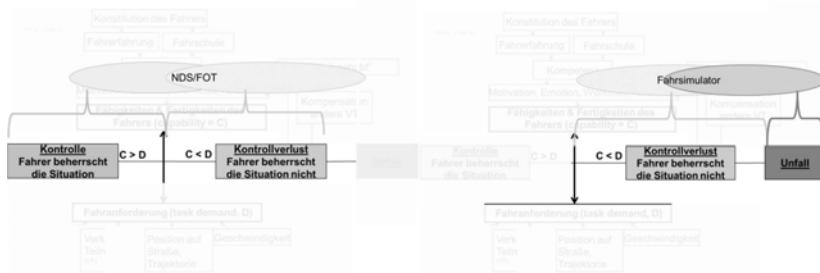


Bild 2: Darstellung der verwendeten Methoden zur Erfassung der menschlichen Leistungsfähigkeit.

Fahrsimulatorstudien ermöglichen es demnach, sich an Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit systematisch heranzutasten, ohne dass die Probanden tatsächlich physisch gefährdet werden. Um die Grenze menschlicher Leistungsfähigkeit im Fahrsimulator zu erfassen, wurde in einer aktuellen Studie eine Methode aus der Psychophysik zur Schwellenbestimmung, die Konstanzmethode, genutzt und adaptiert.

### 3.2 Einsatz der Konstanzmethode zur Bestimmung der Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit

Die Psychophysik betrachtet die Zusammenhänge zwischen physisch beobachtbaren Reizen und dem psychischen Erleben und Reagieren [26]. Eine Methode der Psychophysik beschreibt die Konstanzmethode, die ursprünglich Verwendung findet, um Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit bezüglich des Wahrnehmens und Reagierens auf z.B. akustische Reize zu untersuchen. Die Konstanzmethode beschreibt, wie Probanden wiederholt und zufällig Reize mit unterschiedlicher Reizintensität erleben. Die Probanden antworten anschließend, ob sie den Reiz wahrnahmen (Ja) oder nicht (Nein). Die Grenze der menschlichen Leistungsfähigkeit entspricht der Reizintensität, bei der die Wahrscheinlichkeit der Auswahl einer der beiden Antwortalternativen (Ja oder Nein) zufällig ist, d.h. 50 % beträgt. In der

Fahrsimulatorstudie wurde diese Methode genutzt und adaptiert, in dem Fahrer wiederholt auf einen Reiz, ein plötzlich einscherendes Fahrzeug, mit unterschiedlicher Reizintensität operationalisiert über die Kritikalität, die der Einscherer bei Eintritt in die Spur des Fahrer aufweist, trafen. Jeder Proband erlebt jede mögliche TTC. Das bedeutet, den Probanden wird wiederholt die gleiche Fahrsituation präsentiert, die allerdings in ihrer Kritikalität bzw. TTC zufällig variiert. Die Grenze menschlicher Leistungsfähigkeit kann dabei durch die Wahrscheinlichkeit je Kritikalität/TTC zu verunfallen, bestimmt werden. Demnach liegt der Studie ein Innersubjektdesign zugrunde, was den Vorteil gegenüber eines Zwischensubjektdesigns hat, dass zum einen weniger Probanden benötigt werden, um statische bedeutsame Aussagen treffen zu können. Zum anderen ist anzunehmen, dass die interindividuelle Varianz der Probanden der jeweiligen Gruppen so hoch wäre, dass Effekte nicht valide auf die menschliche Leistungsfähigkeit der Probanden zurückzuführen sein könnten.

Um die Grenze menschlicher Leistungsfähigkeit zu erforschen, muss a priori definiert werden, welche TTCs des Einscherers vermutlich genau diese darstellen, um die entsprechenden Fahrsituationen in der Simulation zu parametrisieren. Dazu ist eine Vorstudie notwendig.

#### 4. Ausblick

Zusammenfassend stellt dieser Beitrag dar, was unter menschlicher Leistungsfähigkeit in PEGASUS verstanden wird und wie sie methodisch erfasst werden kann.

Die menschliche Leistungsfähigkeit stellt das Produkt aus dem Leistungsvermögen eines Fahrers und den Fahransforderungen dar. Die beobachtbare Größe ist das Fahrerverhalten bzw. die Reaktion des Fahrers. Als Methoden zur Erfassung der menschlichen Leistungsfähigkeit dienen NDS, FOT und Fahrsimulatorstudien. Naturalistic Driving Studies und FOT geben in der Regel Aufschluss über Fahrsituationen, die Fahrer noch beherrschen, da meist in den Datenbeständen nur Fahrsituationen bis zu einer gewissen Kritikalität vorkommen. Es ist demnach ungewiss, bis zu welcher Kritikalität die Fahrsituation noch vom Menschen beherrscht werden kann. Um genau diese Fahrsituationen betrachten zu können, können Fahrsimulatorstudien durchgeführt werden, bei denen auf die Konstanzmethode aus der Psychophysik zur Bestimmung der Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit zurückgegriffen werden kann. Dabei erleben Probanden wiederholt die gleiche Fahrsituation, die in ihrer Kritikalität zufällig variiert wird. Der Einsatz der Methode ist verhältnismäßig aufwändig, da a priori mittels einer Vorstudie untersucht werden muss, welche Kritikalität wahrscheinlich die Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit darstellen könnten.

Die Verwendung der menschlichen Leistungsfähigkeit als Gütekriterium weist konzeptionelle Herausforderungen auf, die nicht abschließend geklärt werden konnten. So sollte diskutiert werden, ob die Beschränkung der menschlichen Leistungsfähigkeit auf die Teilaufgabe des Fahrens, der Stabilisierung, den Menschen in seiner Leistungsfähigkeit hinreichend abbildet. So kann der Mensch Fahrverhalten in der Bahnführung zeigen, z.B. die Spur wechseln, um kritische Fahrsituationen zu vermeiden oder bei der Navigation Routen auswählen, die nach seiner Erfahrung weniger kritisch sind. Diese Fähigkeit, Veränderungen im Straßenverkehr und mögliche kritische Situationen vorherzusehen und aktuelles Fahrverhalten entsprechend anzupassen, beschreibt die Antizipationsleistung des Menschen und scheint unabdingbar für sicheres Fahren [27]. Genau hier könnte ein entscheidender Unterschied zu der Leistungsfähigkeit des hochautomatisierten Fahrzeugs liegen, wenn nur die Leistungsfähigkeit des Menschen in kritischen Situationen während der Stabilisierung betrachtet wird. Das Testkonzept zum Vergleich von Mensch und hochautomatisierter Fahrfunktion sollte diesem Umstand Rechnung tragen. So könnte die Häufigkeit des Auftretens kritischer Fahrsituationen für Mensch und hochautomatisierten Fahrzeug gegenübergestellt werden, um so indirekt darauf zu schließen, dass Menschen sich z.B. weniger häufig in bestimmte kritische Situationen begeben, weil sie antizipieren, dass diese kritisch werden könnten. Ein weiterer Ansatz besteht darin, die Leistungsfähigkeit des Menschen in den Teilaufgaben der Navigation und Bahnführung zu betrachten. Hier ist der Einfluss der dargestellten Human Factors, aber auch der Fahrerkompetenz und Antizipationsleistung besonders stark, so dass eine Betrachtung dieser Teilaufgaben eine systematische Erfassung dieser Konstrukte berücksichtigen sollte. Um dies zu tun, muss im ersten Schritt überprüft werden, ob die Leistungsfähigkeit hochautomatisierter Fahrzeuge durch vergleichbare Konstrukte beeinflusst werden könnte. So zeigte ein Vergleich der Unfälle hochautomatisierter Fahrzeuge mit denen des Menschen, dass hochautomatisierte Fahrzeuge wie der Mensch ebenfalls Fehler im Prozess der Informationsverarbeitung aufweist, die zu Unfällen führen [28]. Ob diese Fehler in der Informationsverarbeitung ähnlichen Konstrukten wie jenen des Menschen zugeordnet werden können, sollte überprüft werden.

## 5. Literatur

- [1] Form, T. (2016). Was müssen hochautomatisierte Fahrzeuge im Straßenverkehr leisten (PEGASUS)? *Fachtagung BMWi und BMBF „Automatisiertes und vernetztes Fahren“*. Berlin, Deutschland.
- [2] Statistisches Bundesamt (2013). *Verkehr aktuell - Stand 01.11.2013*. Fachserie 8 Reihe 1.1 -10/2013.

- [3] Statistisches Bundesamt (2010). *Unfallstatistik – Verkehrsmittel im Risikovergleich*.
- [4] Kyriakidis, M., Happee, R., & de Winter, J. C. (2015). Public opinion on automated driving: Results of an international questionnaire among 5000 respondents. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 32, 127-140.
- [5] Schoettle, B., & Sivak, M. (2014). *A survey of public opinion about autonomous and self-driving vehicles in the US, the UK, and Australia*.
- [6] Mazzega, J., Köster, F., Lemmer, K. & Form, T. 2016). Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 10/2016*
- [7] Bartels, A., Karrenberg, S., & Weiser, A. (2011). Hochautomatisches Fahren auf der Autobahn/Highly automated driving on the motorway. *Verkehrsunfall Und Fahrzeugtechnik*, 49(11), 2–6.
- [8] Wenninger, G. (Ed.). (2000). *Lexikon der Psychologie: in fünf Bänden*. Spektrum, Akad. Verlag.
- [9] Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis & Prevention*, 37(3), 461-472.
- [10] Donges, E. (1999). A conceptual framework for active safety in road traffic. *Vehicle System Dynamics*, 32(2-3), 113-128.
- [11] Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (3), 257-266.
- [12] Vollrath, M. und Schießl, C. (2004) Belastung und Beanspruchung im Fahrzeug - Anforderungen an Fahrerassistenz. In: *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme VDI-Berichte*, 1864. VDI Verlag GmbH. ISBN 3-18-091864-0.
- [13] Hale, A. R., Stoop, J. & Hommels, J. (1990). Human error models as predictors of accident scenarios for designers in road transport systems. *Ergonomics*, 33 (10-11), 1377–1387.
- [14] Krems, J. F., & Vollrath, M. (2011). *Verkehrspychologie: Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker*. Kohlhammer Verlag.
- [15] Wickens, C. D. (1992). *Engineering psychology and human performance*. New York, NY, US: HarperCollins Publishers.
- [16] Junietz, P., Schneider, J. & Winner, H. (2017). Metrik zur Bewertung der Kritikalität von Verkehrssituationen und –szenarien. *11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren (FAS 2017)*. Walting im Altmühlthal, Deutschland.
- [17] Chang, M. S., Messer, C. J., & Santiago, A. J. (1985). Timing traffic signal change intervals based on driver behavior. *Transportation Research Record*, 1027, 20-30.

- [18] Green, M. (2000). "How long does it take to stop?" methodological analysis of driver perception-brake times. *Transportation Human Factors*, 2(3), 195–216.
- [19] Eenink, R., Barnard, Y., Baumann, M., Augros, X., & Utesch, F. (2014). UDRIVE: The European naturalistic driving study. In *Proceedings of Transport Research Arena. IFSTTAR*. Paris, France.
- [20] Barnard, Y., Utesch, F., Nes, N. Van, Eenink, R., Baumann, M., & Barnard, Y. (2016). The study design of UDRIVE : the naturalistic driving study across Europe for cars, trucks and scooters. *European Transport Research Review*, 8(2), 1–10.
- [21] Lietz, H., Petzoldt, T., Henning, M., Haupt, J., Wanielik, G., Krems, J. F., ... Noyer, U. (2011). *Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study*. FAT-Schriftenreihe 229, Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT).
- [22] Dingus, T. A., Guo, F., Lee, S., Antin, J. F., Perez, M., Buchanan-King, M., & Hankey, J. (2016). Driver crash risk factors and prevalence evaluation using naturalistic driving data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(10), 2636-2641.BMW MS Bericht
- [23] PEGASUS (2016) . *Bericht zu Meilenstein 1 - Festlegung grundlegende Anforderungen an das Testen*.
- [24] Van Der Horst, 1990. Horst, R. Van Der. (1990). *A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters*.
- [25] Vogel, K., 2002. What characterizes a free vehicle in an urban area? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 5(1), 15–29.
- [26] Fechner, G. T. (1860). Elemente der Psychophysik (2 Vols). Breitkopf and Hartel. Vol. 1 trans, by HE Adler (1966). *Elements of psychophysics*.
- [27] Sommer, K. C. (2013). *Vorausschauendes Fahren-Erfassung, Beschreibung und Bewertung von Anticipationsleistungen im Straßenverkehr*.
- [28] Dotzauer, D., Preuk, K., Schießl, C., Gesslbauer, T. & Patz, D. (2017). *Kooperatives Forschungsvorhaben: Autonome und menschliche (Beinahe-)Unfälle*.

# Kontrollierbarkeitsgrenzen zur Identifikation potenzieller kritischer Freigabeszenarien von Fahrwerkregelsystemen

Dipl.-Ing. (FH) **Lukas Borkowski**, M.Sc., Volkswagen AG, Wolfsburg;  
**Felix Tigges**, M.Sc., Dr.-Ing. **Roman Henze**,  
Prof. Dr.-Ing. **Ferit Küçükay**,  
Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig

## Kurzfassung

Mit der steigenden Entwicklung von Funktionen und Assistenzsystemen ist auch die Erkenntnis gewachsen, dass es heute nicht mehr ausreicht, Funktionen nur rein auf Basis von fahrzeugbezogenen Kennparametern zu bewerten und anhand dieser Gefahrensituationen zu beurteilen. Am Ende jeder entwickelten Funktion muss gewährleistet sein, dass die Funktion in allen Situationen einen sicheren Zustand einstellt bzw. der Kunde in keine kritische Situation gerät. Daher ist es erforderlich, das Reaktionsvermögen eines Fahrers mit einzubinden. Aus sicherheitstechnischer Sicht wird das Reaktionsvermögen auf sogenannte Kontrollierbarkeitsgrenzen bezogen. Bisherige Studien zu dem Thema Beherrschbarkeit bzw. Kontrollierbarkeit basieren auf subjektiven Bewertungen, die lediglich eine Aussage zur Akzeptanz, aber keine eindeutige Aussage zur tatsächlichen Kontrollierbarkeitsgrenze treffen [1, 2]. An dieser Stelle setzt die vorliegende Studie an, die sich mit der Kontrollierbarkeit eines Fahrzeugs nach einer Störaufschaltung über die Bremse beschäftigt. Zum Zwecke der Vergleichbarkeit bezüglich des Stands der Technik beziehen sich die Ergebnisse der Studie auf eine stationäre Kreisfahrt. Wie bereits in vielen anderen Probandenstudien, wird auch in der vorliegenden Studie die Störgierrate als eine der charakteristischen Fahrzeug-Bewegungsgrößen definiert und zur Ermittlung der Beherrschbarkeitsgrenzen herangezogen. Die vorliegende Probandenstudie liefert einen Ansatz für eine mögliche Kontrollierbarkeitsgrenze.

## 1. Einleitung

Heutige Fahrdynamikregelsysteme sollen fahrdynamische Aufgaben erfüllen (Erhöhung der Agilität bzw. Gierdämpfung) und dem Fahrer die Bewältigung der Fahraufgabe erleichtern. Zur Verbesserung der Fahrsicherheit und des Fahrkomforts muss allerdings auch das Risiko einer Fehlfunktion als Kriterium einer Funktionsbewertung herangezogen werden. Vor allem der Einfluss der Bremse auf das querdynamische Verhalten ist groß und muss daher hohen technischen Sicherheitsanforderungen entsprechen. Beim Auftreten eines Systemfehlers muss der

Fahrer in der Lage sein, dass Fahrzeug in einen sicheren Zustand befördern zu können. Wie hoch die Ausprägung eines Fehlers über die Bremse in Form eines plötzlichen Bremsdruckaufbaus sein darf und wie hoch dabei die Beherrschbarkeitsgrenze der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion ist, bildet die zentrale Fragestellung der vorliegenden Studie. Die aus der Studie gewonnenen Erkenntnisse sind Teil eines Forschungsvorhabens zur virtuellen Freigabesystematik als Bewertungsgrundlage potentieller kritischer Freigabeszenarien.

## 2. Closed-Loop-Studien zum Thema Beherrschbarkeitsgrenzen

Eine der bewährtesten Methoden zur Ermittlung von fahrerspezifischen Grenzen sind Probandenstudien. In der Literatur sind einige Probandenstudien in Verbindung mit Störaufschaltungen und Akzeptanzgrenzen zu finden. In der Regel handelt es sich dabei um subjektive Akzeptanzgrenzen für Abweichungen des Fahrzustandes von einem stationären Ausgangsfahrzustand. Dabei können die Abweichungen durch eine Vielzahl von Aktuatoren hervorgerufen werden. Bekannte Aussagen resultieren aus Studien zu subjektiven Akzeptanzgrenzen von Lenksystemstörungen [1]. Für eine absolute Vergleichbarkeit der Bewertungen verschiedener Studien und Versuchsfahrzeuge haben Neukum/Krüger eine klassische Subjektiv-Skala vorgestellt, die einen Rückschluss auf akzeptierte Gefährdungsgrenzen ermöglicht (siehe Bild 2.1).



Bild 2-1: Subjektiv-Skala für akzeptierte Gefährdungsgrenzen, nach Neukum / Krüger [3]

Die vorliegende Störbewertungsskala klassifiziert die subjektiven Beurteilungen in fünf Kategorien. Die Kategorien „Spürbar“, „Unangenehm“ und „Gefährlich“ sind zusätzlich in drei Feinbewertungsschritte aufgeteilt. Die subjektive Beurteilung der Probanden wird unterschiedlichen, objektiven Fahrzeugbewegungsgrößen gegenübergestellt. Neukum/Ufer analysieren in ihrer Studie ESC-Fehleingriffe und liefern einen Beleg dafür, dass die Gierreaktion eines Fahrzeugs als eine zentrale wahrnehmungs- und urteilsrelevante Kenngröße angesehen werden

kann. Diese Analyse wurde von vielen Studien bestätigt und die Fahrzeugbewegungsgröße der maximalen Störgierrate  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  als ein zentrales Sicherheitskriterium herangezogen [2,3,4,7,8,9]. Tabelle 2.1 bietet eine Übersicht der meisten bekannten bzw. veröffentlichten Akzeptanzgrenzen der maximalen Störgierrate  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ .

Tabelle 2-1: Übersicht der subjektiven Bewertung einer akzeptierten Störgierrate [4]

Quelle	Störung	Testmanöver	Akzeptable Störgierrate
Fiat (1975) [5]	Bremse	Kurvenbremsen	$\leq 0,5 \cdot \dot{\psi}_{\text{ref}}$
Schmidt (2006) [6]	Vertikaldynamik	Kurvenfahrt	$>6^{\circ}/\text{s}$ häufig störend, $>8^{\circ}/\text{s}$ gefährlich
Neukum, Frömmig (2010) [7]	Lenkung	Geradeausfahrt	100 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max,1s} = 2,5^{\circ}/\text{s}$
Neukum (2008) [2]	Überlagerungslenkung	Geradeausfahrt	50 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max,1s} = 4,0^{\circ}/\text{s}$ 100 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max,1s} = 3,0^{\circ}/\text{s}$ 150 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max,1s} = 2,5^{\circ}/\text{s}$
Neukum, Ufer (2010) [9]	Bremse	Geradeausfahrt	50 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max,1s} = 4,0^{\circ}/\text{s}$ 100 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max,1s} = 3,0^{\circ}/\text{s}$ 130 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max,1s} = 3,0^{\circ}/\text{s}$
Neukum (2010) [3]	Lenkmomenten-Aufschaltung	Geradeausfahrt	50 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max,1s} = 4,0^{\circ}/\text{s}$ 100 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max,1s} = 3,0^{\circ}/\text{s}$ 150 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max,1s} = 2,5^{\circ}/\text{s}$
Wesp (2011) [10]	Hinterachslenkung	Geradeausfahrt	100 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max,1s} = 12,0^{\circ}/\text{s}$ 150 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max,1s} = 7,8^{\circ}/\text{s}$
Simmermacher (2013) [4]	Hinterachs-Störaufschaltung in Bremsmanövern	Geradeausfahrt / Kurvenfahrt	80 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max,1s} = 7,7^{\circ}/\text{s}$ 120 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max,1s} = 7,9^{\circ}/\text{s}$ 180 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max,1s} = 6,0^{\circ}/\text{s}$ (Fahrssim.)

Ein Vergleich der Akzeptanzgrenzen der Störgierraten  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  zeigt, dass die Ergebnisse nicht einheitlich sind und stark vom Aktuator bzw. von der Art der Störung abhängen. Daher lässt sich kein allgemeingültiges Sicherheitskriterium in Form einer Beherrschbarkeitsgrenze definieren. Dies widerlegt die These von Neukum/Ufer, dass die Höhe der maximalen Störgierrate  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  sich als ein aktuator-unspezifisches Sicherheitskriterium eignet. Des Weiteren muss zwischen „akzeptierter Beherrschbarkeit“ und „Kontrollierbarkeit“ unterschieden werden. Eine akzeptierte Beherrschbarkeit bezieht sich auf die Akzeptanz und subjektive Bewertung des Fahrers, gibt allerdings keine Aussage über die tatsächliche Kontrollierbarkeit wieder. Die Kontrollierbarkeit hingegen bezieht sich auf die reine Leistungsfähigkeit des Fahrers, das Fahrzeug in einem stabilen Zustand zu halten. Die oben aufgeführten Beherrschbarkeitsgrenzen bilden einen Sicherheitsraum allein auf Basis der Kundenakzeptanz. Die vorliegende Studie nutzt den Ansatz die Sicherheitskriterien rein auf Basis der leistungsfähigen Kontrollierbarkeit zu definieren.

### 3. Untersuchungsmethodik der Kontrollierbarkeitsstudie

Bei der Validierung von Fahrwerkregelsystemen im Hinblick auf die Einhaltung von querdynamischen Sicherheitszielen wird neben den sonstigen Validierungen (HiL-Tests, Simulation etc.) ein Fahrmanöverkatalog mit einer funktionsspezifischen Fehleraufschaltung gefahren. Dabei handelt es sich um „Open-Loop“-Fahrmanöver auf Hochreibwert und ebener Fahrbahn. Die Störaufschaltung geschieht über eine spezielle ESC-Schnittstelle, die es ermöglicht ein Gesamt-Störmoment entsprechend dem Vorzeichen entweder an den beiden kurveninneren Rädern (positives Vorzeichen) oder am vorderen, kurvenäußeren Rad (negatives Vorzeichen) vorzugeben. Dies ermöglicht nicht nur, die Ausprägung der Störung variabel zu gestalten, sondern bietet auch die Möglichkeit, die Fahrzeug-Eindrehrichtung zu variieren. Bild 3-1 zeigt die Gierrichtung und die Verteilung für eine Störaufschaltung in einer Linkskurve.

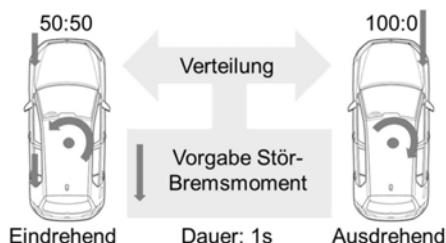


Bild 3-1: Verteilung der Gesamt-Bremsmoments bei einer Linkskurve (links: eindrehend, rechts: ausdrehend)

In Anlehnung an die Validierungsmanöver kommt auch in der vorliegenden Studie das Versuchsmanöver der stationären Kreisfahrt zum Einsatz. Der Geschwindigkeitsbereich wird ebenfalls aus den heutigen Validierungsmessungen übernommen und auf 80 km/h festgelegt. Abweichungen bestehen bei den betrachteten Querbeschleunigungen. Während bei einer Validierungsmessung mit 80 km/h eine Querbeschleunigung von  $a_y = 3 \text{ m/s}^2$  und bei 130 km/h eine Querbeschleunigung von  $a_y = 2 \text{ m/s}^2$  betrachtet wird, liegt der untersuchte Querbeschleunigungsbereich (bei 80 km/h) der vorliegenden Probandenstudie bei  $a_y = 4 \text{ m/s}^2$  bzw.  $a_y = 6 \text{ m/s}^2$ . Dabei wird ebenfalls, analog zur Validierungsmessung, eine stationäre Fahrsituation vor bzw. unmittelbar nach der Fehleraufschaltung eingestellt, um eine eindeutige Vergleichbarkeit der Fahrerreaktion auf eine definierte Störung zu gewährleisten. Aufgrund von dynamischen Lenkbewegungen des Fahrers oder Umgebungseinflüssen (Fahrbahnunebenheit etc.) entstandene Abweichungen können die Auswertung der Messungen verfälschen und enthalten daher eine Toleranz. Das Versuchsdesign der Probandenstudie stellt eine stationäre Kreis-/ Kurvenfahrt dar, die für zwei unterschiedliche Radien (123,5m für

$a_y = 4 \text{ m/s}^2$  und  $82,3\text{m}$  für  $a_y = 6 \text{ m/s}^2$ ) mit  $80 \text{ km/h}$  durchfahren werden soll. Die beiden Radien der Kreisfahrten sind mit Pylonen abgesteckt. Die Fahrbahnbreite setzt sich aus der Fahrzeugbreite und dem von der Funktionssicherheit definierten Sicherheitskriterium von  $50\text{cm}$  Spurabweichung zusammen:

$$y_S = y_{Fzg} + 2 \cdot 0,5\text{m}$$

Das Sicherheitskriterium beruht auf der Annahme, dass die Mindestfahrbahnbreite  $2,75\text{m}$  (RQ 7,5) beträgt, ein Kompaktfahrzeug eine Breite von  $1,75 \text{ m}$  aufweist und das Abweichen von der eigenen Spur in den Gegenverkehr als kritischster Zustand angesehen wird. Damit beträgt die Sicherheitszone an beiden Fahrzeugseiten  $50\text{cm}$ . Das Sicherheitskriterium der Funktions-sicherheit wird auch als Bewertungsgrundlage für die Fahrzeug-Kontrollierbarkeit der Proban-den verwendet. Jedem Probanden werden unterschiedliche Ausprägungen der Störungen über die Bremse aufgegeben. Damit lassen sich unterschiedliche Kontrollierbarkeitsanforde- rungen testen und mithilfe des Sicherheitskriteriums bewerten. Im Folgenden wird auf die Iden-tifikation der unterschiedlichen Störungen eingegangen.

### 3.1 Identifikation der Störeingriffe

Wird in einer virtuellen Freigabe das Sicherheitskriterium von  $50\text{cm}$  Spurabweichung nach ei- ner Störaufschaltung überschritten, geben die Kontrollierbarkeitsgrenzen unter anderem Auf- schluss darüber, ob die induzierten Störungen in ihrer Ausprägung vom Fahrer (Kunden) kon- trollierbar sind und ob eine Freigabe erteilt werden kann. Vor diesem Hintergrund beruht der Ansatz zur Identifikation der angemessenen Störaufschaltung auf der Bedingung, dass die niedrigste Störung eine Mindestspurabweichung von  $>50\text{cm}$  aufweist. Die Aufnahme der Stör- eingriffe erfolgt über eine spezielle Messtechnik (Dewetron/GeneSys, Dewesoft, DGPS), wie sie auch in bei realen Validierungsmessungen verwendet wird. Mit dem DGPS wird nicht nur der Spurverlauf gemessen, sondern auch der Spurversatz aufgrund der eingeleiteten Störung berechnet. Ebenso lehnt sich die Auswertung der Messungen an den Auswertungsprozess der Validierungsmessungen an. Dies stellt sicher, dass die Ergebnisse auf derselben Mess- und Auswertegrundlage beruhen und damit eine gegenseitige Vergleichbarkeit möglich ist. Zur Ermittlung der leistungsorientierten Kontrollierbarkeitsgrenze sind die vier ermittelten Störauf- schaltungen in unterschiedlichen Ausprägungen definiert. Die Störaufschaltungen sind in  $300\text{Nm}$ -Schritte unterteilt, ausgehend von der Mindeststörung. Tabelle 3-1 und 3-2 geben ei- nen Überblick der ermittelten und definierten Bremsmoment-Störungen.

Tabelle 3-1: Gesamt-Bremsmoment und Störgierrate bei  $v = 80\text{km/h}$ ,  $a_y = 4\text{m/s}^2$ 

Störung	Gesamt-Bremsmoment [Nm]	Spurabweichung  [m]	Störgierrate [ $^{\circ}/\text{s}$ ]
1: Eindrehend	600	0,53	3,8
2: Ausdrehend	600	0,3	-1,7
3: Eindrehend	900	0,8	6,2
4: Ausdrehend	900	0,4	-3
5: Eindrehend	1200	0,9	7,5
6: Ausdrehend	1200	0,52	-4,2
7: Eindrehend	1500	1	8,6
8: Ausdrehend	1500	0,68	-6

Ein Vergleich der Störungen zwischen einem eindrehenden und einem ausdrehenden Moment verdeutlicht, dass das ausdrehende Moment wesentlich schwächer ausgeprägt ist und erst bei einem Bremsmoment von 1200Nm am kurvenäußeren Rad das Sicherheitskriterium verletzt wird. Die ausdrehenden Störungen unterhalb von 1200Nm würden selbst ohne Fahrerreaktion das Sicherheitskriterium nicht überschreiten und können aus diesem Grund als unkritisch für den Fahrer betrachtet werden. Dies lässt darauf schließen, dass die Probanden mit den unkritischen Störungen die geringsten Schwierigkeiten haben sollten, das Fahrzeug innerhalb des Sicherheitskriteriums von 50cm Spurabweichung zu halten.

Tabelle 3-2: Gesamt-Bremsmoment und Störgierrate bei  $v = 80\text{km/h}$ ,  $a_y = 6\text{m/s}^2$ 

Störung	Gesamt-Bremsmoment [Nm]	Spurabweichung  [m]	Störgierrate [ $^{\circ}/\text{s}$ ]
1: Eindrehend	400	0,54	4
2: Ausdrehend	400	0,15	-1,4
3: Eindrehend	700	0,88	7,5
4: Ausdrehend	700	0,32	-2,9
5: Eindrehend	1000	1,1	10,1
6: Ausdrehend	1000	0,4	-3,7
7: Eindrehend	1300	1,2	11
8: Ausdrehend	1300	0,5	-4,8

Bei einer Querbeschleunigung von  $6 \text{ m/s}^2$  verstärkt sich die Tendenz, dass eine ausdrehende Störung wesentlich unkritischer auf die Fahrzeugdrehbewegung wirkt. Erst bei einer maximalen, ausdrehenden Störung wird das Sicherheitskriterium erreicht. Dies lässt die Hypothese zu, dass die Probanden bei höherer Querbeschleunigung mit der Kontrollierbarkeit von ausdrehenden Störungen die geringsten Schwierigkeiten haben werden.

### 3.2 Testabfolge der Störeingriffe

Die Testabfolge der Störaufschaltungen folgt einer fest definierten Reihenfolge. Die Reihenfolge umfasst eine möglichst große Änderung der getesteten Störung und variiert in ihrer Eindrehrichtung abwechselnd zwischen ein- und ausdrehendem Moment. Bild 3-2 veranschaulicht die Verteilung der getesteten Störungen.

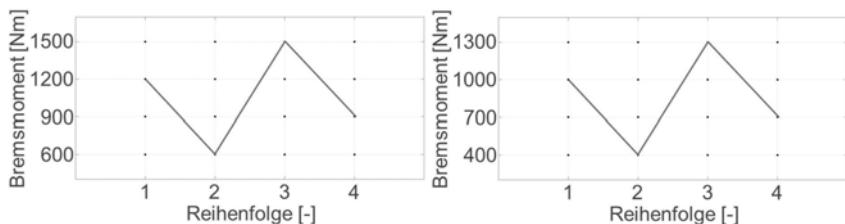


Bild 3.2-1: Störungsnetz (links,  $a_y = 4 \text{ m/s}^2$ ; rechts,  $a_y = 6 \text{ m/s}^2$ )

Mit der vorliegenden Testreihenfolge erfährt der Proband einen möglichst großen Unterschied der Störausprägung. Dabei besitzt die erste Störung die höchste Bedeutung, da mit der ersten Reaktion ein Überraschungseffekt eintritt und damit eine Kontrollierbarkeit auf eine überraschende Störung getestet wird. Trotz der Variation der Störausprägung und der Eindrehrichtung sind Lerneffekte mit steigender Anzahl der getesteten Störungen nicht auszuschließen.

### 3.3 Stichprobe und Versuchsbedingungen

An der vorliegenden Probandenstudie nahmen  $n = 20$  Fahrer teil, die aufgrund ihrer Fahrerfahrung (1-10 Jahre) als Fahranfänger bzw. normal geübte Fahrer gelten können. Für die Versuche stand ein Golf 2.0TDI 4Motion sowie eine kleine Fahrdynamikfläche in Ehra zur Verfügung. Die beiden mit Pylonen abgesteckten Halbkreise verfügten über eine ausreichende Anfahr- bzw. Ausfahrtfläche. Vor jeder Messung standen dem Probanden unbegrenzte Einfahrtrunden zur Verfügung. Jeder Proband hat sich mit steigender Geschwindigkeit und Rundenzahl an die Vorgabe der 80km/h und einem konstanten Lenkradwinkel herangetastet. Erst nach wiederholter und korrekter Erfüllung der Fahraufgabe wurde mit der Störaufschaltung und der Messung begonnen. Fahrzeugbewegungsgrößen wurden durch CAN-Daten und eine Kreiselplattform aufgenommen.

#### 4. Versuchsergebnisse der Probandenstudie

Bei der Auswertung des gemessenen Spurversatzes in Abhängigkeit von der Störungsintensität sowie der Störungsrichtung für zwei unterschiedliche Querbeschleunigungen ( $a_y = 4 \text{ m/s}^2$  bzw.  $a_y = 6 \text{ m/s}^2$ ) wird in erster Linie analysiert, wie viele Probanden die Störung über die Bremse innerhalb des Sicherheitskriteriums von 50cm Spurabweichung halten konnten. Der relevante Auswertebereich bezieht sich dabei auf die erste Sekunde nach der Störaufschaltung. Bild 4-1 fasst die Ergebnisse der Spurabweichung für die unterschiedlichen Störungen zusammen.

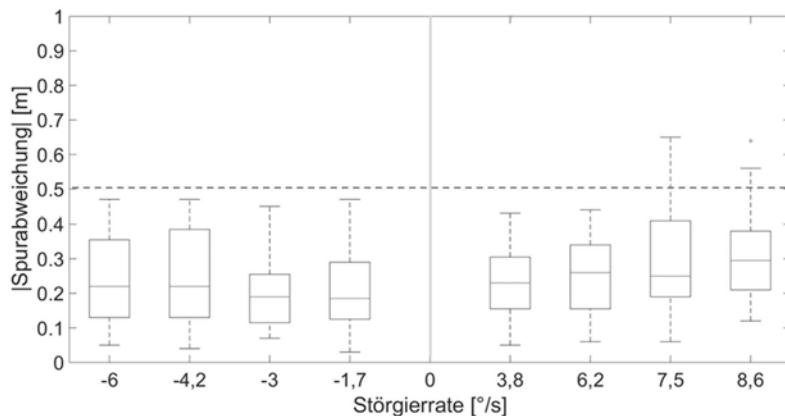


Bild 4-1: Spurabweichung nach aufgebrachter Störung bei  $a_y = 4 \text{ m/s}^2$

Auf der rechten Seite befinden sich die Boxplots der eindrehenden und auf der linken Seite jene der ausdrehenden Störungen. Alle Probanden konnten kurveneindrehende Störungen unterhalb einer Störgierrate von 7,5°/s kontrollieren und damit das Fahrzeug unterhalb einer Spurabweichung von 0,5m halten. Erst ab Störungen oberhalb 7,5°/s hatten die ersten Probanden Schwierigkeiten, das Fahrzeug innerhalb des Sicherheitskriteriums zu halten. Aufgrund dessen, dass die Störung von 1200Nm (Störgierrate von 7,5°/s) die erste getestete Störung war, sind Einflussgrößen wie Lerneffekte oder ähnliches auszuschließen. Die erkennbar höhere Streuung lässt sich unter anderem auf den Überraschungseffekt und die unterschiedliche Erstreaktion zurückführen. Bei allen anderen Störausprägungen sind Lerneffekte etc. nicht ganz auszuschließen.

Eine Auswertung der ausdrehenden Störungen liefert lediglich die Erkenntnis, dass sich ausdrehende Störungen wesentlich unkritischer Verhalten und eine mögliche Kontrollierbarkeitsgrenze weit über  $-6^{\circ}/s$  befinden.

Zum Vergleich fasst Bild 4-2 die Ergebnisse der Spurabweichung für eine Querbeschleunigung von  $a_y = 6 \text{ m/s}^2$  zusammen.

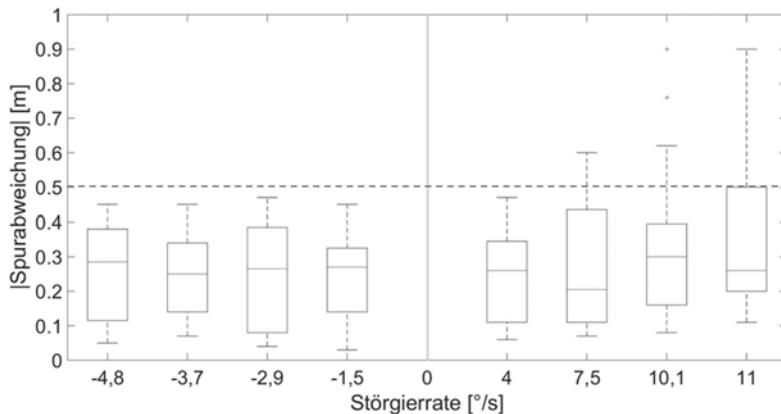


Bild 4-2: Spurabweichung nach aufgebrachter Störung bei  $a_y = 6 \text{ m/s}^2$

Erwartungsgemäß haben die Probanden bei höherer Querbeschleunigung und näherungsweise derselben Störung (wie bei  $a_y = 4 \text{ m/s}^2$ ) größere Schwierigkeiten das Fahrzeug innerhalb des Sicherheitskriteriums zu halten. Bereits bei einem Bremsmoment von 350Nm über das kurveninnere Vorder- und Hinterrad (Gesamt-Bremsmoment 700Nm) entsteht eine Störung (Störgierrate  $7,5^{\circ}/s$ ), die für einige Probanden die Kontrollierbarkeitsgrenze übersteigt. Wie schon bei der Querbeschleunigung  $a_y = 4 \text{ m/s}^2$ , stellen die ausdrehenden Störungen keine große Hürde für die Probanden dar, sodass die Kontrollierbarkeitsgrenze für ausdrehende Störungen weit über der maximal getesteten Störung von  $-4,8^{\circ}/s$  liegt. Zusammengenfasst liefert die vorliegende Probandenstudie einen ersten Anhaltspunkt, dass für einen Normalfahrer eine über die Bremse ausgelöste Störung mit einer Gierratenänderung zwischen  $6,2^{\circ}/s$  und  $7,5^{\circ}/s$  die Kontrollierbarkeitsgrenze darstellt. Für einen genaueren Wert müsste die Kontrollierbarkeit auf eine Gierratenänderung zwischen  $6,2^{\circ}/s$  und  $7,5^{\circ}/s$  in einer erweiterten Probandenstudie genauer untersucht werden.

## 5. Literaturverzeichnis

- [1] Neukum, A., Krüger, H.-P.(2003): Fahrerreaktion bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethoden und Bewertungskriterien. VDI-Berichte, 1791, S.297-318
- [2] Neukum, A., Ufer, E., Paulig, J. & Krüger, H.-P. (2008): Controllability of superposition steering system failures, steering.tech, München, Garching 31.03.-01.04.2008
- [3] Neukum, A. (2010): Controllability of erroneous steering torque interventions: Driver reactions and influencing factors, chassis.tech plus, München
- [4] Simmermacher, D., Winner, H. (2013): Objektive Beherrschbarkeit von Gierstörungen in Bremsmanövern, Dissertation, TU Darmstadt
- [5] Fiat (1975): Proposal for Straight-Line and In-A-Turn Braking Test Procedures, ISO/TC 22/SC 9: Vehicle dynamics an road-holding ability, documents 84 and 85
- [6] Schmidt, G., Scholz, S., Neukum, A., Krüger, H.-P. (IZVW), Passek, J., Schrühlkamp, T., Wallentowitz, H. (Ika) (2006): Fahrer-Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, FAT-Schriftenreihe 208, VDA, S.52-102
- [7] Neukum, A., Krüger, H.-P., Frömmig, L., Henze, R., Küçükay, F. (2010): Wirkung diskreter Zusatzlenkmomente: Subjektive Bewertung und Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, Fachtagung "Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen", 4 – Haus der Technik Fachbuch, 2010
- [8] Schmidt, G., Scholz, S., Neukum, A., Krüger, H.-P. (IZVW), Passek, J., Schrühlkamp, T., Wallentowitz, H. (Ika) (2006): Fahrer-Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, FAT-Schriftenreihe 208, VDA, S.52-102
- [9] Neukum, A., Ufer, E., Schwab, M. (2010): Kontrollierbarkeit potentzieller Fehleingriffe des Elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP), 7. Tag des Fahrwerks, Aachen
- [10] Wesp, A. (2011): Analyse fahrerwirksamer Systemauslegungen und –störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung bei gleichzeitiger Fahrerbeanspruchung durch eine Fahraufgabe, Dissertation, VDI Fortschritt-Berichte Nr. 741, Düsseldorf

## Was stressst, ärgert und beunruhigt Fahrer?

### Emotionale Reaktionen auf alltägliche Fahrsituationen bei jüngeren und älteren Fahrern

Dipl.-Psych. **Katharina Simon**, Prof. Dr. **Aneglika C. Bullinger**,  
Technische Universität Chemnitz, Chemnitz

#### Kurzfassung

Für die nutzerzentrierte Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen ist das Einbeziehen von Kundenwünschen und -bedürfnissen von Beginn an essenziell. Erkenntnisse aus vorangegangenen Studien über Situationen, die von Fahrern als beanspruchend oder unangenehm empfunden werden, müssen jedoch kritisch betrachtet werden, da die Einschätzung der Probanden retrospektiv erhoben wurde und damit Verfälschungen unterliegt. In der vorliegenden Studie wurde das Erfassen und Bewerten von Verkehrssituationen so situationsnah wie möglich realisiert. Dazu fuhren 40 jüngere und 40 ältere Probanden, je 20 Männer und Frauen, im Stil einer Naturalistic Driving Study für je 10 Tage ihre üblichen Wege. Über eine Smartphone-Applikation zeichneten sie dabei kurze, situationsbezogene Sprachprotokolle während der Fahrt zu allen für sie bemerkenswerten Ereignissen auf. Insgesamt nahmen die Fahrer 1074 für die Auswertung relevante Sprachprotokolle auf, wobei insgesamt 301 verschiedene Auslöser für die Aufnahme unterschieden werden konnten. „Gestresst“ reagierten Fahrer eher auf Auslöser in der Umwelt (z.B. geringe Straßenbreite), „beunruhigt“ zeigten sie sich vor allem in der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern (z.B. bei unklarem Verhalten anderer). Die mit Abstand häufigste berichtete Reaktion war jedoch „genervt“, die vor allem bei einer „roten Welle“ und einem langsamem Vorausfahrer genannt wurde.

#### 1. Hintergrund

Ansätze für neue Fahrerassistenzsysteme kommen oft aus der Unfallforschung [1] oder entstammen der Entwicklung innovativer Technologien [2] und sind damit meist wenig nutzerorientiert. Die frühe Einbindung der späteren Kunden in den Entwicklungsprozess, schon bei der Generierung von Produktideen, ist jedoch für eine spätere Akzeptanz der Systeme von hoher Bedeutung [3]. Erst wenn Kundenwünsche, -anforderungen und -bedürfnisse richtig erkannt und entsprechend berücksichtigt werden, werden die Kunden den Nutzen des Systems erkennen und es kaufen [4]. Die Erfassung der Kundenwünsche und -bedürfnisse ist jedoch nicht einfach, da diese häufig implizit und unbewusst sind [4] [5] und Nutzer sie demzufolge nicht

äußern (können). Daher ist es sinnvoll, zunächst zu erfassen, welche Situationen für Fahrer besonders beanspruchend sind oder Emotionen wie Ärger oder Angst hervorrufen, um daraus später die Bedürfnisse abzuleiten.

Bisherige Studien zu dieser Forschungsfrage wurden mit verschiedenen methodischen Ansätzen durchgeführt, wobei vornehmlich Befragungen und Tagebuchstudien genutzt wurden. Ellinghaus und Steinbrecher [6] ließen Fahrer aus einer Liste mit 16 Situationsbeschreibungen die für sie ärgerlichsten auswählen. Am häufigsten wurde ein Drängler (49 %) genannt, gefolgt von „Wenn Lastwagen plötzlich aus ihrer Spur nach links ausscheren“ (38 %). Eine Online-Befragung [7] erobt, welche Situationen Fahrer als „stressig“ bewerten. Fast 50 % gaben plötzliche Bremsmanöver an, 42 % das Durchfahren enger Autobahnbaustellen und 41 % langsamem Stop-and-Go-Verkehr. Parkplatzsuche und Ausweichmanöver wurden von je über 35 % der Befragten genannt. In einer Tagebuchstudie [8] protokollierten Fahrer über zwei Wochen alle Situationen in einem Fahrtagebuch, die Ärger auslösten. Dies war vor allem bei Stau und stockendem Verkehr der Fall. Der ADAC [9] befragte online seine Mitglieder, welche Situationen sie im Straßenverkehr „nerven“. Die freien Antworten betrafen meist „Drängler auf der Autobahn“ sowie (im Wortlaut der Befragten) „Dauerlinksfahrer“, „Blinkmuffel“, „Sonntagsfahrer“, „nicht bedarfsgerecht geschaltete Ampeln“, und „Radfahrer, die sich nicht an Regeln halten“. Eine eigene Untersuchung [10], in der 322 Kommentare in Onlineforen systematisch auf die Beschreibung beanspruchender und Ärger auslösender Situationen analysiert wurden, ergab am häufigsten „Drängelei von Autofahrern“, „kein Blinken“, „dauerhafte Linksspurfahrer“, „rücksichtslose Radfahrer“ sowie „Langsamfahrer“ und „dauerhafte Mittelspurfahrer“.

Diese Ergebnisse müssen insgesamt jedoch kritisch betrachtet werden. Um ein möglichst umfassendes Bild von relevanten Situationen zu gewinnen sind quantitative Untersuchungsansätze wie in [6] ungeeignet, da sie nur die Bewertung und Reaktion von Fahrern auf vorher definierte Szenarien erfassen. In qualitativen Befragungen (z. B. Interviews oder Onlinebefragungen) wird ein offener Ansatz verfolgt, jedoch können Fahrer sich unmöglich an alle relevanten Situationen erinnern. Auch die Tagebuchmethode, die kleinere Abfrageintervalle ermöglicht und daher engmaschiger Situationen erfasst, hat das Problem, dass Beschreibung und Bewertung der Situation erst nachträglich erfolgen. Alle retrospektiven Berichte sind Verzerrungen unterworfen. Dies betrifft zum einen die rückblickende Häufigkeitsschätzung von Ereignissen [11] und zum anderen die Bewertung von Gefühlen im Nachhinein [12]. Dabei hat beispielsweise das momentane Befinden Einfluss auf die Bewertung zurückliegender Ereignisse [13]. Um diese Verzerrungen zu umgehen, wird eine Datenaufzeichnung während der

relevanten Situationen empfohlen [11] [14]. In der Fahrer-Fahrzeug-Forschung wird dies bereits im Rahmen von Naturalistic Driving Studies und Field Operational Tests umgesetzt, jedoch nur zur Messung von objektiven Fahrparametern. In der vorliegenden Studie wird dieser grundlegende Ansatz genutzt und erweitert, um das subjektive Fahrerleben zu erfassen.

## **2. Methode**

Der grundlegende Versuchsaufbau der Untersuchung sowie die Entwicklung der Smartphone-Applikation zur Datenerfassung wurden bereits ausführlich in [15] dargestellt. An dieser Stelle wird deshalb darauf nur überblicksartig eingegangen.

### **Stichprobe**

Versuchsteilnehmer waren 40 Männer und 40 Frauen in je zwei Altersgruppen. Die jüngeren Fahrer waren durchschnittlich  $M = 32,35$  Jahre alt ( $SD = 3,58$ ), die älteren  $M = 66,05$  Jahre ( $SD = 4,13$ ). Alle Probanden waren geübte Fahrer und legten im letzten Jahr im Mittel  $M = 15.795$  km ( $SD = 10.137$ ) zurück. Jüngere Männer fuhren dabei signifikant mehr als die anderen Gruppen. 47,5 % der jüngeren Fahrer hatte einen Tempomat im eigenen Fahrzeug, bei den älteren waren es 40 %. Mit weiter entwickelten FAS, wie ACC, Spurhalteassistent oder Einparkassistent war nur ein Fahrzeug einer jüngeren Teilnehmerin ausgestattet.

### **Versuchsaufbau**

Die Untersuchung war im Stil einer Naturalistic Driving Study aufgebaut. Alle Probanden fuhren für je zehn Tage mit ihrem privaten Fahrzeug in ihrem Alltag (zur Arbeit, für Besorgungen, in der Freizeit usw.) ohne dass ein Versuchsleiter anwesend war. Dafür bekamen sie ein Smartphone mit einer eigens entwickelten Smartphone-Applikation zur Verfügung gestellt, mit der sowohl Fahr-, als auch Video- (Blick auf die Straße) und Sprachdaten aufgenommen werden konnten. Damit sollte jede Verkehrssituation, die für den Fahrer besonders oder bemerkenswert war, festgehalten und durch den Probanden kommentiert werden. Instruiert wurde, dass alle (auch positive) Situationen relevant sind, die den Fahrer aufmerken lassen und ihn aus seinem Fahrtrott holen. Zusätzlich wurde jede Fahrt mit Fragebögen protokolliert, die jeweils vor und nach der Fahrt zum Einsatz kamen. Am Ende der Versuchszeit wurden die Probanden in einem Interview zu ihren Eindrücken vom Versuch und zu möglichen Lösungsideen für aufgetretene Situationen befragt.

### **Datenaufzeichnung über Smartphone-Applikation**

Jeder Proband erhielt für die Dauer des Versuches ein Smartphone vom Typ *Samsung Galaxy S3 mini*. Vor jeder Fahrt fügte der Proband das Smartphone in Halterung an der Windschutzscheibe ein und startete die darauf installierte Applikation. Die Smartphone-Applikation zeich-

nete daraufhin über den gesamten Fahrzeitraum GPS-Daten und (aus GPS berechnete) Geschwindigkeitsdaten mit 1 Hz sowie Beschleunigungsdaten mit 5 Hz Datenrate auf. Wollte der Proband eine Situation aufnehmen, so betätigte er während der Fahrt einen großen Button in der Applikation. Ab diesem Zeitpunkt lief für 40 s eine Sprachaufzeichnung und der Fahrer konnte die erlebte Situation beschreiben. Gleichzeitig wurde rückwirkend das Speichern der letzten Minute der Videodaten ausgelöst. Damit konnte sowohl die aufgezeichnete Datenmenge sehr gering gehalten als auch sichergestellt werden, dass Situationen auch noch im Video zu sehen waren, wenn der Proband erst eine Weile nach der Situation (z. B. weil er sie erst bewältigen musste) die Aufnahme auslöste.

Was im Sprachprotokoll beschrieben werden sollte, wurde im Rahmen der Instruktion festgelegt. Dabei sollten die Probanden darauf achten, nicht nur (1) die Situation zu beschreiben, sondern darüber hinaus anzugeben, (2) warum die Situation für sie relevant war und (3) wie sie diese in Bezug auf ihre mentale Beanspruchung bewerten. Diese Bewertung geschah mündlich anhand einer Skala von 0 bis 10, die für eine bessere Verständlichkeit des Konzepts der mentalen Beanspruchung als „Anstrengungsskala“ bezeichnet wurde.

#### ***Datenaufbereitung und -analyse der Sprachprotokolle***

Alle Sprachprotokolle wurden im ersten Schritt transkribiert und anschließend im Programm *MaxQDA 11* analysiert. Hierzu wurde zunächst in jedem Sprachprotokoll identifiziert, welche Auslöser (bzw. beitragenden Faktoren) die Probanden für die Situation nannten. Dabei wurde der Kategorisierungsprozess an die Qualitativen Inhaltsanalyse von Mayring [16] angelehnt. Zunächst wurde ein induktives Vorgehen gewählt, indem Kategorien sehr nah an den eigentlichen Aussagen der Probanden gebildet wurden, die schließlich zu inhaltlich gleichen, paraphasierten Kategorien zusammengefasst wurden.

Grundsätzlich konnten zunächst manöverlose und manöverbasierte Auslöser unterschieden werden. Manöverlose Auslöser bezeichneten dabei alle Aspekte einer Situation, die keine Interaktion des Probandenfahrzeugs mit anderen Verkehrsteilnehmern beinhalteten, wie eine rote Ampel oder die eigene Müdigkeit. Manöverbasierte Auslöser ließen sich jedoch auf ein Manöver des Probandenfahrzeugs bzw. das Verhalten eines anderen Verkehrsteilnehmers zurückführen, wie z. B. Überholvorgänge oder ein langsamer Vorausfahrer. Um die Fülle an verschiedenen manöverbasierten Auslösern zu kategorisieren, wurde der Unfalltypenkatalog „UNKA“ [17] zur Orientierung herangezogen. Da dieser Katalog lediglich die Konfliktsituation betrachtet, war er gut geeignet, um die manöverbasierten Auslöser zu strukturieren, auch

wenn kein Unfall passierte. Im folgenden Beispiel ist ein Sprachprotokoll mit manöverbasiertem (Behinderung durch ein stehendes Fahrzeug) und manöverlosem Auslöser (Sichtbehinderung durch Kurve) dargestellt:

**„Mitten in der Kurve steht jemand und blockiert die Fahrbahn. [...] Musste dadurch bremsen und es war eine unübersichtliche Stelle, um dann links vorbei zu fahren. War überrascht und genervt. 3.“ (VP 06)**

Die verbalisierte Reaktion der Probanden auf die Situation – also auch oft die Erläuterung, weshalb die Situation für sie relevant war – wurde analog zu den Auslösern im nächsten Schritt kategorisiert. In den meisten Fällen handelte es sich dabei um eine emotionale Reaktion, manchmal wurde jedoch auch ein persönlicher Zustand beschrieben, der keine Emotion im eigentlichen Sinne darstellte. Zur Abgrenzung von konkreten Handlungsreaktionen (z. B. „musste bremsen“) wurde jedoch weiter insgesamt der Begriff „emotionale Reaktion“ verwendet. Die Kategorisierung wurde hier rein induktiv vorgenommen und die wortwörtlichen Aussagen der Probanden anschließend zu Kategorien zusammengefasst. Für die häufigsten Nennungen werden die entsprechenden Kategorien in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Kategorisierung emotionaler Reaktionen

Kategorie	Unterkategorien	Beispiel
genervt	erbost, erregt, gereizt, sauer, frustriert, verärgert, aggressiv	„Die Ampel hat umgeschaltet auf Rot, obwohl nur 3 Fahrzeuge über die Kreuzung konnten. Sowas nervt mich.“ (VP 4)
gestresst	ungeduldig, angestrengt, beansprucht, belastet, ermüdet, gefordert, gehetzt, hektisch, überfordert	„Jetzt bin ich gefahren und wollte die Spur wechseln und habe es aber gerade noch so geschafft. War für mich ein bisschen stressig“ (VP 21)
beunruhigt	unsicher, verstört, verwirrt, irritiert, angespannt, beunruhigt, besorgt, mulmig, nervös, unbehaglich, unangenehm, aufgewühlt	„Ich mag das nicht, wenn die Autos zu nahe am Straßenrand parken [...]. Das wühlt mich ein bisschen auf. Aus Angst, dass [...] mir dann der Gegenverkehr [...] reinfährt“ (VP 25)
konzentriert	aufmerksam, konzentriert, nachdenklich	„Fahrtstrecke [...] erfordert vollste Konzentration“ (VP 6)

### 3. Ergebnisse

Die 80 Probanden legten insgesamt 32687 km ( $M = 408,59$  km,  $SD = 332,23$ ) zurück und verfassten dabei im Ganzen 1228 (1074 relevante) Sprachprotokolle. Unfälle gab es keine. Innerorts wurden 68,9 % der Protokolle aufgenommen, 13,6 % auf der Landstraße und 17,2 % auf der Autobahn. Jeder Proband zeichnete durchschnittlich  $M = 14,79$  ( $SD = 14,92$ ) Situationen auf. Dabei war die Anzahl interindividuell sehr verschieden ( $Range = 0 - 81$ ) und weder die Alters- noch die Geschlechtergruppen unterschieden sich systematisch. Auch der Einfluss

der zurückgelegten Fahrtstrecke auf die Anzahl der während dieser Fahrt aufgenommenen Sprachprotokolle war sehr gering (Lineare Regression mit  $F(1,1507) = 78,73; p < 0,001; R^2 = 0,05$ ).

### Auslöser

Insgesamt wurden in den 1074 relevanten Protokollen 1791 Auslöser genannt. Dabei konnten 136 unterschiedliche manöverlose und 162 unterschiedliche manöverbasierte Auslöser unterschieden werden. Manöverlose Auslöser wurden zunächst zu den Bereichen Umwelt (715 Nennungen), Fahrer (132 Nennungen) und Fahrzeug (23 Nennungen) zugeordnet, wobei „Umwelt“ und „Fahrer“ wiederum in Kategorien unterschieden werden konnten. Diese sind unterstrichen in Tabelle 2 mit dem jeweils häufigsten Auslöser dieser Kategorie dargestellt. Aufgeführt sind alle Kategorien mit mindestens 30 Nennungen.

Tabelle 2: Manöverlose Kategorien und Auslöser

N	Umwelt	N	Fahrer
147	<u>Ampel:</u>	60	<u>Fahrerzustand:</u>
43	Ampelreihenschaltung rot	47	Zeitdruck
133	<u>Verkehrsdichte:</u>	33	<u>Routenwahl/Navigation:</u>
60	Starker Verkehr	8	Navigations-/Orientierungsprobleme
121	<u>Straßengeometrie:</u>		
85	geringe Straßenbreite		
73	<u>Sichtbehinderung:</u>		
33	durch Straßengeometrie (Kurven, Kuppen)		
62	<u>Behinderung:</u>		
40	Baustelle		
31	<u>Verkehrsleitung/-regeln:</u>		
17	fehlende/unverständliche Beschilderung		
30	<u>Wetter:</u>		
15	Regen		

Jüngere Fahrer berichteten signifikant häufiger den Auslöser „Zeitdruck“, Ältere hingegen öfter „fehlende/unverständliche Beschilderung“. Weitere Kategorien, die den Fahrer betrafen, waren „Ablenkung“ (29 Nennungen) und 10 Nennungen individueller Fehler (z. B. eine Grünphase zu verpassen).

Die Kategorisierung manöverbasierte Auslöser erfolgte aufgrund der Komplexität in noch mehr Gliederungsebenen. Unterschieden wurde immer, ob das Manöver/Verhalten vom Probanden selbst (aktiv) oder von einem anderen Verkehrsteilnehmer (passiv) durchgeführt wurde. In Tabelle 3 werden alle manöverbasierten Kategorien dargestellt, die mindestens 30 Nennungen hatten, sowie der jeweilig häufigste Auslöser.

Tabelle 3: Manöverbasierte Kategorien und Auslöser

N	Kategorie	N	aktive Auslöser	N	passive Auslöser
377	Längsverkehr	4	gelbe Ampel überfahren	111	Vorausfahrer ist langsam
189	Spurwechseln/Überholen	19	Spurwechseln	37	Einscherer auf eigene Spur
60	Regelwidriges Verhalten	9	überhöhte Geschwindigkeit	11	überhöhte Geschwindigkeit anderer
52	Anfahren, Rangieren, Parken	34	Parkplatzsuche	6	parkende Fahrzeuge am Straßenrand
50	Querverkehr	5	Blockieren der Kreuzung	12	Nachrangiger/Einsatzfahrzeug quert eigene Spur
50	Gegenseitige Rücksichtnahme	9	Achten auf Fußgänger	10	Vorfahrt gewährt bekommen
38	Unklares Verhalten	-	-	11	nicht eindeutige Spurwechselsituationen
38	Fahrradfahrer	2	Fahrradfahrer spät gesehen	26	Fahrradfahrer auf eigener Spur
32	Fußgänger	1	Fußgänger übersehen	13	Fußgänger auf eigener Spur

Der mit Abstand am häufigsten genannte Auslöser der gesamten Untersuchung war „Vorausfahrer ist langsam“, der von jüngeren Fahrern etwa fünfmal so oft angeführt wurde wie von älteren. Auch andere Auslöser, die prinzipiell das Fortkommen der Fahrer behinderten (z. B. „stehende Behinderung“ oder „Fahrradfahrer auf eigener Spur“), wurden deutlich häufiger von jüngeren Probanden genannt. In die Kategorie „Unklares Verhalten“ wurden alle Situationen eingeordnet, in denen der Proband angab, dass er das Verhalten eines anderen Verkehrsteilnehmers nicht abschätzen könne. Am häufigsten traf dies Spurwechsel auf der Autobahn, bei denen nicht klar war, ob ein anderes Fahrzeug den Probanden einschert lässt bzw. ob ein anderes Fahrzeug in die Spur des Probanden einschert oder nicht. „Unklares Verhalten“ wurde jedoch auch in Interaktionen im Stadtverkehr an Kreuzungen oder an Bushaltestellen protokolliert. Jüngere berichteten diese Situationen 33 Mal, ältere nur 5 Mal.

### **Emotionale Reaktionen**

In den Sprachprotokollen nannten die Probanden in 76,7 % aller Fälle mindestens eine emotionale Reaktion (ER), zum Teil auch mehr. Am häufigsten reagierten die Probanden „genervt“ (in 34,7 % aller Sprachprotokolle), gefolgt von „gestresst“ (in 12,9 %) und „beunruhigt“ (in 11,6 %). Eine erhöhte Konzentration in Folge der Situationsauslöser wurde in 82 Fällen (entspricht 7,6 % aller Sprachprotokolle) genannt.

In Bezug auf manöverlose und manöverbasierte Auslöser zeigten sich Unterschiede in der Nennungshäufigkeit der einzelnen ER (siehe Bild 1). Auffällig ist besonders, dass die Fahrer

ehler „gestresst“ auf manöverlose Auslöser reagierten, hingegen sehr viel öfter „beunruhigt“ auf manöverbasierte Auslöser.

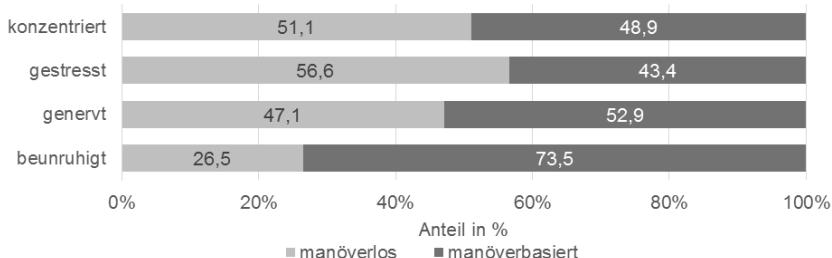


Bild 1: Anteile emotionaler Reaktionen an manöverlosen und manöverbasierten Auslösern

Auf Ebene der einzelnen Auslöser und Kategorien zeigten sich ebenfalls Unterschiede in der Nennungshäufigkeit der ER. Für die am häufigsten genannten Auslöser bzw. Kategorien, in denen auch oft eine ER genannt wurde, sind die Verteilungen in Bild 2 und Bild 3 dargestellt. Für die Auswertung wurden immer alle Sprachprotokolle betrachtet, in denen der Auslöser bzw. die Kategorie vorkamen, und dann der Anteil der entsprechenden ER berechnet. In der Hälfte aller Sprachprotokolle, die den Auslöser „Ampelreihenschaltung rot“ enthielten, war dies beispielsweise die ER „genervt“.

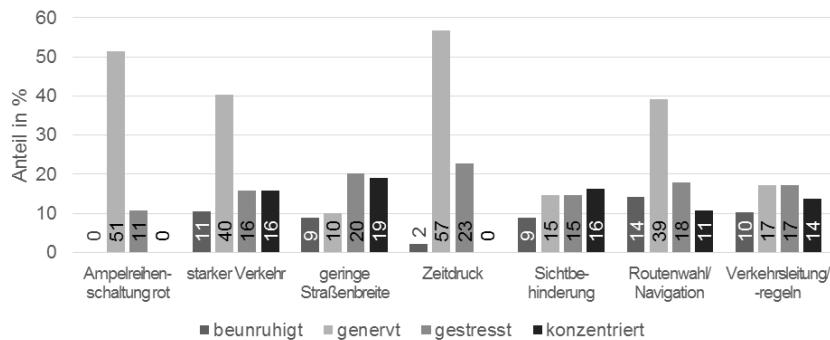


Bild 2: Häufige emotionale Reaktionen auf manöverlose Auslöser/Kategorien

Da „genervt“ insgesamt die häufigste Reaktion war, wurde diese auch in Verbindung mit vielen Auslösern sehr oft genannt. Auch in Sprachprotokollen, in denen Zeitdruck mit als Auslöser genannt wurde (allein kam er nie vor), war die häufigste Reaktion „genervt“. Eher „gestresst“

und „konzentriert“ reagierten Fahrer auf Merkmale der Infrastruktur, wie eine geringe Straßenbreite, Sichtbehinderung oder Verkehrsleitung/-regeln. Eine hohe Anzahl von ER riefen auch die Auslöser „Ampelschaltung rot“, „Straßenschäden“ und „Baustelle“ hervor. Bei den ersten beiden reagierten Fahrer eher „genervt“, bei einer Baustelle zugleich „genervt“ und „gestresst“.

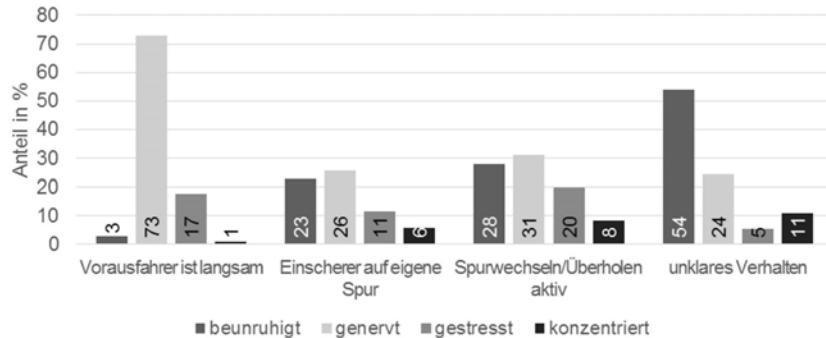


Bild 3: Häufige emotionale Reaktionen auf manöverbasierte Auslöser/Kategorien

Auf den Auslöser „Vorausfahrer ist langsam“ reagierte die große Mehrheit „genervt“. In den anderen Situationen kam auch oft die Reaktion „beunruhigt“ vor, besonders auffällig war dies in der Kategorie „Unklares Verhalten“. Einen hohen Anteil von berichteten ER erreichten zudem die Auslöser „Drängler von hinten“, „Vorausfahrer verzögert“ sowie „LKW überholt LKW“. Bei einem verzögernden Vorausfahrer äußerten sich die Probanden etwa gleich oft als „beunruhigt“ und „genervt“, in den anderen Fällen fast ausschließlich „genervt“.

#### 4. Diskussion und Ausblick

Die große Anzahl aufgezeichneter Sprachprotokolle zeigt, dass die situationsnahe Erfassung subjektiven Erlebens beim Autofahren insgesamt sehr gut gelang. Die Probanden berichteten viele verschiedene Situationsauslöser, wobei nur einzelne besonders häufig genannt wurden. 46 % der manöverlosen Auslöser traten nur einmal auf, bei den manöverbasierten waren es 36 %. Dies zeigt die hohe Vielfalt alltäglich erlebter Fahrsituationen, die Fahrer aufmerken lassen, und die große Varianz an Konstellationen von Situationsbedingungen.

Viele der hier in den Sprachprotokollen beschriebenen Situationen fanden sich in anderen Untersuchungen zur Beanspruchung von Verkehrssituationen gar nicht wieder. Beispielsweise wurden Ärger und Stress in Verbindung mit Ampelschaltungen (hier die insgesamt dritthäufigste Kategorie) nur in einer offenen Befragung genannt [9], in allen anderen Studien kamen sie nicht vor. Die Probanden berichteten zudem häufig Sichtbehinderungen, die sonst gar

keine Erwähnung fanden. Hier handelt es sich um ein typisches Beispiel für eine Situation, die offensichtlich oft vorkommt und die jeder Fahrer kennt. Darüber hinaus stellt sie eine gewisse Herausforderung und ggf. sogar ein Sicherheitsrisiko dar. Trotzdem berichten Fahrer diese Art von Situationen in (retrospektiven) Befragungen nicht. Der Grund dafür liegt vermutlich darin, dass sie weder als besonders beanspruchend bewertet werden (mittlerer Anstrengungswert in dieser Erhebung:  $M = 3,2$ ) noch mit einer hohen emotionalen Bewertung einhergehen (hier hauptsächlich mit der Reaktion „konzentriert“) und daher retrospektiv eher von anderen Ereignissen überlagert werden. Das Gegenbeispiel hierzu stellt der Auslöser „Drängler von hinten“ dar. In vielen Untersuchungen (z.B. [6], [9] und [10]) rangiert dieser an erster Stelle bei Nennungen, was Fahrer verärgert oder stressst. Hier wurde er nur 20 Mal genannt, jedoch auch mit einer überdurchschnittlichen Anstrengung von  $M = 4,27$  bewertet und mit vielen emotionalen Reaktionen kommentiert. Wird eine solche (relativ seltene) Situation durchlebt, bleibt sie offensichtlich präsenter im Gedächtnis und überlagert damit in retrospektiver Sicht auch andere, weniger beanspruchende Ereignisse. Die mit Abstand am häufigsten berichtete Situation war „Vorausfahrer ist langsam“. In nahezu dreiviertel aller derartiger Berichte sprachen die Probanden davon, genervt zu sein. Gerade in der freien Exploration [9] und in Online-Foren [10] wird auch häufig davon berichtet. Ein langsamer Vorausfahrer kam dort als „Dauerlinksfahrer“ oder „Sonntagsfahrer“ vor.

Aus der Verteilung der emotionalen Reaktionen auf manöverlose und manöverbasierte Auslöser geht hervor, dass Fahrer eher „gestresst“ auf manöverlose und zum größten Teil „beunruhigt“ auf manöverbasierte Auslöser reagieren. Vermutlich resultieren Unsicherheit und Angst eher aus der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern, da hier eine deutlich höhere Dynamik und geringere Vorhersehbarkeit bestehen als in Situationen, in denen beispielsweise Umweltbedingungen (Ampeln, Straßenbreite etc.) eine Rolle spielen. Auf die meisten Situationen reagierten Fahrer überwiegend „genervt“ oder „gestresst“. Eine Ausnahme stellen die Situationen dar, in denen Fahrer von unklarem Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer berichteten. Dort äußerten sie sich hauptsächlich als „beunruhigt“. Die Antizipation von Verkehrssituationen ist ein wichtiger Bestandteil sicherer Fahrens [18]. Kann das zukünftige Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer (etwa ob sie das Einscheren in deren Spur gewähren oder nicht) nicht eindeutig beurteilt werden, löst das eine hohe Verunsicherung aus. Dass vorrangig Jüngere diese Situationen protokollierten, könnte verschiedene Ursachen haben, wobei andere Befunde, z. B. [19], nahelegen, dass Ältere die Situationsmerkmale weniger gut wahrnehmen und daher keine mögliche Konfliktsituation antizipieren. Hierzu sind jedoch weitere Untersuchungen nötig.

In den Ergebnissen spiegelt sich das Erleben von Fahrern im Fahrralltag wider. Dabei wird deutlich, in welchen Situationen noch Ansatzpunkte für zukünftige Unterstützung durch Fahrerassistenzsysteme bestehen. Die emotionale Reaktion der Fahrer auf diese Situationen ist jedoch auch in Bezug auf die konkrete Gestaltung der Unterstützung relevant. Es ist davon auszugehen, dass ein „genervter“ Fahrer andere Bedürfnisse und Unterstützungswünsche hat als ein „beunruhigter“. Während ein Fahrer, der verunsichert ist, vermutlich mehr Informationen über die Situation haben will, könnten diese einen „genervten“ Fahrer nur zusätzlich aufbringen. Inwiefern dies in einer konkreten HMI-Gestaltung berücksichtigt werden kann, sollten zukünftige Studien zeigen.

### Danksagung

Das Forschungsvorhaben wurde von der Bosch-Forschungsstiftung im Rahmen eines Promotionsstipendiums über einen Zeitraum von drei Jahren gefördert.

### Literaturverzeichnis

- [1] Staubach, M. (2009). Factors correlated with traffic accidents as a basis for evaluating Advanced Driver Assistance Systems. *Accident Analysis & Prevention*, 41(5), 1025-1033.
- [2] Schnaebele, P. (2011). *Was will der Autofahrer?* Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, 11.09.2011.
- [3] Arndt, S. (2010). *Evaluierung der Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen. Modell zum Kaufverhalten von Endkunden.* Dissertation, Technische Universität Dresden.
- [4] Rath, V. (2008). *Kundennahe Institutionen als Träger innovationsrelevanten Kundenwissens.* Dissertation, Universität Bamberg.
- [5] Handlauber, G.; Renzl, B. (2006). Kundenorientiertes Wissensmanagement. In Hinterhuber, H. (Hrsg.) *Kundenorientierte Unternehmensführung: Kundenorientierung, Kundenzufriedenheit, Kundenbindung.* 5. Auflage. Wiesbaden: Gabler, 145-169.
- [6] Ellinghaus, D. & Steinbrecher, J. (1994). *Die Autobahn - Verkehrsweg oder Kampfstätte? Eine Untersuchung über Konflikte und Unfallgeschehen auf Autobahnen.* Gesellschaft für angewandte Sozialforschung und Planung mbH.
- [7] Robert Bosch GmbH - Chassis Systems Control (2013). *Fahrerassistenzsysteme - Wie viel Unterstützung wünschen deutsche Autofahrer?* [http://www.bosch-presse.de/pressportal/de/media/migrated\\_download/de/7966ks-d\\_Anlage\\_Befragung\\_Fahrerassistenz.pdf](http://www.bosch-presse.de/pressportal/de/media/migrated_download/de/7966ks-d_Anlage_Befragung_Fahrerassistenz.pdf) (19.03.2017).

- [8] Underwood, G., Chapman, P., Wright, S., Crundall, D. (1999). Anger while driving. *Transportation Research Part F*, 2, 55-68.
- [9] ADAC (2011). *Was nervt im Straßenverkehr*. <http://www.adac.de/infotestrat/adac-im-einsatz/motorwelt/Aerger-umfrage.aspx> (02.04.2017).
- [10] Bähitz, F. (2015). „Schon wieder die rote Ampel!“ Welche Fahrsituationen berichten Fahrer als beanspruchend? Studienarbeit, Technische Universität Chemnitz.
- [11] Schwarz, N. (2007). Retrospective and Concurrent Self-Reports: The Rationale for Real-Time Data Capture. In A. Stone, S. S. Shiffman, A. Atienza & L. Nebeling (Hrsg.) *The science of real-time data capture: Self-reports in health research*, 11-26. New York: Oxford University Press.
- [12] Robinson, M. D. & Clore, G. L. (2002). Belief and feeling: Evidence for an accessibility model of emotional self-report. *Psychological Bulletin*, 128(6), 934-960.
- [13] Eich, E., Reeves, J. L., Jaeger, B. & Graff-Radford, S. B. (1985). Memory for pain: Relation between past and present pain intensity. *Pain*, 23, 375-380.
- [14] Stone, A. A. & Shiffman, S. (2002). Capturing momentary, self-report data: A proposal for reporting guidelines. *Annals of Behavioral Medicine*, 24(3), 236-243.
- [15] Simon, K., Spanner-Ulmer, B. & Bullinger, A.C. (2014). Erfassung subjektiven Fahrerlebens zur Ableitung von Unterstützungsbedürfnissen jüngerer und älterer Autofahrer. *Tageungsband 30. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit*. 14. Oktober 2014 - 15. Oktober 2014, Wolfsburg, S. 31-44.
- [16] Mayring, P. (2008). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (10., neu ausgestattete Auflage). Beltz Pädagogik. Weinheim: Beltz.
- [17] Gesamtverband deutscher Versicherer (2009). *Interaktiver Unfalltypenkatalog „UNKA“*. <https://udv.de/de/strasse/unfallkommission/arbeitshilfen/unfalltypenkatalog-unka> (17.02.2017).
- [18] Sommer, K. C. (2013). *Vorausschauendes Fahren: Erfassung, Beschreibung und Bewertung von Antizipationsleistungen im Straßenverkehr*. Dissertation, Universität Regensburg.
- [19] Fastenmeier, W. & Gstalter, H. (2008). Anforderungsgerechtes Autofahren im Alter. In Schlag, B. (Hrsg.) *Leistungsfähigkeit und Mobilität im Alter*, 37-64.

# IAV Cloud-Car und kontextbasierte Innenraumbeleuchtung

M.B.Eng. **M. Rieger**, Dr.rer.nat. **M. Marutzky**, Dipl.-Ing. **S. Bogdanow**,  
IAV GmbH, Gifhorn

## Kurzfassung

Im IAV Cloud Car, vorgestellt auf der CES 2016 in Las Vegas und auf der Licht 2016 in Karlsruhe, zeigten wir die Möglichkeiten auf, die die Digitalisierung des Automobils bietet. In diesem Beitrag fokussieren wir auf die kontextbasierte Innenraumbeleuchtung des IAV Cloud Car. Ihre Funktion geht über die klassische Funktion der Innenraumbeleuchtung, dem Fahrer die Orientierung im Fahrzeug zu ermöglichen, seine Wahrnehmung zu unterstützen und das Design des Innenraums auch bei Nacht gezielt zu betonen, hinaus. Ziel der kontextbasierten Innenraumbeleuchtung ist es neben diesen Aspekten gezielt den Zustand und die Stimmung des Fahrers zu beeinflussen. Wesentlich umgesetzt wird kontextbasierte Innenraumbeleuchtung über eine große Flächenleuchte, die dynamisch Bereiche im Fahrzeug beleuchten und Animationen und Farbverläufe darstellen kann. Sie ist vernetzt mit den biometrischen Sensoren und den Fahrerassistenzsystemen des Cloud Car.

## 1. IAV Cloud Car

In einer Kooperation mit Hewlett Packard Enterprise wurde ein Seat Cupra zum sogenannten "Cloud Car" umgerüstet (Bild 1) [1]. Das Cloud Car ist in der Lage, mit anderen Fahrzeugen und mit seiner Umgebung zu kommunizieren. Das Fahrzeug überwacht den Fahrerzustand über biometrische Sensoren und misst zum Beispiel den Puls. Die biometrischen Signale werden mit den Umfeld- und Fahrzeugdaten verknüpft und mit diesen Daten unter anderem die kontextbasierte Innenraumbeleuchtung gesteuert. Damit wird der Fahrer je nach Fahrsituation und Fahrerzustand optimal unterstützt. Die individuell gewählten Präferenzen des Beleuchtungsszenarios werden personalisiert erfasst. Die Fahrzeug- und Fahrerdaten sind dann über eine Private Cloud dem Fahrer mobil übermittelbar. Aus einer Public Cloud erhalten Fahrzeug und Fahrer Nachrichten und Informationen über Verkehr und Wetter (Bild 2). Ebenfalls ist eine „Remote-Diagnose“ als Cloud-Dienst verfügbar um den technischen Zustand und eventuelle Fehler dem Nutzer und dem Kundendienst sofort verfügbar zu machen.

Um die Schnittstellen des Fahrzeugs auf das autonome Fahren vorzubereiten, wurde eine „Remote Control“ umgesetzt. Im Wesentlichen wurden dabei die mechanischen Schnittstellen durch elektronische ersetzt. Der Fahrer kann nun von inner- und außerhalb des Cloud Cars

über ein Smartphone lenken, bremsen und beschleunigen. Neben der Perspektive des autonomen Fahrens ist unmittelbarer praktische Vorteil, dass die Lenksäule wegfallen kann. Das eröffnet neue Freiräume in der Bauraumnutzung und erhöht die „Crash“-Sicherheit. Das Fahrzeug kann ferngesteuert von außerhalb in enge Parklücken manövriert werden und neue Assistenzfunktionen sind durch die Schnittstellenvorbereitung einfacher zu integrieren.

Des Weiteren wurde ein „Virtual Co-Pilot“, also ein virtueller Beifahrer im Cloud Car verwirklicht. Ähnlich wie der Copilot eines Rallyefahrers bereitet er Streckeninformationen vor. Er berechnet die kommende Streckenkrümmung, die zu erwartende Querbeschleunigung und zeigt eine „Wohlfühlgeschwindigkeit“ an und greift in die Fahrzeugverzögerung ein. Der Virtual Co-Pilot dient präventiv der Unfallvermeidung, insbesondere bei jungen unerfahrenen Fahranfängern, in Schlechtwettersituationen mit eingeschränkter Sicht und bei monotonen Streckenabschnitten.

Bei einem derart vernetzten Fahrzeug wie dem Cloud Car muss vor ungewollter Manipulation und die Privatsphäre des Nutzes geschützt werden. Diese Absicherung übernimmt zuverlässig unser kleinserientaugliches Secure Communication Gateway.

## 2. Von der Ambienten Beleuchtung zum Wohlfühllicht

Die Innenraumbeleuchtung umfasst mehrere Aspekte. Zunächst soll sie dem Fahrer und den Beifahrern die Orientierung im Fahrzeug ermöglichen und ihre Wahrnehmung unterstützen um Fahrzeugfunktionen aufzurufen. Seit einigen Jahren wird zusätzlich die Innenraumbeleuchtung zunehmend von Design entdeckt und Beleuchtungselemente wie etwa Lichtleiter genutzt, um die wahrgenommene Wertigkeit des Innenraums zu erhöhen. Dieses führt zur „Ambienten Beleuchtung“. Jedoch beeinflusst Licht den Menschen psychologisch und physiologisch unter anderem über den Hormonhaushalt. Somit kann Zustand und Stimmung der Fahrzeuginsassen im positiven Sinn manipuliert werden.

Zu einen verbindet der Mensch mit bestimmten Farben bestimmte Gefühle. So wirkt Blau einerseits beruhigend, aber auch kalt und distanziert. Orange wirkt dagegen nah und warm. Neben der Farbe spielen dabei auch Helligkeit und Sättigung eine Rolle. Die Farbwirkung ist aber kulturell unterschiedlich. Der Mitteleuropäer verbindet beispielsweise mit Gelb eher gespannte Gefühle wie Eifersucht, Neid oder Gier, während in China eher positive Eigenschaften wie Weisheit assoziiert werden. Neben der Farbe spielen dabei auch Helligkeit und Sättigung eine Rolle. Insgesamt muss ein Wohlfühllicht also individualisierbar und dynamisch auf Stimmung und Verfassung des Fahrers oder Beifahrers reagieren.

Zum anderen muss die kontextbasierte Innenraumleuchte die Insassen in ihrem Tun unterstützen. Dabei ist es sinnvoll, den Innenraum in Anforderungszonen aufzuteilen. Während zum

Beispiel der Beifahrer die Reise im Cloud Car zur Entspannung nutzen möchte und somit eine beruhigende Beleuchtung geringerer Intensität benötigt, möchte dagegen der hintere Mitfahrer die Zeit zum Lesen nutzen und benötigt eine Beleuchtung, die ihn ausreichende Wahrnehmung ermöglicht ohne ihn zu ermüden und um seine Konzentration aufrecht zu halten. Der Fahrer darf dabei in keinen Fall durch Licht aus anderen Zonen gestört oder geblendet werden. In seiner Zone muss ihm die ambiente Beleuchtung einen angenehmen Fahrkomfort liefern und ihn vor Ermüdung schützen. Der Lichtlevel muss so eingestellt sein, dass die Fahreraugen einen optimalen Adaptationszustand für die Wahrnehmung des Verkehrsgeschehens einnehmen. Wie ein Beleuchtungskonzept für den Innenraum erstellt und messtechnisch bewertet werden kann, zeigten wir in [2]. Im nächsten Abschnitt zeigen wir die Umsetzung einer kontextbasierten Innenraumbeleuchtung im IAV Cloud Car.

### 3. Realisierung der kontextbasierten Innenraumbeleuchtung

Die Realisierung der kontextbasierten Innenraumbeleuchtung geschieht über eine große Flächenleuchte mit einer Kantenlänge von 100cm x 65cm, die in den Dachhimmel integriert wurde. Sie besteht aus einer Matrix von RGB-LEDs mit einer Pixelgröße von 2cm x 2cm, die in acht Zonen unterteilt ist (Bild 3). Die Zonen sind so aufgeteilt, dass sie wo oben beschrieben die Anforderungsbereiche für Fahrer, Beifahrer und Heckpassagiere beleuchten. Dabei ist die Sichtbarkeit der leuchtenden Fläche bestmöglich auf die jeweilige Zone beschränkt.

Jede RGB-LED ist einzeln dimmbar und in der Farbkoordinate frei wählbar. Es sind Helligkeits- und Farbverläufe und Animationen möglich. Die Ansteuerung der Innenraumleuchte kann wiederum über eine App auf einem Smartphone geschehen oder mittels den Informationen, die die biometrischen Sensoren liefern. Eine UCU (Universal Control Unit) wertet dabei den Fahrerzustand und die individuellen Präferenzen des Fahrers aus (Bild 4). Obwohl die Matrix-Innenraumleuchte im Prinzip frei programmierbar ist, haben wir im Cloud Car vier „Use Cases“ voreingestellt:

1. ein Reiselicht welches schlafende Insassen sanft vor der Ankunft am Ziel wecken soll;
2. eine biometrische Ambientebeleuchtung, die dynamisch auf den physiologischen Zustand der Insassen reagiert;
3. ein „Welcome Light“, das ist ein Lichtszenario zur Begrüßung des Fahrers bei Einstieg nach Entriegelung des Fahrzeugs;
4. eine Animation „Sternenhimmel“.

### 3. Zusammenfassung

Im IAV Cloud Car zeigten wir auf, welche Möglichkeiten die Digitalisierung des Automobils dem Fahrer des 21. Jahrhundert bietet. Dabei werden Umfelddaten, Fahrzeugdaten und der über biometrische Sensoren gemessene Fahrerzustand ausgewertet. Über eine Cloud ist eine Kommunikation zur Außenwelt möglich und die Daten z.B. über ein Smartphone abrufbar. Ein Secure Communication Gateway schützt dabei vor missbräuchlichen, unbefugten Zugriffen. Als besondere Funktionen zeigen wir die Fernsteuerbarkeit des Cloud Cars, die das Autonome Fahren vorbereitet, den virtuellen Beifahrer, der den Fahrer unterstützt und die Diagnose-Funktion via Cloud. Besonders hervorgehoben wurde die kontextbasierte Innenraumbeleuchtung. Die Beleuchtung kann die Wahrnehmung, die Stimmung und den Zustand von Fahrer und Mitfahrern beeinflussen. Wir realisierten die kontextbasierte Innenraumbeleuchtung über eine große Flächenleuchte, die aus einer RGB-LED-Matrix besteht. Sie ermöglicht individuelle, auf die Anforderungszone fokussierte Beleuchtungssituationen und reagiert dynamisch auf den Fahrerzustand. Somit kann sie gezielt dem Fahrer und seinen Mitfahrern bestmögliche Unterstützung und Fahrkomfort liefern.



Bild 1: Das IAV Cloud-Car.

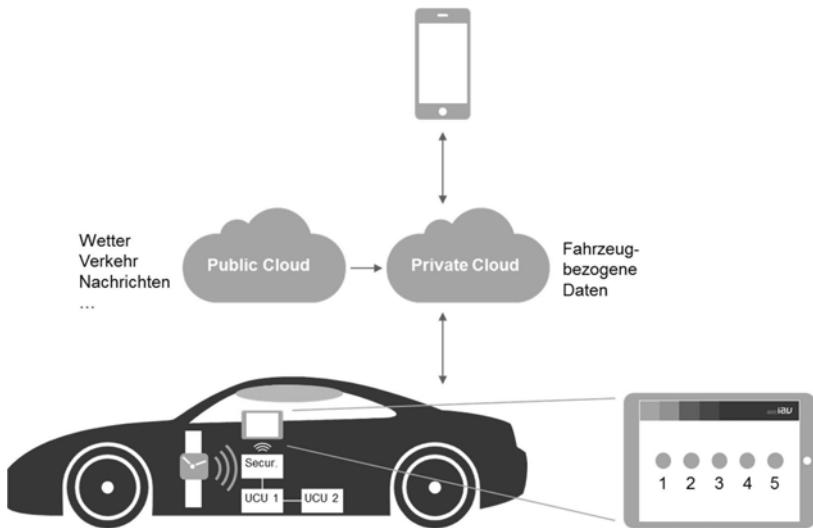


Bild 2: Systemüberblick IAV Cloud-Car

### LED Matrix Panel

- Acht Zonen
- Auflösung Pixelgröße 2 x 2 cm
- RGB
- Sichtbarkeit bestmöglich auf die jeweilige Zone beschränkt
- Vollständiger Rückbau möglich
- Einfach Montage/Demontage

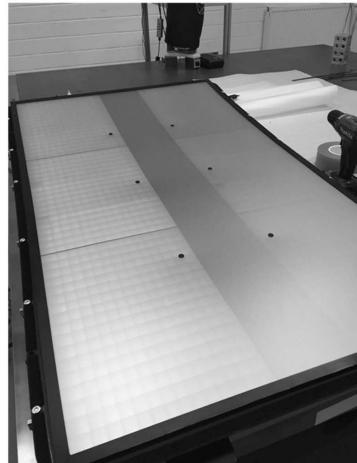
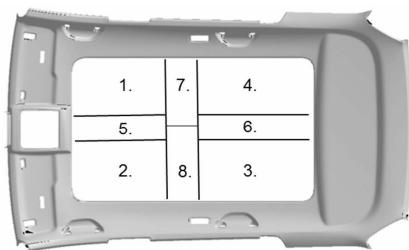


Bild 3: Kontextbasierte Innenraumleuchte

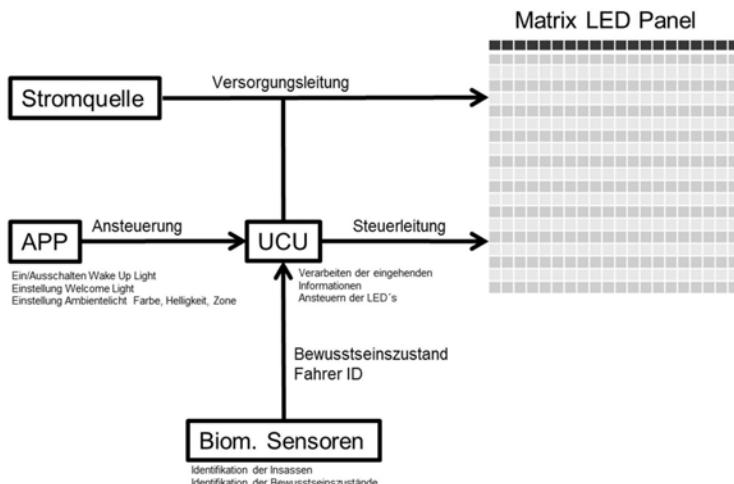


Bild 4: Systemdarstellung der kontextbasierten Innenraumleuchte

- [1] <https://www.hanser-automotive.de/news/uebersicht/artikel/ces-2017--iav-zeigt-cloud-car-2617327.html>, abgerufen am 2.10.2017
- [2] P. Amiraslanow et al., Wahrnehmung und Bewertung innovativer Innenraumbeleuchtung, ATZ 9/2013

## Worauf es im Alter ankommt – „Blendende“ Sichtbedingungen bei Nacht

Dr.-Ing. **B. Kleinert**, Dr.rer.nat. **M. Marutzky**, Dipl.-Ing. **S. Bogdanow**,  
IAV GmbH, Gifhorn

### Kurzfassung

„Licht-Assistenzsysteme“ sind für den Fahrer des 21. Jahrhunderts schon lange kein Fremdwort mehr. Sie gestalten das Fahren angenehmer, unterstützen den Fahrer und tragen darüber hinaus zur Erhöhung der Verkehrssicherheit bei.

Im folgenden Beitrag wird zunächst auf die heutigen Scheinwerfer- und Licht-Assistenzsysteme eingegangen. Anhand von bei IAV durchgeföhrten Studien wird aufgezeigt, welches Blendpotential diese Systeme, insbesondere bei Schlechtwettersituationen, wie einer regennassen Fahrbahn, haben. Dabei wird insbesondere auf das „Alter“ des Fahrers eingegangen, das beim Thema Blendung zu berücksichtigen ist. Heutige Scheinwerfertechnologien können hierbei einen deutlichen Mehrwert bringen, indem sie die Blendung im Straßenverkehr minimieren und den Fahrkomfort gleichzeitig maximieren.

Abschließend wird eine bei IAV entwickelte adaptive Abblendlichtverteilung vorgestellt, die insbesondere bei Schlechtwetterbedingungen die Sichtbedingungen verbessert und somit einen Beitrag zur Verkehrssicherheit leistet

### 1. Einleitung

Gute Sichtbedingungen im nächtlichen Straßenverkehr sind besonders wichtig, um Objekte frühzeitig wahrzunehmen. Mit zunehmendem Alter steigt dieses Bedürfnis. Die Ursache dafür ist die im Alter steigende Blendempfindlichkeit des menschlichen Auges. Der Fahrer 70+ wird bereits durch geringere Lichtmengen geblendet als ein dreißig jähriger Fahrer. Schlechtwetter-Situationen, wie beispielsweise eine regennasse Fahrbahn, erhöhen die Blendung extrem und wirken sich dadurch besonders negativ auf die Sichtbedingungen aus. Hinzu kommt die demografische Entwicklung. 64% der Bevölkerung in Deutschland werden im Jahr 2020 älter als 50 Jahre sein [1]. Aus diesem Grund ist bei der Scheinwerferentwicklung ein besonderes Augenmerk auf das Thema Blendung zu legen. Das Ziel muss sein, bei unterschiedlichen Wettersituationen bestmögliche Sichtbedingungen zu erzielen, ohne dabei andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. So wird es auch von der Gesetzgebung gefordert [2].

## 2. Heutige Scheinwerfertechnologien

Ein wesentlicher Meilenstein in der Entwicklung heutiger Scheinwerfertechnologien war im Jahr 2007 die Verabschiedung der ECE Regelung R123 für Scheinwerfer mit AFS Funktionalität (AFS = Adaptive Front-lighting System) [3]. Zum damaligen Zeitpunkt ermöglichte der Stand der Technik die Realisierung statischer Lichtverteilungen. Durch eine, im Strahlengang des Scheinwerfers befindliche, Walze konnten je nach Umgebungsbedingung statische Lichtverteilungen realisiert werden. Somit konnten spezifische Lichtverteilungen für den Stadt-, Landstraßen- und Autobahnverkehr, sowie Schlechtwettersituationen umgesetzt werden. Ferner war es möglich, die Lichtverteilung zu schwenken und dadurch ein dynamisches Kurvenlicht zu realisieren.

Der nächste Schritt waren ADB-Systeme (Adaptive Driving Beam) mit „blendfreiem“ Fernlicht. Als Weiterentwicklung der AFS-Systeme können sie vorausfahrende oder entgegenkommende Verkehrsteilnehmer sogar „maskieren“. Dabei wird der Bereich der Lichtverteilung, in dem sich die anderen Verkehrsteilnehmer befinden, abgeschaltet.

Mit dem Fortschritt der Technik haben sich auch die Systeme weiterentwickelt. Im Jahr 2013 kam erstmals im Audi A8 ein Scheinwerfersystem auf den Markt, welches die ADB-Funktionalität rein elektronisch realisiert. Das Fernlicht besteht je Scheinwerfer aus einer einzeiligen Matrix mit 25 vertikalen Lichtsegmenten. Als Lichtquelle kommen LED zum Einsatz, weswegen das System als „MATRIX LED-Scheinwerfer“ bezeichnet wird.

Der nächste Meilenstein war im Jahr 2015 die Vorstellung des „MULTIBEAM LED Scheinwerfers“ in der neuen Mercedes-Benz E-Klasse. Dieser Scheinwerfer besitzt 84 Hochleistungs-LED, die auf eine dreizeilige Matrix verteilt sind. Das Ergebnis ist eine höhere Auflösung im Bereich des Fernlichts. Zudem ragt die untere Zeile der Matrix in den Bereich des Abblendlichts. Das eröffnet neue Möglichkeiten bei der Auslegung adaptiver Lichtverteilungen.

Unabhängig von den bisher beschriebenen Serienlösungen werden aktuell weitere Technologien analysiert. Hierbei geht es sowohl um die Entwicklung von neuen Lichtquellen, als auch um die Integration von LCD- und DMD-Systemen, sowie Laser-Scannern in die Scheinwerfer der Zukunft. Das Ziel aller Strategien ist, künftig noch höher aufgelöste Lichtverteilungen zu haben, mit denen neue Lichtfunktionen umsetzen werden können. An dieser Stelle sei beispielweise das geförderte Forschungsprojekt „μ-AFS“ erwähnt, bei dem eine Lichtquelle entwickelt wurde, die auf einer quadratischen Fläche von nur 16mm<sup>2</sup> eine LED-Matrix mit 1024 Pixeln besitzt [4].

### 3. Blendpotential heutiger Scheinwerfersysteme

Um eine Zulassung für den Straßenverkehr zu erhalten, müssen Scheinwerfer die Gesetzmäßigkeiten der ECE (Economic Commission for Europe) erfüllen. Die Blendung wird dabei im Wesentlichen anhand des Messpunktes B50L bewertet. Für diesen Punkt ist als Grenzwert eine maximal zulässige Lichtstärke von 350cd<sup>1</sup> festgelegt. Die Abnahme der Scheinwerfer erfolgt unter Laborbedingungen. Umwelteinflüsse, wie beispielsweise eine regennasse Fahrbahn, werden daher nicht berücksichtigt. Aus der Literatur ist allerdings bekannt, dass eine regennasse Fahrbahn zu einer deutlichen Erhöhung der Blendbeleuchtungsstärke führt. Welchen Einfluss heute serienmäßig verbaute Scheinwerfertechnologien haben, wurde noch nicht eingehend untersucht. Aus diesem Grund wurden bei IAV Studien durchgeführt, die analysieren, welche physiologische und psychologische Blendung trotz ECE Zulassung durch verschiedene Scheinwerfersysteme ein und desselben Fahrzeuges bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen (trockene und nasse Fahrbahn) resultieren [5]. Teilergebnisse dieser Untersuchungen werden im Folgenden aufgeführt.

Abbildung 1 zeigt, dass aufgrund einer regennassen Fahrbahn stark erhöhte Blendbeleuchtungsstärken ( $I_x$ ) in einer Begegnungsentfernung von 50m gemessen werden<sup>2</sup>. Zudem variiert die gemessene Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der getesteten Scheinwerfer. Dies ist auf die Interaktion der Lichtverteilung mit der nassen, bzw. spiegelnden Straßenoberfläche zurückzuführen. Eine nasse Fahrbahn führt zu Blendbeleuchtungsstärken von bis zu 3,6lx. Bei dem getesteten Scheinwerfer mit Gasentladungslampe (Xenon) entspricht das einer 18-fachen Erhöhung der Blendbeleuchtungsstärke. Zudem wird in allen Fällen die maximal zulässige Blendbeleuchtungsstärke weit überschritten.

Zusätzlich zu der in Abbildung 1 dargestellten statischen Analyse wurde untersucht, welchen Effekt die Interaktion der Lichtverteilung mit einer nassen, bzw. spiegelnden Straßenoberfläche im Passiervorgang hat.

---

<sup>1</sup> Entspricht einer Blendbeleuchtungsstärke von 0,14lx in 50 Metern.

<sup>2</sup> Die Begegnungsentfernung von 50 Metern wurde zum Vergleich mit dem zulässigen Grenzwert des Messpunktes B50L gewählt. In dieser Entfernung ist mit der stärksten Reduzierung der Leistung aufgrund einer Blendung zu rechnen [6]

Abbildung 2 veranschaulicht, dass aufgrund der systembedingten Lichtverteilungen stark unterschiedliche Blendbeleuchtungsstärken im Passiervorgang resultieren. Insbesondere in kurzen Begegnungsdistanzen werden entgegenkommende Verkehrsteilnehmer Blend-beleuchtungsstärken ausgesetzt, die in Abhängigkeit des Scheinwerfersystems um das doppelte erhöht sind.

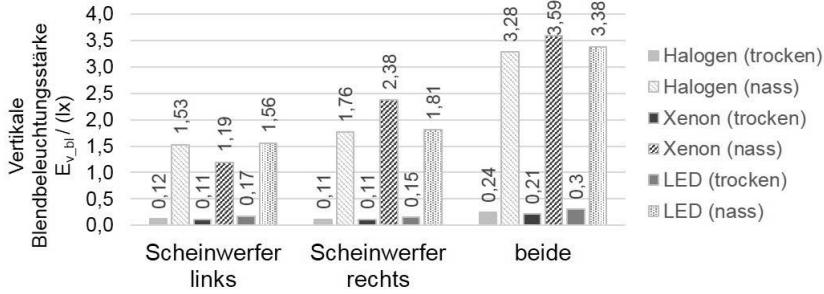


Bild 1: Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit des Blendscheinwerfers und des Fahrbahnzustandes in einer Begegnungsentfernung von 49,3m [5]

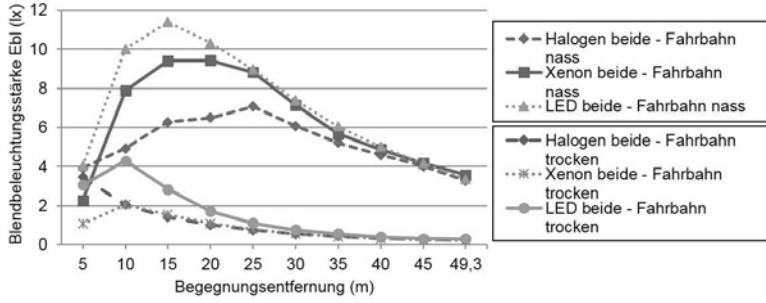


Bild 2: Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung, verursacht durch die Lichtverteilungen beider Scheinwerfer bei unterschiedlichen Fahrbahnzuständen [5]

Beide Abbildungen verdeutlichen den Handlungsbedarf, die Blendung bei Schlechtwetter-situationen gezielt reduzieren zu müssen. Eine dynamische Anpassung des Abblendlichts würde einen wesentlichen Beitrag leisten.

Neben den zuvor genannten Studien wurden im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung weiterführende Simulationen bei IAV durchgeführt. Hochauflösende Scheinwerfersysteme werden künftig die Möglichkeit der visuellen Kommunikation bieten. Dies kann zum Beispiel

die Projektion von Symbolen auf die Straße bedeuten, um Verkehrsteilnehmer auf Gefahren, o.ä. hinzuweisen. Mit Hilfe eines bei IAV entwickelten Simulations-Tools kann analysiert werden, wie gut das Symbol aus bestimmten Perspektiven wahrgenommen wird, bzw. ob es zu einer Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führt. Zudem wird dabei der Zustand der Straßenoberfläche (trocken/nass) berücksichtigt [7].

#### 4. Blendung in Abhängigkeit des Alters

Bisher wurde aufgezeigt, welchen Einfluss der Zustand der Straßenoberfläche und die Lichtverteilung heutiger Scheinwerfer auf die Blendung haben (siehe Abbildung 1 und 2). Das Alter wurde dabei außer Acht gelassen. Wissenschaftlich ist allerdings bewiesen, dass mit zunehmendem Alter die Sehschärfe sinkt und die Blendempfindlichkeit steigt. Bei einem 70-jährigen ist die relative Blendempfindlichkeit daher doppelt so hoch wie bei einem 35-jährigen [8]. Ursache dafür sind die Trübung des Augenmediums und die Zunahme an Streuzentren. Einfallendes Licht wird dadurch mehrfach gestreut und dem Bild auf der Retina wie eine Art Schleier überlagert, weshalb sie als Schleierleuchtdichte  $L_v$  bezeichnet wird (siehe Gleichung 1). Die Folge ist ein reduzierter Objektkontrast. Gleichung 2 veranschaulicht dies anhand des Einflusses auf den Kontrast nach Weber.

$$L_v = k * \frac{E_{Bl}}{\Theta^2} \quad (1)$$

mit       $k$  ()      Altersfaktor  
 $E_{Bl}$  (lx) Blendbeleuchtungsstärke an der Position des  
                Beobachters  
 $\Theta$  ( $^{\circ}$ )      Blendwinkel

$$C_w = \frac{L_o - L_u}{L_u + L_v} \quad (2)$$

mit       $L_o$  (cd/m $^2$ )      Objektleuchtdichte  
             $L_u$  (cd/m $^2$ )      Umgebungsleuchtdichte  
             $L_v$  (cd/m $^2$ )      Schleierleuchtdichte

Aus diesem Grund ist bei älteren Menschen ein höherer Kontrast erforderlich, um Objekte vergleichbar sicher zu detektieren. Ebenso ist bei älteren Menschen zu berücksichtigen, dass sie aufgrund der erhöhten Readaptationszeit länger benötigen, um sich wieder an die Umgebungsbedingungen zu readaptieren [9].

Wendet man nun Gleichung (1) auf die gemessene Blendbeleuchtungsstärke (siehe Kapitel 3) an, wird der Einfluss des Alters deutlich. Der Altersfaktor kann dabei nach Gleichung 3 ermittelt werden.

$$k = 9,05 \left[ 1 + \left( \frac{\text{Alter}}{66,4} \right)^4 \right] \quad (3)$$

In Tabelle 1 wird theoretisch gegenübergestellt, wie sich das Alter auf die Blendung und die Wahrnehmung von Objekten auswirkt. Beispielhaft wurde die beim linken Halogenscheinwerfer gemessene Blendbeleuchtungsstärke von 1,53lx (siehe Abbildung 1) und ein Blendwinkel von 2,3° gewählt, der einer Begegnungsentfernung von 50 Metern und einem lateralen Versatz (Auge – Scheinwerfer) von zwei Metern entspricht. Zur Ermittlung des Weber-Kontrasts wurde die Umgebungsleuchtdichte zu 0,1cd/m<sup>2</sup> und die Objektleuchtdichte zu 0,3cd/m<sup>2</sup> angenommen.

Tabelle 1: Einfluss des Alters auf den Altersfaktor, die Schleierleuchtdichte und den resultierenden Weberkontrast

Alter des Verkehrsteilnehmers (Jahre)	Altersfaktor k ()	Schleicher-leuchtdichte L <sub>v</sub> (cd/m <sup>2</sup> )	Weber-Kontrast C <sub>w</sub> ()
35	9,75	2,88	0,067
50	11,96	3,46	0,056
70	20,23	5,85	0,034

Die in Tabelle 1 aufgeführten Ergebnisse des theoretischen Vergleichs verdeutlichen, dass eine Verdopplung des Alters zu einer Halbierung des Kontrasts führt. Zusätzlich würde der geblendete Verkehrsteilnehmer längere Zeit benötigen, um sich wieder an die Umgebungsbedingungen anzupassen.

## 5. Mehrwert künftiger Scheinwerfersysteme

Künftige Scheinwerfersysteme besitzen das Potential einen deutlichen Beitrag zur Verkehrssicherheit zu leisten. Mit mehr als 2 Millionen Pixeln werden sie eine präzise Anpassung der Lichtverteilung ermöglichen [10]. Neben der Ausmaskierung anderer Verkehrsteilnehmer wird u.a. die Projektion von Symbolen gegeben sein. Des Weiteren können sie zur Reduzierung der Blendung beitragen und dadurch, insbesondere bei Schlechtwetterbedingungen, die Verkehrssicherheit erhöhen. Wie eine solche Anpassung zur Reduzierung der Blendung aussieht kann, wird im folgenden Kapitel gezeigt.

## 6. Adaptives blendfreies Abblendlicht

Aus den bei IAV durchgeföhrten Studien resultieren Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht (APB = Adaptive Passing Beam) [5]. Das Abblendlicht minimiert bei regennasser Fahrbahn gezielt die resultierende Blendung im Passivvorgang, ohne den Fahrkomfort merklich zu beeinflussen. Die Auslegung des Abblendlichts ist in Abbildung 3 dargestellt.

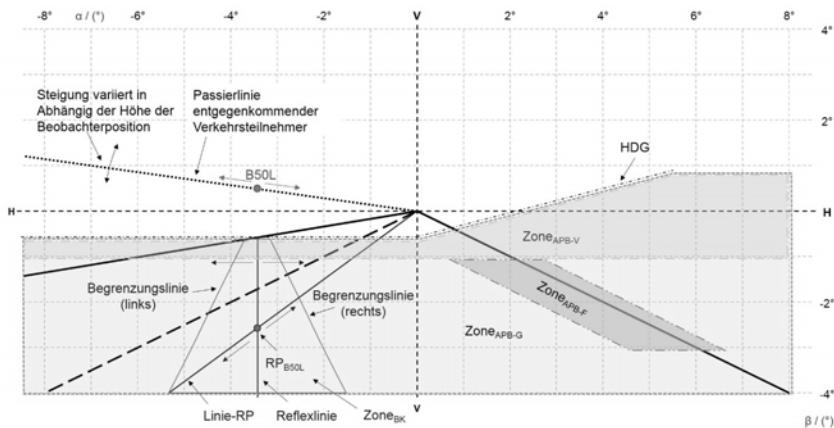


Bild 3: Vorschlag für die Lichtverteilung eines adaptiven blendfreien Abblendlichts für spiegelnde Fahrbahnoberflächen [5]

Die Besonderheiten der Lichtverteilung sind die Zone<sub>APB-V</sub>, die Zone<sub>APB-F</sub> und die Zone<sub>BK</sub>.

Jede der drei Zonen besitzt dabei eine bestimmte Funktion:

Zone<sub>APB-V</sub> Gezielte Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung von Objekten im Straßenraum bei nasser Fahrbahn

Zone<sub>APB-F</sub> Verbesserte Ausleuchtung des Fixationsbereichs bei regenasser Fahrbahn.

Zone<sub>BK</sub> Besonderheit der adaptiven Abblendlichtverteilung. Dient der dynamischen Anpassung der Lichtverteilung im Passivvorgang, um die Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer bestmöglich zu reduzieren. Der Zone ist eine Funktion zugeordnet, die in Abhängigkeit des Blendwinkels  $\Theta$  und des Lichtein- und ausfallwinkels ( $\epsilon_i$ ,  $\epsilon_o$ ) die Beleuchtungsstärke auf der Fahrbahn so anpasst, dass für entgegenkommende Verkehrsteilnehmer ähnliche Bedingungen resultieren, wie bei einer trockenen Fahrbahn. Der Fahrkomfort wird dabei nur geringfügig beeinflusst.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag zeigt, dass eine regennasse Fahrbahn zu einer starken Erhöhung der Blendbeleuchtungsstärke führt. Der gesetzliche Grenzwert wird dabei deutlich überschritten. Zudem variiert die maximale Blendbeleuchtungsstärke aufgrund der scheinwerferspezifischen Lichtverteilung enorm. Folglich kann anhand des festgelegten Blendkriteriums der ECE keine eindeutige Aussage über das tatsächliche Blendpotential eines Scheinwerfers erzielt werden.

Insbesondere mit Blick auf den demographischen Wandel darf der Einfluss des Alters dabei nicht außer Acht gelassen werden.

Durch die gezielte Anpassung der Lichtverteilung an die Umgebungsbedingungen, wie es mit der vorgestellten adaptiven blendfreien Abblendlichtverteilung der Fall wäre, kann eine deutliche Reduzierung der physio- und auch psychologischen Blendung erzielt werden. Heutige Scheinwerfertechnologien bilden eine gute Basis, um die entwickelten Anforderungen der adaptiven blendfreien Abblendlichtverteilung umzusetzen.

„Blendende“ Sichtbedingungen bei Nacht und regennasser Fahrbahn rücken somit in greifbare Nähe. Speziell älteren Verkehrsteilnehmern würde eine solche adaptive Lichtverteilung einen zusätzlichen Mehrwert im Straßenverkehr bieten und darüber hinaus einen wesentlichen Beitrag zur Verkehrssicherheit leisten.

## 8. Literatur

- [1] Westermann, H.; *History and Scientific Back-up*, AFS Eureka Projekt 1403, Informal Document No. 30, 2002
- [2] ECE: *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices*, Regelung R48, Genf, 2013.
- [3] ECE: *Uniform provisions concerning the approval of adaptive front-lighting systems (AFS) for motor vehicles*, Regelung R123, Genf, 2013
- [4] Möllers, I., et. al.; *Ein effizienter hochauflösender ADB-Scheinwerfer auf Basis von mikointegrierten LED-Arrays*, In: Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik, VDI-Berichte 2278, 2016
- [5] Kleinert, B.; *Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht bei spiegelnden Fahrbahnoberflächen*; Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2016
- [6] Lange, H.; *Handbuch für Beleuchtung*, 5. Vollständig neu bearbeitete Auflage (Sonderausgabe), ecomed, Landsberg, 1992
- [7] Bogdanow, S., et al.; *Digital Light: Visual Communication and Perception*, In: *12<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2017
- [8] Schierz, Ch.; *Licht für die ältere Bevölkerung – Physiologische Grundlagen und ihre Konsequenzen*, In: Licht 2008, Tagungsband der 18. Gemeinschaftstagung lichttechnischer Gesellschaften, 2008
- [9] Schieber, F.; *Age and Glare Recovery Time for Low-Contrast Stimuli*, In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 1994
- [10] Gut, C., et al.; *DIGITAL LIGHT – Experiences with the development of high resolution headlights at Daimler*, In: *12<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2017



# Praktikable Fahrermodelle mit psychologisch fundierten Prozessannahmen

**Dr. Peter Mörtl, DI Peter Wimmer, DI Martin Rudigier,**  
Virtual Vehicle, Graz, Österreich

## Kurzfassung

Damit zunehmend intelligenter werdende Fahrrassistenzsysteme selbst adaptive Interventionen initiieren können, werden Modelle mit Prozessannahmen benötigt die den Zustand und das Fahrverhaltens des Fahrers abbilden. Zu diesem Zweck leiten wir aus bestehender Forschung eine einfache, modulare und wiederverwertbare psychologische Modellarchitektur ab mit der wir das Lenkverhalten von 16 Versuchsteilnehmern aus einer Simulationsstudie modellieren. Die Ergebnisse der Simulation zeigen dass ein auf diese Architektur aufgebautes Fahrermodell die Fahrspuren der menschlichen Versuchsteilnehmer besser annähert als ein konventionelles Kontroll-basiertes Modell. Die Architektur erlaubt auch die beobachteten Steuerlenkwinkelumkehrungen ohne Modifizierung gut abzuleiten. Wir beschreiben die Implikationen und nächsten Schritte um die Modellarchitektur für die Entwicklung von adaptiven, intelligenten Systemen nutzbar zu machen.

## Abstract

For increasingly intelligent driving assistance systems to initiate adaptive interventions, models with psychological process assumptions are needed to represent driver state and driving behavior. For this purpose we derive a simple, modular, and reusable psychological model architecture from existing research literature with which we model the steering behavior of 16 study participants in a driving simulator. The results of this modeling approach match the lateral steering of human participants better than a conventional control-based model. The model architecture also matches the observed rate of steering wheel reversals without additional modification. We describe the implications and next steps to make the model architecture usable for the development of adaptive, intelligent systems.

## 1. Einführung

Fahrassistenzsysteme und Automation werden zunehmend intelligenter, um Fahrer mit besseren Fahr- und Situationsspezifischer Funktionalität zu unterstützen. Dafür werden aus Fahrbeobachtungsdaten inter-individuell und situativ angepasste Interventionsmöglichkeiten abgeleitet so wie etwa akzeptable Pausenvorschläge, Bremseinleitungen, oder Sicherheitslenkmanöver. Solche Funktionalität wird generell durch maschinelle Lernalgorithmen ermöglicht, die trainiert sind, bestimmte Verhaltensindikatoren zu erkennen und entsprechend anzubieten. Solche Lernalgorithmen sind mächtig, jedoch für Mensch-Maschinen Interaktionen auch wiederum in folgender Weise limitierend:

1. Der Benutzer kann etwaige algorithmische Fehlklassifikationen üblicherweise nicht vorhersagen oder intuitiv erklären, was zu beeinträchtigenden Überraschungen, Vertrauensverlust, und Nicht-benutzung führen kann (siehe z.B. [1]).
2. Maschinelle Lernprozesse sind zumeist nur durch eine Erweiterung der Lernbeispiele, aber nicht durch deduktive oder induktive Methodik erweiterbar, was die Anwendbarkeit einschränkt.
3. Der maschinelle Lernprozess ist nur durch eine zureichend große Menge und Variabilität von Testdatenpunkten absicherbar. Theoretisch-deduktive Ableitungen sind generell nicht möglich.

Diese Einschränkungen von traditionellen Maschinenlernalgorithmen könnten durch die Hinzufügung eines realen Fahrermodells ergänzt werden, das die dem menschlichen Verhalten zugrundeliegenden Prozess- und Strukturannahmen darstellt. Zum Beispiel könnte die Erfassung von Fahrermüdigkeit dazu verwendet werden, im individualisierten Fahrermodell die damit verbundenen Reaktionszeiterhöhungen abzuleiten und damit die notwendige Interventionsschwellenabsenkung für Lenk-oder Bremsassistenten automatisch einzuleiten. Dies sollte situationsadäquat akzeptablere Funktionalität ermöglichen. Entsprechende Fahrermodelle sollten es auch erlauben, aus validierten Prozessannahmen menschliche Verhaltensvarianten für virtuelle Absicherungsprozesse zu schätzen. Dies würde eine effizientere Absicherung komplexer Automationsfunktionalitäten durch Reduktion der Zahl der notwendigen Testfälle erlauben.

In diesem Beitrag beschreiben wir zu diesem Zweck die Entwicklung und Anwendung einer psychologischen Menschmodellarchitektur, die aus bestehender Forschung abgeleitet und ergänzt wurde. In diese Architektur integrieren wir ein bestehendes Lenkmodell und vergleichen es mit einem herkömmlichen, kontrollbasierten Modell. Wir vergleichen einige der Ei-

genschaften dieser Fahrermodelle mit Fahrdaten aus einem Fahrsimulator und beschreiben dann die Schlussfolgerungen und geplanten nächsten Schritte.

## 2. Modellarchitektur

Es gibt zahlreiche Modellarchitekturen die für Fahrermodellierungen eingesetzt wurden und die Forschungsliteratur von psychologisch / kognitiven Modellierungen ist entsprechend umfangreich, siehe z.B. [2]–[10]. Die Vielzahl der Ansätze spiegelt die Vielzahl der Zielsetzungen und Hintergründe der Modellentwickler wider. Um ein Fahrermodell mit Maschinenlernprozessen integrieren zu können, brauchen wir eine wiederverwertbare, robuste, einfache und auch universell einsetzbare Architektur, die psychologische Prozesse zumindest auf höherer Ebene valide darzustellen imstande ist. Während viele der bestehenden Modelle einige, aber nicht alle dieser Anforderungen erfüllen, glauben wir, dass ein Ansatz bei [11] dem am nächsten kommt. Der *Model Human Processor (MHP)* wurde für eine ähnlich Zielsetzung, aber in einem anderen Anwendungsbereich entwickelt, nämlich für das Design von Mensch – Computer Interaktion. Die grundsätzliche Struktur des MHP ist ähnlich den meisten verwandten kognitiven Modellen und besteht aus einem perzeptuellen, einem kognitiven, und einem motorischen Prozessor. Der kognitive Prozessor inkludiert die Annahmen von kognitiver Psychologie, also z.B. die Beschränkungen von Kurzzeitgedächtnis, Langzeitgedächtnis und verschiedenen Wissensrepräsentationen. Bild 1 gibt einen Überblick über die Architektur die wir als Grazer Model Human Prozessor (GMHP) bezeichnen.

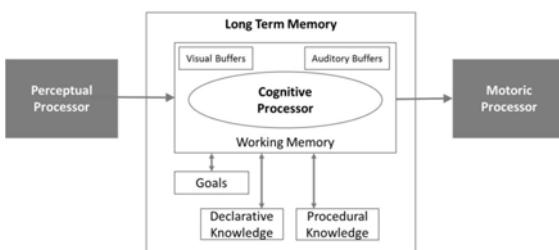


Bild 1: Grazer Model Human Prozessor (GMHP)

Der kognitive Prozessor erhält dabei Information vom Wahrnehmungsprozessor über die externe Welt und exekutiert motorische Prozesse. Informationsverarbeitung findet im kognitiven Prozessor statt. Jeder Prozess dauert eine bestimmte Zeitspanne und kann entweder parallel oder seriell abgearbeitet werden. Informationspuffer speichern Informationen zwischen perzeptiven Prozessen. Die GMHP Architektur erlaubt es sodann, ein fundamentales

Fahrermodell zu formulieren in dem wir die für das Fahren notwendigen psychologischen Prozesse mit den einzelnen Komponenten ausführen.

### Prozessstruktur des Fahrermodells

Bild 2 zeigt die Prozessstruktur des in die GMHP Architektur eingebauten Fahrermodells. Grau angezeigt sind Prozesse, die zwar grundsätzlich vorgesehen wurden, aber in dem hier beschriebenen Modell noch nicht ausgeführt werden. Externe Informationen über die Straße (in schwarz) werden durch einen geplanten Wahrnehmungsprozess („Planned Perception“ in grün) in den Gedächtnispuffer überführt.

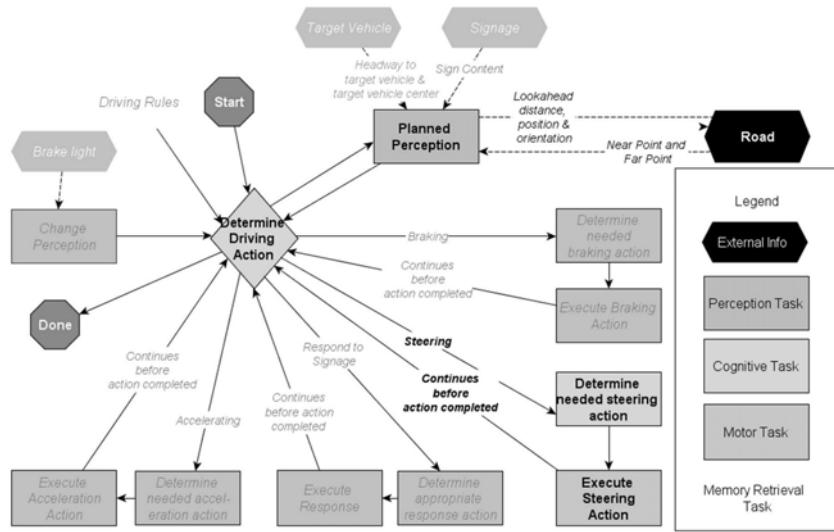


Bild 2: Prozessstruktur des Fahrermodells

Dieser Wahrnehmungsprozess ist Teil eines Routineprozesses, während sich Wahrnehmungsprozesse, die sich aus einer Veränderung der Umwelt ergeben, wie zum Beispiel als Reaktion auf das Aufleuchten von Bremslichtern eines vorausfahrenden Autos als ein separater Prozess von außen initiiert werden würde („Change Perception“ in grau). Während sowohl serielle als auch parallele Prozesseexecutionen möglich sind, verwenden wir in dem hier beschriebenen Modell nur serielle Exekutionen die von einem zentralen Planungsprozess ausgelöst werden („Determine Driving Action“ in orange). Der Planungsprozess kann von verschiedenen Informationen aus dem Langzeitgedächtnis informiert werden („Driving Rules“ auf weißem Hintergrund) besteht in diesem Modell aber einfach aus einer nicht-variiierenden

Liste von drei Prozessen: Wahrnehmung, Kognition und die motorische Ausführung. Nachdem die Steuerinformationen in den Wahrnehmungspuffer gefüllt wurden, ruft der Planungsprozess den Steuerprozess auf („Determine Needed Steering Action“ in orange). Dieser wiederum gibt die Steuerwinkelinformation an den nachfolgenden motorischen Prozess („Execute Steering Action“ in blau) weiter, der dann die Steuerexekution ausführt. Der gleiche Prozesszyklus startet dann wieder von vorne.

### Lenkmodell von Salvucci

Für den Prozess „Determine Steering Action“ in Bild 2 wurde das Lenkmodell von [12], [13] herangezogen. Dieses Modell berechnet die aktuelle Lenkradwinkeländerung auf Basis zweier Größen:

1. Sichtwinkel des Fahrers zu einem Nahpunkt. Der Nahpunkt liegt immer in der Mitte der Fahrbahn im Abstand von 10 Metern vor dem Fahrer.
2. Sichtwinkel des Fahrers zu einem Fernpunkt. Der Fernpunkt ist in einer Kurve der Tangentenpunkt der kurveninneren Fahrbahnbegrenzung, der Fluchtpunkt bei gerader Fahrbahn oder, falls vorhanden, ein vorausfahrendes Fahrzeug.

Das Lenkmodell basiert damit auf der Information, wohin Fahrer während der Fahrt schauen. Bild 3 zeigt ein Beispiel. Darin ist der abstrahierte Blick auf die Fahrbahn aus Fahrersicht zusehen. Zu sehen sind die beiden Ränder der Fahrbahn sowie Nahpunkt (Kreis-Markierung) und Fernpunkt (+ - Markierung).

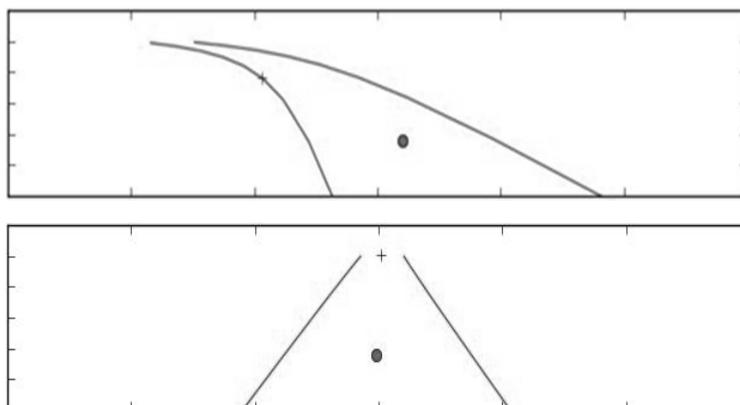


Bild 3: Beispiele für Nah- und Fernpunkt (+...Fernpunkt, o...Nahpunkt)

Das in [13] vorgeschlagene Regelgesetz lautet:

$$\frac{d\phi}{dt} = k_f \frac{d\theta_f}{dt} + k_n \frac{d\theta_n}{dt} + k_i \theta_n$$

mit  $\phi$  als Lenkradwinkel,  $\theta_n$  als Sichtwinkel zum Nahpunkt und  $\theta_f$  als Sichtwinkel zum Fernpunkt. Werte für die Faktoren  $k_f$ ,  $k_n$  und  $k_i$  werden in [12] angegeben, diese haben sich aber für die aktuelle Umsetzung als nicht anwendbar erwiesen, da damit das Lenkverhalten nicht stabil ist. Die Faktoren wurden daher mithilfe eines Design-of-Experiment Verfahrens so modifiziert, dass sich für die gewählten Strecken und die vorgegebene Aufgabe (Fahren in Fahrbahnmitte) ein stabiles Verhalten ergibt. Die verwendeten Werte sind  $k_f = 6$   $k_n = 1$  und  $k_i = 0.5$ .

### Kontrollbasiertes Lenkmodell

Um die Eigenschaften eines psychologischen Fahrermodells gegenüber einem herkömmlichen kontrollbasierten Lenkmodell zu verstehen, verwenden wir als Vergleich ein bestehendes, modulares kontrollbasiertes Lenkmodell das für unterschiedliche Aufgabenstellungen entwickelt wurde [14]. Mit diesem Modell können entweder Positions vorgaben, Krümmungsvorgaben oder Querbeschleunigungsvorgaben nachgefahren werden. In der vorliegenden Arbeit wurde die Positions vorgabe verwendet.

Die Positions vorgabe besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen, die in Form eines Kaskadenreglers strukturiert sind. Im inneren Kreis der Kaskade wird die Krümmung geregelt und ein Lenkwinkel als Stellgröße ausgegeben. Den äußeren Kreis bildet das Modul für die Positionsregelung.

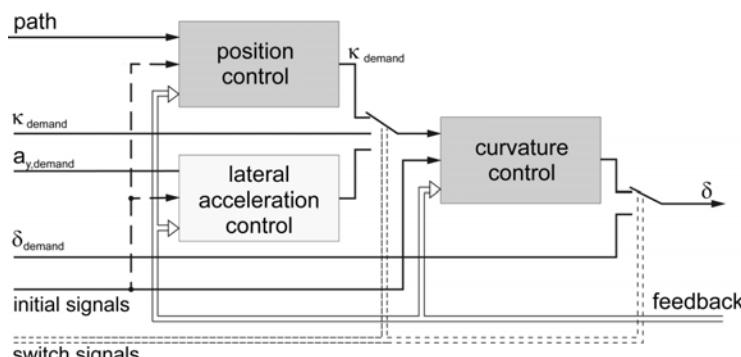


Bild 4: Struktur des kontrollbasierten Reglers

Die Positionsregelung folgt einer Trajektorie in der x,y-Ebene. Dabei versucht sie nicht den aktuellen Abstand zur Trajektorie  $s_2$  zu minimieren, sondern versucht auf einem Kreis einen eine Vorschau distanz vorausliegenden Punkt  $x_{pre}$  zu erreichen. Die Vorschau distanz  $s_{pre}$  wurde Geschwindigkeitsabhängig gewählt. Zusätzlich wird sie mit dem Abstand zur Trajektorie vergrößert.

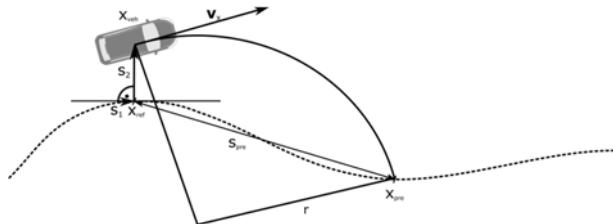


Bild 5: Positionsregelung des kontrollbasierten Reglers

Ein wichtiger Teil ist die Bestimmung der aktuellen Fahrzeugposition in Relation zur Strecke. Dazu wird zu jedem Zeitpunkt ein Referenzpunkt  $x_{ref}$  auf der Trajektorie bestimmt, der so definiert ist, dass die Normale auf die Trajektorie durch die aktuelle Fahrzeugposition  $x_{veh}$  geht. Mit dem Referenzpunkt und der Vorschau distanz wird der sogenannte Vorschaupunkt  $x_{pre}$  bestimmt. Die Idee ist nun, auf einem Kreis von der aktuellen Fahrzeugposition zum Vorschaupunkt zu fahren. Als dritte bestimmende Größe für den Kreis wird die Ausrichtung des Fahrzeugs verwendet. Die Krümmung des Kreises ist der Ausgang dieses äußeren Reglermoduls der Kaskade und wird als Eingang für die inneren Kreise der Kaskade verwendet. Der innere Kreis der Kaskade, Krümmungsreglung, ist ein einfacher Regler bestehend aus einer Vorsteuerung (Ackermannlenkwinkel [15] und einer kompensatorischen Regelung (Proportional-Integral Regler).

### Implementierung

Beide Modelle, also das menschliche Fahrermodell und das Kontrollmodell wurden in Python bzw. Matlab programmiert und mit der Simulationsintegrationssoftware Modell-Connect mit der Fahrzeugs- und Umgebungssimulationssoftware Carmaker in ein gesamtheitliches Modell integriert. Darauf basierend wurden dann die Simulationsergebnisse generiert, die im nächsten Schritt mit denen der menschlichen Versuchsteilnehmer verglichen werden.

### 3. Datensammlung

Fahrdaten wurden in einem statischen Fahrsimulator gesammelt. Nach einem ersten Aufwärmszenario fuhren die 16 Teilnehmer auf einer 10 km lange Straße mit zwei je 4 m breiten Fahrstreifen. Das simulierte Auto fuhr mit einer konstanten Geschwindigkeit von 90 km/h, um eine kontrollierte Umgebung für die Lenkmodellierung zu erlauben. Die Versuchsteilnehmer waren zwischen 20 und 60 Jahre alt, 12 waren männlich und 4 weiblich. Alle Versuchsteilnehmer hatten einen Führerschein und fuhren zwischen 5.000 und 20.000 km pro Jahr.

### 4. Ergebnisse

Bild 6 zeigt die lateralen Fahrspuren der Versuchsteilnehmer und der verschiedenen Fahrermodelle über die gesamte Strecke. Die zwei blauen punktierten Linien stellen den menschlichen Fahrkorridor von 5% bis 95 % der Fahrspuren der 16 Versuchsteilnehmer dar. Positive Zahlen entsprechen einer Abweichung von der Fahrstreifenmittellinie nach links. Die solide rote Linie zeigt die Fahrspur des psychologischen Modells mit einer Prozessdauerannahme von 50 Millisekunden (ms). Mit [11] nehmen auch wir an, dass 50 ms eine realistische Prozessdauerannahme darstellt, die zwar überschritten, aber wahrscheinlich nicht wesentlich unterschritten werden kann. Die schwarze gestrichelte Linie zeigt das kontrollbasierte Lenkmodell.

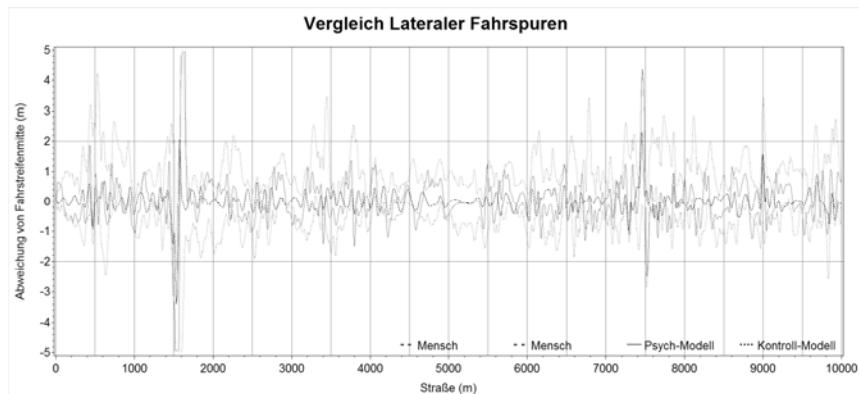


Bild 6: Vergleich der Fahrspuren zwischen Mensch und Modelfahrern über gesamte Strecke

Zwar liegen die Fahrspuren der beiden Modelle zumeist innerhalb des menschlichen Fahrkorridors, treten aber manchmal aus diesem heraus. Besonders das psychologische Modell

weist größere Abweichungen auf, wie sich besonders in Bild 7 zeigt, wo die Fahrspuren einer Rechts-Links-Rechts Kurvenkombination dargestellt sind, bei der alle Fahrer die Fahrstreifenbreite (indiziert mit -2 bis +2) überschritten.

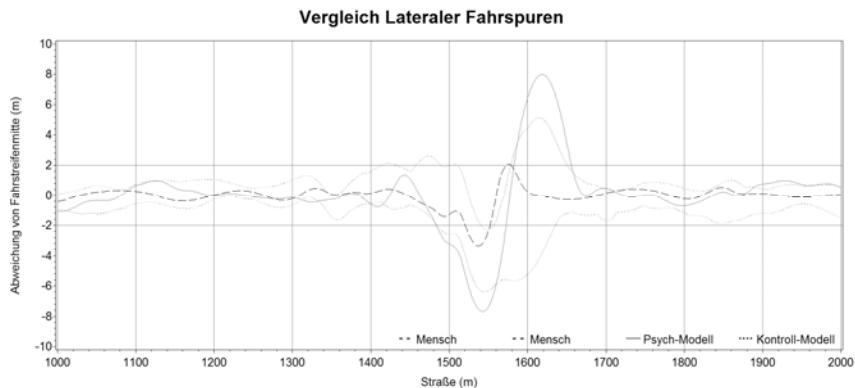


Bild 7: Vergleich der Fahrspuren zwischen Mensch und Modelfahrern, Detail

Tabelle 1 vergleicht numerisch die lateralen Fahrspuren der menschlichen Fahrer mit denen der Modelle. Die durchschnittliche Korrelation der lateralen Fahrspuren der menschlichen Fahrer betrug  $r = 0,5$  (alle gezeigten Korrelationen sind hoch signifikant,  $p < 0,01$ ). Das psychologische Steuermodell korreliert je nach Prozessdauerannahmen von 1 ms bis 50 ms für die drei modellierten Prozesse zusammen  $r = 0,36$  und  $0,42$ . Deutlich niedriger ist die Korrelation des kontrollbasierten Lenkmodells mit  $r = 0,12$ . Dies zeigt, dass das menschliche Lenkmodell den Menschlichen Fahrspuren deutlich näher kam als das Kontrollmodell.

Die laterale Fahrspur des Kontrollmodells lag zu 87,4% innerhalb des menschlichen Fahrkorridors, was beim psychologischen Modell nur mit den schnellsten Prozessdauerannahmen angenähert werden konnte: etwa 80 % des psychologischen Fahrermodells mit Prozessdauerannahmen von 1 bis 50 ms lagen innerhalb des menschlichen Fahrkorridors. Die maximale laterale Fahrspur des psychologischen Modells war zumeist deutlich außerhalb der maximalen menschlichen Fahrspur während die maximale Abweichung des Kontrollmodells mit 5,4 m deutlich unter der maximalen Abweichung der menschlichen Fahrer lag. Das Kontrollmodell steuerte also „sanfter“ als die menschlichen Fahrer was wohl auch von der kontinuierlich laufenden Kontrollsteuerung verursacht wird während sowohl Menschen als auch das psychologische Modell in diskreten Intervallen Steuerimpulse geben. Das psychologische Modell

lenkt extremer als der Versuchsteilnehmer, wahrscheinlich weil menschliche Fahrer zusätzliche Informationen benutzen. Zum Beispiel könnten die menschlichen Fahrer ihre Vorausschau als Funktion des Kurvenhinein- vs. Herausfahrens verändern.

Tabelle 1: Numerischer Vergleich der Fahrmetriken zwischen Versuchsteilnehmern und Modellen

	Mittlere Korrelation ( $r$ ) der lateralen Abweichung mit menschlichen Fahrern	Innerhalb Menschlichen Fahrkorridors	Maximale laterale Abweichung (% geringer als Menschen)	Anzahl Steuerwinkelumkehrungen	Summe der Steuerwinkeländerungen
<b>Menschliche Fahrer</b>	0.5	-	8.4 m	Mean=521 (std=115)	88 (std=22)
<b>Psych. Modell mit 1 ms Prozessdauer</b>	0.42	80.2%	7.1 m (44%)	5036	98
<b>Psych. Modell mit 25 ms Prozessdauer</b>	0.42	80.9%	7.4 m (32%)	2333	110
<b>Psych. Modell mit 50 ms Prozessdauer</b>	0.36	79.4%	9.7 m (0 %)	473	166
<b>Psych. Modell mit 70 ms Prozessdauer</b>	0.20	56.7%	12.6 m (0 %)	344	422
<b>Psych. Modell mit 75 ms Prozessdauer</b>	0.19	50.1%	16.4 m (0 %)	338	469
<b>Kontroll Modell</b>	0.12	87.4%	5.4 m (88%)	1664	102

Die Anzahl der Steuerwinkelumkehrungen ist ein Indikator für die Ausführung des Lenkens. Es zeigt sich, dass das psychologische Modell bei unrealistisch geringen Prozesszeiten (d.h. 1 oder 25 ms) die menschlichen Steuerwinkelumkehrungen ebenso überschätzt wie das Kontrollmodell. Erst bei einer realistischeren Annahme der Zykluszeiten ab 50 ms nähern sich die Anzahl der vom Modell produzierten Steuerwinkelumkehrungen denen der Menschen an. Ein anderer Indikator für das Lenken ist die Summe der Steuerwinkelveränderungen. Diese werden von allen Modellen überschätzt, nur das Kontrollmodell und das Psychologische Modell bei unrealistisch kurzen Zykluszeiten nähert sich den menschlichen Steuerwinkelveränderungen an. Dies indiziert dass Menschen tatsächlich weniger weit aussteuern als die Modelle erwarten ließen.

Die Steuerwinkelumkehrungen erscheinen relativ konstant über den Verlauf der Fahrzeit. Bild 8 zeigt eine relativ konstante Steuerwinkelumkehrrate von ungefähr 75 pro Fahrminute, ohne zusätzliche Modellanpassungen ist die Steuerwinkelumkehrrate des psychologischen Modells (Prozessdauer: 50 ms) innerhalb einer Standardabweichung der menschlichen, siehe Bild 8.

### Lenkwinkelumkehrungen Mensch und Psych. Modell

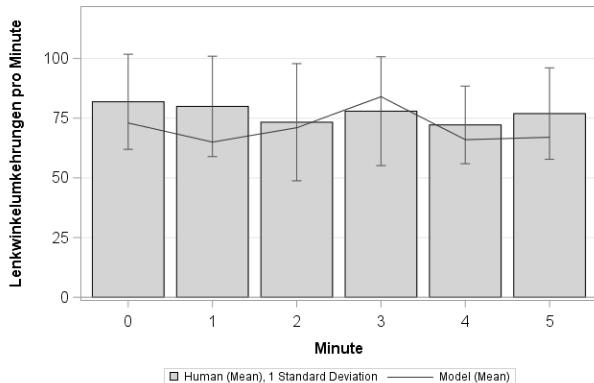


Bild 8: Vergleich der Lenkwinkelumkehrungen zwischen Mensch und psychologischem Modell

Da die Metrik der Steuerwinkelumkehrungen vom psychologischen Modell recht gut nachgebildet wird, ist es interessant, diese weiter zu untersuchen. Trotz der kleinen Stichprobe sind die Verteilungen der beiden Metriken vermutlich unterschiedlich. Die Verteilung der Steuerwinkelumkehrungen ist relativ balanciert (Mittelwert = 521, Schräglheit = 0,5) aber die Verteilung der Steuerwinkelsumme scheint positiv schräg (Mittelwert = 88, Schräglheit = 1,4) siehe Bild 9.

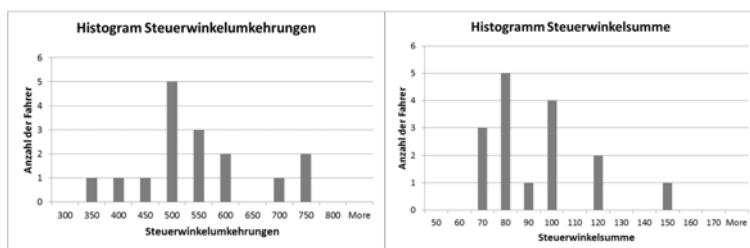


Bild 9: Verteilungen Steuerwinkelumkehrungen und Steuerwinkelsumme

Die Korrelation zwischen den Metriken Steuerwinkelumkehrungen und Steuerwinkelsumme ist gering:  $r = 0,15$ ;  $p > 0,1$ , indiziert also lineare Unabhängigkeit. Die Steuerwinkelumkeh-

rungen sind relativ konstant per Versuchsteilnehmer: wenn die Steuerwinkelumkehrungen jeder Versuchsperson auf vier gleich großen Streckenabschnitten gezählt werden, dann korrelieren die Ränge der Versuchspersonen auf dieser Metrik alle signifikant r zwischen  $r = 0,5$  bis  $r = 0,82$ ;  $p < 0,05$ ). Das heißt die Versuchsteilnehmer haben relativ konstante Steuerwinkelumkehrungen auf allen Segmenten und unterschieden sich von den anderen Versuchspersonen, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Korrelationen der geordneten Ränge der Steuerwinkelumkehrungen zwischen Straßensegmenten

	S1	S2	S3	S4
S1		0,82*	0,78*	0,71*
S2			0,79*	0,72*
S3				0,5**
S4				

\* $p < 0,01$ ; \*\*  $p < 0,05$

## 5. Schlußfolgerungen

In diesem Beitrag präsentierten wir eine einfache und wiederverwendbare kognitive Modellarchitektur für Fahren als auch eine erste Validierung mit Fahrsimulationsdaten. Wir bestätigen, dass wir mit dieser Architektur recht einfach ein bestehendes psychologisches Lenkmodell einbauen können und damit die Fahrspuren von menschlichen Fahrern besser annähern können als mit einem vergleichbaren, aber nicht psychologisch motivierten Kontrollmodell. Darüber hinaus konnten wir feststellen dass die Lenkwinkelumkehrungen des Modells dem Verhalten menschlicher Fahrer stark ähnelten ohne weitere Anpassungen vornehmen zu müssen.

Dies dokumentiert einen Vorteil, psychologische Prinzipien und Prozessstrukturen in der Modellierungsarchitektur zu berücksichtigen: während traditionelle Maschinenlernarchitekturen neues Verhalten durch zusätzliche Lernzyklen „erlernen“ müssen, kann sich mit adequat formulierten Prozessmodellen solches Verhalten quasi „von selbst“ ergeben. Dies eröffnet prinzipiell Erklärbarkeit und Generalisierbarkeit, die sich aus traditionellen Maschinenlernmodellen nicht ergeben, aber für die Mensch-Computer Interaktionen der Zukunft von höchstem Interesse sind.

Während die präsentierten Resultate unseren Ansatz im Wesentlichen zu bestätigen scheinen, sind sie noch nicht hinreichend um die Einbindung von psychologischen Modellen in Fahrzeugautomation und Absicherungssimulationen Realität werden zu lassen. Zunächst werden wir die präsentierten Resultate mit Felddaten bestätigen. Zweitens werden wir die im

Modell bereits vorgesehenen longitudinalen Steuerprozesse (dh. Abstandverhalten, Geschwindigkeits-, und Beschleunigungswahl) ergänzen. Drittens werden wir inter-individuelle Unterschiede durch Parametrierungen darstellen, um diese dann für automatisierte Interventionsableitung anzuwenden.

## Referenzen

- [1] M. R. Endsley, "From Here to Autonomy: Lessons Learned From Human–Automation Research," *Hum. Factors*, p. 0018720816681350, 2016.
- [2] J. R. Anderson, D. Bothell, M. D. Byrne, S. Douglass, C. Lebiere, and Y. Qin, "An Integrated Theory of the Mind," *Psychol. Rev.*, vol. 111, no. 4, pp. 1036–1060, 2004.
- [3] T. Bellet, P. Mayenobe, J.-C. Bornard, D. Gruyer, and B. Claverie, "A computational model of the car driver interfaced with a simulation platform for future Virtual Human Centred Design applications: COSMO-SIVIC," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 25, no. 7, pp. 1488–1504, Oct. 2012.
- [4] H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, and M. Vollrath, *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [5] B. Deml, H. Neumann, A. Müller, and H. J. Wünsche, "Fahrermodellierung im Kontext kognitiver Automobile Driver Modelling within the Context of Cognitive Automobiles," - *Autom.*, vol. 56, no. 11, Jan. 2008.
- [6] D. E. Kieras and D. E. Meyer, "An overview of the EPIC architecture for cognition and performance with application to human-computer interaction," *Hum.-Comput. Interact.*, vol. 12, no. 4, pp. 391–438, 1997.
- [7] J. Laird, A. Newell, and P. Rosenbloom, "SOAR: An Architecture for General Intelligence," Carnegie Mellon University, AJP-9, 1987.
- [8] S. Lewandowsky and S. Farrell, *Computational modeling in cognition: principles and practice*. Los Angeles: Sage, 2011.
- [9] Y. Liu, R. Feyen, and O. Tsimhoni, "Queueing Network-Model Human Processor (QN-MHP): A computational architecture for multitask performance in human-machine systems," *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact. TOCHI*, vol. 13, no. 1, pp. 37–70, 2006.
- [10] D. D. Salvucci, "Modeling driver behavior in a cognitive architecture," *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, vol. 48, no. 2, pp. 362–380, 2006.
- [11] S. K. Card, T. P. Moran, and A. Newell, "The Model Human Processor: An Engineering Model of Human Performance," UIR-R-1986-05, 1986.
- [12] D. D. Salvucci, "Modeling driver behavior in a cognitive architecture," *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, vol. 48, no. 2, pp. 362–380, 2006.

- [13] D. D. Salvucci and R. Gray, "A Two-Point Visual Control Model of Steering," *Perception*, vol. 33, no. 10, pp. 1233–1248, Oct. 2004.
- [14] M. Rudigier and M. Horn, "Concepts for modeling drivers of vehicles using control theory," in *Data and Mobility*, Springer, 2010, pp. 27–38.
- [15] G. Rill, *Road Vehicle Dynamics, Fundamentals and Modelling*. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2012.

# Erfassung und Bewertung des Informationsbedarfs von Lkw-Fahrern während hochautomatisierter Fahrt

**Natalie Richardson, M.Sc., Dr.- Ing. Frank Diermeyer,**  
Technische Universität München;  
**Dr. Britta Michel, Andreas Zimmermann,**  
MAN Truck & Bus AG, München

## Kurzfassung

Die Einführung automatisierter Systeme verändert die Fahraufgabe des Fahrers. So muss der Fahrer während hochautomatisierter Fahrphasen das System nicht mehr permanent überwachen und es ergibt sich die Möglichkeit zur Ausführung fahrfreiem Tätigkeiten. Aktuell wird ein hochautomatisiertes System (Automatisierungsstufe 3, BaSt) nicht in der Lage sein, alle vorkommenden Verkehrssituationen handhaben zu können. Der Fahrer ist in der Verantwortung, die Fahrzeugführung nach Aufforderung des Systems in einem gewissen Zeitraum wieder zu übernehmen. Dieser Beitrag beschreibt einen dreistufigen Prozess zur Erfassung sowie Bewertung des Informationsbedarfs von Lkw-Fahrern während hochautomatisierter Fahrt auf der Autobahn. In einem ersten Schritt werden in einem Expertenworkshop relevante Lkw Autobahnszenarien erfasst. In einem zweiten Schritt werden in einer Fokusgruppe mit Lkw-Fahrern szenarioorientiert Informationen erhoben. Die Ergebnisse bilden die Ausgangsbasis für einen darauffolgenden Simulatorversuch. 22 Berufskraftfahrer absolvieren in einem statischen Lkw-Fahrtsimulator eine hochautomatisierte Fahrt auf der Autobahn und durchfahren sechs typische Autobahnzenarien (bspw. Baustelle). Hierbei werden sowohl für die Automation handhabbare als auch Übernahmeszenarien dargeboten. Im Anschluss an die Fahrt erfolgt die Bewertung der in der Fokusgruppe sowie Literatur gesammelten Informationseinheiten hinsichtlich ihrer Notwendigkeit. Um einen möglichen Einfluss des Alters auf den Informationsbedarf erfassen zu können, werden sowohl jüngere als auch ältere Fahrer rekrutiert. Um weitere Rückschlüsse auf den individuellen Informationsbedarf ziehen zu können, wird zusätzlich die Technikbereitschaft der Probanden erfasst. Die qualitativ, explorative Auswertung der Ergebnisse gibt Hinweise darauf, welche Informationen für Lkw-Fahrer während hochautomatisierter Fahrphasen auf Autobahnen von Bedeutung sind. So sollten Informationen aus den Kategorien Umwelt, Systemstatus sowie geplanten Manövern der Automation berücksichtigt werden. Eine Analyse der Altersgruppen zeigt eine qualitativ erhöhte Technikbereitschaft der älteren Probandengruppe. Hinsichtlich des Informati-

onsbedarfs zeigen sich Tendenzen zu einem erhöhten Informationsbedarf der jüngeren Lkw-Fahrer. Die Bewertung der Informationseinheiten hinsichtlich ihrer Notwendigkeit ergeben keine Unterschiede bezüglich des Alters.

## 1. Einleitung

Die Einführung höher automatisierter Systeme in Form von modernen Fahrerassistenzsystemen verändert die Fahraufgabe des Fahrers. Nach der Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt) werden 5 Stufen der Automatisierung unterschieden, die sich hinsichtlich der jeweiligen Aufgabenverteilung zwischen Fahrer und Fahrzeug unterscheiden [1]. Ein entscheidender Aspekt liegt darin, dass im assistierten (Stufe 1) und teilautomatisierten Modus (Stufe 2) eine permanente Überwachung des Systems seitens des Fahrers nötig ist. Hoch- (Stufe 3) und vollautomatisierte Systeme (Stufe 4) hingegen benötigen keine permanente Überwachung, da das System in der Lage ist Systemgrenzen festzustellen und den Fahrer mit ausreichender Zeitreserve zur Übernahme aufzufordern. Es ergibt sich die Möglichkeit zur Ausführung fahrfremder Tätigkeiten. Aktuell wird ein hochautomatisiertes System nicht in der Lage sein, alle vorkommenden Verkehrssituationen bewältigen zu können. Der Fahrer ist in der Verantwortung, die Fahrzeugführung nach Aufforderung des Systems zu übernehmen, unabhängig davon, in welche Art von fahrfremder Tätigkeit er involviert ist. Um den Fahrer zu einer erfolgreichen Systeminteraktion und einer sicheren Übernahme der Fahrzeugführung zu befähigen, benötigt dieser eine akkurate Einschätzung der aktuellen Situation und des Systems.

In der Literatur finden sich erste Ansätze den Informationsbedarf in verschiedenen Automatisierungsstufen und Situationen im Pkw zu erfassen [2–4]. Hervorzuheben ist die Studie von Beggiato et al. [4], die sich unter anderem mit dem Informationsbedarf während hochautomatisierter Fahrphasen beschäftigt. Beggiato et al. [4] stellen fest, dass die dargebotenen Informationen jederzeit Systemtransparenz, Systemverständlichkeit sowie die Vorhersagbarkeit von zukünftigen Systemaktionen fördern sollen. Informationen, die unabhängig von Szenario oder Automatisierungsgrad immer dargeboten werden sollten, sind:

- 1) aktueller Systemstatus
- 2) Systemsicherheitsinformationen
- 3) Navigation
- 4) vorausliegende, spezielle/ kritische Situationen
- 5) Rückfallebene bei Deaktivierung des Systems
- 6) Angabe der verbleibenden Zeit bis zu einer erforderlichen Übernahme / Wechsel der Automationsstufen

- 7) Gründe für aktuelle und folgende Manöver
- 8) Ankündigung von zukünftig geplanten Manövern

Weiterhin zeigen sich Unterschiede der genannten Informationen in den unterschiedlichen Automatisierungsstufen. So werden während manueller Fahrt fahrrelevante Informationen (bspw. Geschwindigkeit; Abstand zu umgebenden Fahrzeugen) wichtiger bewertet. Im automatisierten Modus rücken Informationen zur Überwachung des Systems in den Vordergrund. Zusätzlich äußern die Experten eine szenariospezifische Komponente der dargestellten Informationen. In Fahrstreifenwechselszenarien werden Informationen über den umgebenden Verkehr (Geschwindigkeit, Distanz zu anderen Fahrzeugen, Lückendetektion) wichtiger eingeschätzt. Im freien Fahren bzw. Fahren mit Geschwindigkeitsbegrenzung rücken Informationen wie die aktuell erlaubte Geschwindigkeit in den Vordergrund. Informationen zu Navigation, Stau und Gründe für Zeitverzögerungen werden in Stauszenarios als wichtig erachtet.

## 2. Fragestellung

Eine vollständige Übertragung der Erkenntnisse aus dem Bereich Pkw auf den Lkw ist nur bedingt möglich. Gründe hierfür liegen im Nutzerkreis. So weist die aktuelle Lkw-Fahrerschaft im Vergleich zu Pkw einen höheren Altersdurchschnitt auf [5, 6], was sich in einem differenzierten Umgang mit Technik äußern könnte. Auch werden Lkw überwiegend berufsbedingt genutzt. Dies zeigt sich in längeren Fahrtzeiten für Lkw-Fahrer im Vergleich zu privaten Pkw Fahrten. Ein weiterer Grund liegt in den unterschiedlichen Voraussetzungen hinsichtlich der Fahrdynamik von Lkw. So ist ein Lkw nur eingeschränkt in der Lage kurzfristige, dynamische Aktionen auszuführen. Geschwindigkeiten sind geringer, Bremswege länger. Vorausschauendem Fahren kommt folglich eine größere Bedeutung zu. Ein weiterer Faktor liegt in der Forderung des kraftstoffeffizienten Fahrens. Ein automatisiertes System im Lkw wird demnach nicht nach Fahrer-Komfort regeln, sondern auf kraftstoffeffizientes Fahren ausgelegt sein. Diese Gründe könnten zu einem differenzierten Informationsbedarf von Lkw-Fahrern während hochautomatisierter Fahrphasen führen.

Mit einem großen Anteil von Lkw im Fernverkehr [7] stellt die Autobahn den Anwendungsfall dar, bei dem der Einsatz von hochautomatisierten Systemen am zielführendsten ist [8]. Der Fokus der nachfolgenden Studien liegt folglich auf der Erfassung und Bewertung des Informationsbedarfs während hochautomatisierter Fahrphasen auf Autobahnen. Für die vorliegende Studie ergeben sich folgende zu untersuchende Forschungsfragen:

- 1) Welchen Informationsbedarf haben Lkw-Fahrer während hochautomatisierter Fahrphasen auf Autobahnen?
- 2) Gibt es Informationen, die szenariospezifisch dargeboten werden sollen?
- 3) Variiert die Notwendigkeit der Informationen?
- 4) Welchen Einfluss hat das Alter auf das Informationsbedürfnis?

### 3. Methode und Ergebnisse

Die Erfassung und Bewertung des Informationsbedarfs erfolgt in einem dreistufigen Prozess: In einem ersten Schritt werden in einem Expertenworkshop relevante Lkw-spezifische Autobahnszenarien identifiziert (3.1). Diese dienen als Grundlage für die darauffolgende Fokusgruppe mit Lkw-Fahrern (3.2), in der erste Informationsbedürfnisse gesammelt werden. In einem dritten Schritt bewerten und erweitern Berufskraftfahrer die Informationen in einem Simulatorversuch (3.3).

#### 3.1 Expertenworkshop zur Identifikation Lkw-spezifischer Autobahnszenarien

##### 3.1.1 Methode

Um relevante Autobahnszenarien zu identifizieren, wird ein Expertenworkshop mit fünf Experten aus den Bereichen Anforderungen Gesamtfahrzeug, Fahrerassistenz und ADAS, autonomes Fahren sowie Ergonomie durchgeführt. In einem ersten Schritt werden typische Autobahnszenarien gesammelt. Weiterhin werden die Fähigkeiten und Grenzen eines hochautomatisierten Systems für Lkw abgeleitet.

Tabelle 1: Ergebnis der Expertenbefragung: Autobahnszenarien, die ein hochautomatisiertes System bewältigen können wird

Szenario	Erläuterung
Freie Fahrt	Fahren ohne Geschwindigkeitsbegrenzung
Geschwindigkeitsbegrenzung	Fahren auf Streckenabschnitten mit Geschwindigkeitsbegrenzung
Überholvorgang	Überholen langsamerer Fahrzeuge auf Ego-Spur
Stau	Geschwindigkeitsreduktion aufgrund hohen Verkehrsaufkommens
Notbremsung	Durchführung einer Notbremsung bspw. durch Auffahren auf ein plötzlich entstandenes Stauende

### 3.1.2 Ergebnisse des Expertenworkshops

Tabelle 1 und 2 geben einen Überblick über die gesammelten Szenarien sowie die Systemgrenzen. Die gefundenen Szenarien werden als Basis für die Fokusgruppendiskussion und für den folgenden Fahrsimulatorversuch genutzt.

Tabelle 2: Ergebnis der Expertenbefragung: Autobahnszenarien, die ein hochautomatisiertes System nicht bewältigen können wird

Szenario	Erläuterung
Fahrbaahrmarkierung	Schlecht sichtbare oder fehlende Fahrbaahrmarkierungen
Auffahrt/ Abfahrt Autobahn	Auffahren / Abfahren von der Autobahn auf einer gekennzeichneten Auf-/Ausfahrt
Baustelle	Reduktion Fahrspuren (drei auf zwei) bedingt durch eine Baustelle
Sensorausfall	Sensorausfall durch Witterung (Nebel/Schnee/Regen)

## 3.2 Fokusgruppe zur Erfassung des Informationsbedarfs aus Nutzersicht

### 3.2.1 Methode

Um einen ersten Einblick in den Informationsbedarf von Lkw-Fahrern während hochautomatisierter Fahrphasen zu gewinnen, wird die qualitative Methode der Fokusgruppe gewählt. Insgesamt nehmen zwei Berufskraftfahrer und ein Langstreckenpilot teil. Alle Teilnehmer sind männlich mit einem Durchschnittsalter von 40.3 Jahren ( $SD= 5.44$ ).

Die Fokusgruppendiskussion dauert 4 Stunden, wird mithilfe von Audio und Video aufgezeichnet und im Anschluss vollständig transkribiert. Das Sammeln der Informationseinheiten erfolgt anhand der neun erörterten Autobahnszenarien (Tabelle 1 und 2). Alle Szenarien werden nacheinander hinsichtlich des Informationsbedarfs diskutiert. Die Teilnehmer werden hierbei aufgefordert sich vorzustellen, das vorliegende Szenario hochautomatisiert zu Durchfahren. Anschließend nennen die Teilnehmer ihren Bedarf an Informationen. Die Aufbereitung der Daten erfolgt mithilfe einer qualitativen Inhaltsanalyse [9] mit dem Ziel, die Informationsbedürfnisse zu analysieren und zu clustern. Zusätzlich zur Erfassung des Informationsbedarfs ordnen die Teilnehmer die verschiedenen Szenarien nach Kritikalität, um weitere Rückschlüsse auf den Informationsbedarf ziehen zu können.

### 3.2.2 Ergebnisse der Fokusgruppe

Die Ergebnisse der Fokusgruppe geben einen ersten Anhaltspunkt, welche Informationen während hochautomatisierter Fahrphasen auf der Autobahn benötigt werden. So stufen die

Probanden Informationen zum Systemstatus (System An/Aus, Rollenverteilung), zur Systemtransparenz (Warum macht das System das? Wie zuverlässig ist das System?) und zur Anzeige aktueller und zukünftiger Manöver als wichtig ein. Weiterhin werden Informationen zur Umwelt (bspw. umgebender Verkehr) sowie Topographie und Navigation genannt.

Die Analyse der Daten zeigt auch eine Verschiebung des Informationsbedürfnisses in Abhängigkeit des auftretenden Szenarios (Übernahmeszenario vs. handhabbares Szenario). So werden bei handhabbaren Szenarien Informationen zur Systembeschreibung wichtiger bewertet, während bei einem Übernahmeszenario Informationen zur zukünftigen manuellen Bewältigung der Fahraufgabe und Umwelt in den Vordergrund rücken.

Die Bewertung der Szenariokritikalität ergibt folgende Rangreihenfolge für die systemseitig handhabbaren Szenarien (1  $\triangleq$  höchste Kritikalität; 5  $\triangleq$  geringste Kritikalität). Die Einschätzung erfolgt hierbei auf Basis des manuellen Fahrens.

1. Notbremsung
2. Stau
3. Überholvorgang
4. Geschwindigkeitsbegrenzung
5. Freie Fahrt

Die Kritikalitätsbewertung der Übernahmeszenarien ergibt folgende Rangreihenfolge (1  $\triangleq$  höchste Kritikalität; 4  $\triangleq$  geringste Kritikalität):

1. Sensorsausfall durch Witterung
2. Baustelle
3. Abfahrt/Auffahrt Autobahn
4. Fehlende Fahrbahnmarkierung

Das vorhandene Zeitbudget und die Anzahl der involvierten Verkehrsteilnehmer werden als relevante Einflüsse auf die Kritikalitätsbewertung genannt.

Eine Fokusgruppendiskussion eignet sich, um einen ersten qualitativen Überblick hinsichtlich der Informationsbedürfnisse von Lkw-Fahrern während hochautomatisierter Fahrphasen zu gewinnen. Kritisch zu betrachten ist die Tatsache, dass das tatsächliche System nicht erlebt wird, sondern die Teilnehmer aufgefordert werden, sich die zugrundeliegende Systemausprägung vorzustellen. Um die Ergebnisse der Fokusgruppendiskussion zu validieren

und den Teilnehmern zu ermöglichen das zugrundeliegende System zu erleben, wird ein Fahrsimulatorversuch durchgeführt.

### **3.3 Fahrsimulatorversuch zur Ergänzung und Bewertung des Informationsbedarfs aus Nutzersicht**

#### **3.3.1 Methode**

Die Studie findet am statischen Lkw- Fahrsimulator der MAN Truck & Bus AG statt (Abb. 1, links). Der Prüfstand verfügt über einen 180° Sichtbereich und wird mit der Simulationssoftware SILAB 4 betrieben.



Bild 1: Links: statischer Lkw-Fahrsimulator; rechts: Wizard -of-Oz Versuchssetting

Das hochautomatisierte System wird mithilfe der Wizard-of-Oz Methode realisiert. Hierbei nimmt der Proband an, mit einem vollfunktionsfähigen System zu interagieren. Tatsächlich wird die Automation durch den Versuchsleiter von außen simuliert (Abb. 1, rechts) [10]. Die Länge der simulierten Strecke beträgt 27 km mit einer Fahrzeit von 22 Minuten. Die Versuchsstrecke beinhaltet sechs verschiedene Autobahnzenarien (Abb. 2). Die Reihenfolge der auftretenden Szenarien wird randomisiert, um Reihenfolgeeffekte zu kontrollieren. Bei dem gewählten Design handelt es sich um ein Within- Subjects Design bei dem jeder Proband alle Szenarien durchfährt. Insgesamt nehmen 22 männliche Lkw- Berufskraftfahrer an dem Versuch teil. Das Durchschnittsalter liegt bei 48.77 Jahren (*Min*: 26 Jahre; *Max*: 72 Jahre; *SD*=12.28) mit einem durchschnittlichen Lkw-Führerscheinbesitz von 26.18 Jahren (*Min*: 7 Jahre; *Max*: 53 Jahre; *SD*=12.30). Um eventuell auftretende Alterseffekte zu analysieren, werden jüngere (bis 55, *N*=14) und ältere (*N*=8) Fahrer rekrutiert. Um weitere Rückschlüsse auf den individuellen Informationsbedarf ziehen zu können, wird zusätzlich die Technikbe-reitschaft der Probanden erhoben. Hierbei handelt es sich um eine standardisierte Kurzskala mit zwölf Aussagen, die auf einer fünfstufigen Likertskala (1 $\triangleq$  stimmt gar nicht; 5 $\triangleq$  stimmt völlig) beantwortet werden [11].



Bild 2: Darstellung der im Versuch realisierten Szenarios, v.l.n.r.: Freie Fahrt, Geschwindigkeitsbegrenzung, Überholvorgang, Stau, Baustelle, Nebel

Die Probanden werden als *Mitwissen* in die Studie eingebunden, so wird der Teilnehmer durch Ansagen des Versuchsleiters auf Auftreten und Ende eines Szenarios hingewiesen. Nach dem Durchfahren des jeweiligen Szenarios wird der Proband während der Simulation aufgefordert, seinen szenariospezifischen Informationsbedarf zu nennen. Im Anschluss an die Versuchsfahrt bewerten die Probanden die gesammelten Informationen aus Literatur und Fokusgruppendiskussion hinsichtlich Notwendigkeit auf einer fünfstufigen Likertskaala (1 ≈ nicht notwendig; 5 ≈ notwendig). Zusätzlich bewerten die Probanden, in welchem Szenario die Information wichtig ist. Der genaue Versuchsablauf kann Abbildung 3 entnommen werden.



Bild 3: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs

### 3.3.2 Ergebnisse des Fahrsimulatorversuchs

Die Ergebnisse der offenen Informationsabfrage nach Durchfahren der Szenarien werden mithilfe des qualitativen Card Sorting Verfahrens [10, 12] geclustert. Es ergeben sich sechs Informationskategorien, die von den Lkw-Fahrern gewünscht werden. Neben Informationen zum aktuellen Systemstatus wird weiterhin eine Erläuterung des Systemverhaltens benötigt. Weitere Informationen beziehen sich auf aktuelle und zukünftig durch das System geplante

Manöver, Information zur Umwelt und Navigation, sowie zu einer eventuell auftretenden Übernahme.

#### *Szenariospezifisches Informationsbedürfnis*

Die szenariospezifische Analyse der Daten zeigt, dass über alle Szenarien hinweg eine Angabe der aktuellen Umwelt, des Systemstatus und der Systemsicherheit benötigt wird. Auch die Angabe von aktuellen und zukünftig geplanten Manövern sollte permanent dargeboten werden.

Die Auswertung der Daten zeigt erneut eine Verschiebung des Informationsbedürfnisses in Abhängigkeit der Szenariobeschaffenheit. So rücken im Fall eines Übernahmeszenarios Informationen zur Umwelt, zum Systemstatus sowie zu Handlungsempfehlungen für die Übernahme in den Mittelpunkt. In handhabbaren Szenarien sollten Informationen zu aktuell und geplanten Manövern sowie zum Systemstatus dargeboten werden.

#### *Notwendigkeitsbewertung der Informationseinheiten aus Literatur und Fokusgruppe*

Die nachfolgende Bewertung der Notwendigkeit der Informationseinheiten aus Literatur und Fokusgruppe zeigt, dass im Szenario *freie Fahrt* Informationen zum Systemstatus und zur Angabe der Systemzuverlässigkeit als besonders notwendig eingestuft werden.

Im Szenario *Geschwindigkeitsbeschränkung* rücken Informationen zum aktuellen Systemstatus, zur Systemzuverlässigkeit sowie zur Umwelt in den Vordergrund.

Im Szenario *Überholen* zeigt sich ein qualitativ erhöhter Informationsbedarf der Teilnehmer, so sollen Informationen zum Systemstatus, zur Systemzuverlässigkeit sowie zu aktuell und kurzfristig geplanten Manövern angezeigt werden. Auch rücken Umweltinformationen (bspw. Angaben zu umgebenden Fahrzeugen, spezielle aufkommende Situationen) in den Vordergrund.

Auch das Stauszenario zeigt qualitativ einen erhöhten Informationsbedarf. So werden Informationen zu Navigation, Systemstatus und -zuverlässigkeit sowie Umweltinformationen als relevant eingestuft. Weiterhin sollen Gründe für das aktuelle Systemverhalten angezeigt werden.

In Übernahmeszenarien zeigt sich, dass Informationen zur Bewältigung der anstehenden Übernahme, wie bspw. Systemstatus und -zuverlässigkeit, als notwendiger eingestuft werden. Gründe für den Ausfall der Automation werden ebenfalls als notwendig erachtet. Zusätzlich dazu sollte der Zeitraum für die Übernahme der Fahraufgabe angezeigt werden.

### *Alter und Technikbereitschaft*

Der Fragebogen zur Technikbereitschaft weist eine interne Konsistenz (Cronbach) von  $\alpha = .75$  auf und liegt damit im akzeptablen Bereich. Die Gesamtstichprobe weist eine Technikbereitschaft von 4.12 ( $SD = .47$ ) auf. Die Werte der Subskalen Technikakzeptanz, Technikkompetenz und Technikkontrollüberzeugung können Tabelle 3 entnommen werden. Insgesamt kann das Probandenkollektiv als technikbegeistert beschrieben werden. Die Auswertung der Technikbegeisterung nach Altersgruppe zeigt einen höheren Mittelwert für die ältere Stichprobe (Jung:  $MW = 3.97$ ;  $SD = .44$ ; Alt:  $MW = 4.36$ ;  $SD = .45$ ). Der inferenzstatistische Vergleich beider Mittelwerte ist nicht signifikant ( $t(20) = -1.98$ ,  $p = .06$ ;  $\alpha = .05$ ).

Tabelle 3: Mittelwerte der Subskalen des Fragebogens zur Technikbereitschaft über alle Probanden

Subskala	Mittelwert (5stufige Likertskaala)
Technikakzeptanz	3.94
Technikkompetenz	4.43
Technikkontrollüberzeugung	3.98
Gesamt	4.12

### *Alter und Informationsbedarf*

Um weitere Schlüsse bezüglich des Informationsbedarfs in Abhängigkeit des Alters ziehen zu können, wird die qualitativ genannte Anzahl der Informationseinheiten herangezogen. Zur Untersuchung der Daten wird ein non parametrischer U-Test verwendet, da die Nullhypothese des (Shapiro Wilk) Tests auf Normalverteilung auf einem 5% Signifikanzniveau abgelehnt wird. Der Vergleich der beiden Altersgruppen ergibt einen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Anzahl genannter Informationen ( $U(8,14) = 23.5$ ,  $z = -2.23$ ,  $p < .05$ ,  $\alpha = .05$ ). So nennen die jüngeren Fahrer signifikant mehr Informationen als die ältere Fahrergruppe.

### *Alter und Notwendigkeit*

Die Auswertung mittels non-parametrischen U-Tests (Ablehnung der Nullhypothese des Shapiro Wilk Tests auf Normalverteilung, 5% Signifikanzniveau) ergibt keinen signifikanten Effekt. Die Bewertung der Notwendigkeit der unterschiedlichen Informationseinheiten unterscheidet sich nicht signifikant zwischen den Altersgruppen.

#### 4. Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse der Fokusgruppe geben einen ersten Anhaltspunkt, welche Informationen während hochautomatisierter Fahrphasen auf Autobahnen im Lkw benötigt werden. Im direkten Vergleich der gefundenen Informationseinheiten zum Pkw sollen zusätzlich topografische und Umweltinformationen dargestellt werden. Die Befunde können durch die fahrdynamischen Eigenschaften sowie Ausmaße des Lkw erklärt werden. Kurzfristige, dynamische Manöver sind nur eingeschränkt möglich.

Die Ergebnisse des Fahrsimulatorversuchs stützen die in der Fokusgruppe gefundenen Ergebnisse. So äußern die Lkw-Fahrer nach dem Erleben des hochautomatisierten Systems einen ähnlichen Informationsbedarf wie die Teilnehmer der Fokusgruppe.

Die Ergebnisse zeigen auch eine Verschiebung des Informationsbedarfs in Abhängigkeit des Szenarios (handhabbar vs. Übernahme). So sollten in Übernahmeszenarien vorwiegend fahr- und umweltrelevante Informationen dargeboten werden. In handhabbaren Szenarien, ist eine Darstellung von systembezogenen Informationen nötig. Die gefundenen Erkenntnisse bestätigen die Erkenntnisse aus der Studie von Beggiato et al. [4].

Die Bewertung gibt weiterhin Aufschlüsse bezüglich der Notwendigkeit von Informationen in verschiedenen Szenarien. So werden Informationen zur Umwelt, Systemstatus und -zuverlässigkeit sowie aktueller und geplanter Manöver über alle Szenarien hinweg als notwendig eingestuft. Die Bewertung der Notwendigkeit zeigt keine Unterschiede zwischen den Altersgruppen und spricht für einen ähnlichen Informationsbedarf beider Gruppen. Die Analyse der Szenarien zeigt einen qualitativ höheren Informationsbedarf der Probanden in kritischen Szenarien (bspw. Baustelle) während Szenarien mit einer gering eingeschätzten Kritikalität (bspw. freie Fahrt) einen geringen Informationsbedarf aufweisen.

Die Auswertung der Daten gibt Hinweise auf eine erhöhte Technikbereitschaft des älteren Probandenkollektivs. Die Untersuchung der Anzahl an genannten Informationseinheiten zeigt, dass die jüngeren Fahrer mehr Informationseinheiten nennen als die ältere Probandengruppe. Eine mögliche Erläuterung der Ergebnisse könnte eine erhöhte Erinnerungsleistung der jüngeren Fahrergruppe darstellen. So erinnern jüngere Fahrer mehr Informationseinheiten, die in jetzigen Assistenzsystemen angezeigt werden. Ob eine erhöhte Technikbereitschaft mit einem geringeren Informationsbedürfnis einhergeht, sollte in weiterführenden Studien überprüft werden.

Mit jedem experimentellen Design gehen Störfaktoren einher. Die Auswahl der Szenarien erfolgte auf Basis einer Expertenbefragung und stellt eine subjektive Einschätzung der zukünftigen Systemfunktionalität- und grenzen dar.

Kritisch anzumerken ist die Umsetzung der hochautomatisierten Fahrfunktion mithilfe der Wizard-of-Oz Methode, bei der die Systemfunktionalität durch den Versuchsleiter simuliert wird. Dadurch können bei der Systemimitation Abweichungen zwischen den Probanden entstehen. Auch wurden bei dem zugrundeliegenden Versuch keine Lenkradbewegungen im Prüfstand umgesetzt. Ein weiterer Kritikpunkt liegt in der Umsetzung der verschiedenen Autobahnszenarien. So wurden repräsentative, generische Szenarien betrachtet und umgesetzt. Unterschiedliche Szenarioausprägungen könnten jedoch einen differenzierten Informationsbedarf nach sich ziehen.

Zukünftige Studien sollten untersuchen, inwieweit ein Mitdrehen des Lenkrades im Lkw während hochautomatisierter Fahrphasen erwünscht ist und über welche fahrdynamische Ausprägungen ein hochautomatisiertes System verfügen sollte, um Fahrerakzeptanz zu fördern. Die Studie von Beggiaito et al. [4] weist auf einen unterschiedlichen Informationsbedarf in Abhängigkeit des Vertrauens der Probanden in das System hin. Nachfolgende Studien sollten untersuchen, inwieweit dieser Effekt bei Lkw-Fahrern zu finden ist und ob ein adaptives Display in Abhängigkeit des Erfahrungs-/Vertrauenslevels nötig ist. Auch die Bearbeitung von fahrfremden Tätigkeiten während hochautomatisierter Fahrt sollte in zukünftige Studien eingebunden werden, um herauszufinden, inwieweit das Informationsbedürfnis durch Ablenkung beeinflusst wird.

### Danksagung

Die Studien wurden in Zusammenarbeit mit der MAN Truck & Bus AG durchgeführt. Anna Wegleiter unterstützte bei der Umsetzung und Durchführung der Fokusgruppe. Stefan Besserer, Lasse Schwarze und Jessica Sturm unterstützten bei der Durchführung der Fahrsimulatorstudie.

## Literaturverzeichnis

- [1] T. M. Gasser, *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe; Bericht zum Forschungsprojekt F 1100.5409013.01.* Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für neue Wiss, 2012.
- [2] I. Othersen, *Vom Fahrer zum Denker und Teilzeitlenker: Einflussfaktoren und Gestaltungsmerkmale nutzerorientierter Interaktionskonzepte für die Überwachungsaufgabe des Fahrers im teilautomatisierten Modus.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [3] S. Davidsson und H. Alm, "Context adaptable driver information--or, what do whom need and want when?," (eng), *Applied ergonomics*, Bd. 45, Rn. 4, S. 994–1002, 2014.
- [4] M. Beggiato et al, "What would drivers like to know during automated driving? Information needs at different levels of automation," S. 1–6, 2015.
- [5] Bundesamt für Güterverkehr, *Marktbeobachtung Güterverkehr: Auswertung der Arbeitsbedingungen in Güterverkehr und Logistik 2016- I - Fahrerberufe.* [Online] Verfügbar:  
[https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Marktbeobachtung/Turnusbericht\\_e\\_Arbeitsbedingungen/Bericht\\_5E\\_Fahrerberufe\\_2016-I.html](https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Marktbeobachtung/Turnusbericht_e_Arbeitsbedingungen/Bericht_5E_Fahrerberufe_2016-I.html). Gefunden am: Jun. 20 2017.
- [6] Kraftfahrt Bundesamt, *Bestand an Pkw-Fahrerlaubnissen (Klasse B) in Deutschland am 1. Januar 2017 nach Altersgruppen und Geschlecht.* [Online] Verfügbar:  
<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/263168/umfrage/fahrerlaubnisse-der-klassen-b-in-deutschland-nach-altersgruppen>. Gefunden am: Jun. 20 2017.
- [7] B. Lenz et al, *Shell Lkw-Studie: Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030.* [Online] Verfügbar:  
[www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/portal.../Shell\\_Lkw\\_Studie\\_FIN\\_17042010.pdf](http://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/portal.../Shell_Lkw_Studie_FIN_17042010.pdf). Gefunden am: Jun. 20 2017.
- [8] GDV, *Automatisiertes Fahren: Auswirkungen auf den Schadenaufwand bis 2035.* [Online] Verfügbar: <http://www.gdv.de/2017/06/weniger-unfaelle-teurere-reparaturen/>. Gefunden am: Jun. 20 2017.
- [9] K. Charmaz, *Constructing grounded theory: A practical guide through qualitative analysis.* London, Thousand Oaks, Calif.: Sage Publications, 2006.
- [10] J. Nielsen, *Usability engineering*, 17th Aufl. Amsterdam: morgan Kaufmann, 2009.
- [11] F. J. Neyer, J. Felber, und C. Gebhardt, "Entwicklung und Validierung einer Kurzskala zur Erfassung von Technikbereitschaft," *Diagnostica*, Bd. 58, Rn. 2, S. 87–99, 2012.
- [12] P. Morville und L. Rosenfeld, *Information architecture for the World Wide Web*, 3rd ed. Sebastopol, California: O'Reilly, 2007.



# Bedeutung und Herausforderungen der Fahrerzustandserkennung im Kontext des vollautomatisierten Fahrens

Dr.-Ing. Alexander Biedermann, Dipl. Psych. Stephan Cieler,  
Continental Automotive GmbH, Babenhausen

## Kurzfassung

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Vorstellung der Ergebnisse einer Fahrsimulatorstudie, die die Auswirkung unterschiedlicher fahrfremer Tätigkeiten während des automatisierten Fahrens auf das von Fahrern selbst gewählte Zeitverhalten für eine Übernahme der Fahrzeugsteuerung sowie auf die Fahrqualität nach Übernahme untersucht. Im Gegensatz zu ähnlichen Studien, die sich meist nur auf hochautomatisierte (SAE Level 3 „Conditional Automation“) Szenarien stützen, wurde hier die Rückübernahme nicht durch eine externe Bedingung wie bspw. einen Gegenstand auf der Fahrspur oder eine Baustellensituationen forciert. So ließen sich sowohl das von den Fahrern subjektiv selbst gesetzte Zeitbudget als auch die von den Fahrer ohne äußere Einflüsse selbst gewählte Strategie für die Rückübernahme analysieren. Diese Erkenntnisse lassen sich für die Gestaltung der Übernahme im *vollautomatisierten* Kontext nutzen, in dem es keine überraschenden oder zeitkritischen Übernahmeaufforderungen gibt. Die Probanden nahmen sich in der überwiegenden Zahl der Fälle weniger als 10 Sekunden Zeit für die Übernahmen, allerdings zeigen sich deutliche Abweichungen im Zusammenhang mit der Ausübung fahrfremer Tätigkeiten. Vereinzelt wurden Verhaltensweisen beobachtet, die zu einem Scheitern der Übernahme führen könnten, was auch im vollautomatisierten Kontext die Bedeutung einer Fahrerbeobachtung und Fahrerzustandserkennung unterstreicht.

## 1. Motivation

Mit dem Voranschreiten der technologischen Entwicklung werden innerhalb weniger Jahre erste seriennahe Fahrzeuge das *vollautomatisierte* Fahren (SAE Level 4 „High Automation“ [1]) gestatten. In diesem Automatisierungsgrad wird für definierte Szenarien, bspw. die Fahrt auf einer Autobahn von der Auffahrt bis zur Abfahrt, die Fahraufgabe komplett von dem Fahrzeug übernommen. Am Ende des Szenarios findet eine Rückübernahme der Fahrzeugsteuerung durch den Fahrer statt. Kommt der Fahrer der Übernahmeaufforderung nicht nach, so

wird vom Fahrzeug ein risikominimales Manöver bis zum sicheren Halt des Fahrzeugs ausgeführt. Auch im Fehlerfall ist – anders als in den niedrigeren Automatisierungsstufen – das Fahrzeug und nicht der Mensch Rückfallebene und führt hier bei Bedarf ebenfalls ein risikominimales Manöver aus.

Während beim *hochautomatisierten Fahren* (SAE Level 3 „Conditional Automation“) vorrangige Herausforderung der Fahrermodellierung ist, ein minimales Zeitbudget bestimmen zu können, innerhalb dessen ein Fahrer die Fahrzeugsteuerung wieder übernehmen kann, spielt dieses Zeitbudget für das vollautomatisierte Fahren hingegen eine untergeordnete Rolle, da es in dieser Automatisierungsstufe keine überraschenden Übernahmeaufforderungen gibt. Unter diesem Gesichtspunkt scheint von nachrangiger Bedeutung zu sein, den Fahrerzustand während vollautomatisierter Fahrt zu erfassen, da der Fahrer sowohl von der Überwachungsaufgabe, als auch von dem Eingriff bei unvorhergesehenen Eventualitäten befreit ist. Auf den zweiten Blick ist auch im vollautomatisierten Fahren das Wissen um den Fahrerzustand und seine Aktivität von nicht geringer Bedeutung: Sofern während vollautomatisierter Fahrt fahrfremde Tätigkeiten ausgeübt werden, wie bspw. die Bedienung von Telefon oder anderen Mediengeräten, spielt die korrekte Klassifizierung des aktuellen Fahrerzustands in einem Unfallszenario eine wichtige Rolle. Veränderte Sitzpositionen, Gegenstände zwischen Fahrer und Airbag oder fahruntypische Körperhaltungen können eine Anpassung der Auslösung aktiver Sicherheitssysteme erfordern, um den Fahrer nicht zusätzlich zu gefährden.

Offene Fragestellungen beinhalten zudem unter anderem, ob fahrfremde Tätigkeiten die Übernahmezeit oder das Fahrverhalten nach der Übernahme womöglich negativ beeinflussen und wie die Rückübernahme optimal gestaltet werden kann, um eine sichere Übernahme zu gewährleisten. Des Weiteren soll untersucht werden, wie Fahrer abhängig von der gerade durchgeföhrten Nebentätigkeit die Übernahme gestalten, wenn sie selbst Zeitbudgets für die Rückübernahme definieren können. Einen Überblick über den aktuellen Kenntnisstand zu diesen Themen gibt der nächste Abschnitt.

## 2. Hintergrund und Fragestellungen

In den letzten Jahren hat sich eine Reihe experimenteller Arbeiten mit den Reaktionszeiten und Regelungsleistungen bei Übergängen vom automatisierten zum manuellen Fahren beschäftigt. Einen guten Überblick über diese Studien geben [2] sowie [3]. Typischerweise handelt es sich hierbei um Experimente im Fahrsimulator, in denen versucht wird, das notwendige Zeitbudget für die Wiederübernahme der Fahrzeugsteuerung durch den Fahrer zu ermitteln.

Hierbei kommen „Fahrzeuge“ mit verschiedenen Automatisierungsgraden (insbesondere SAE Level 3 und 4) zum Einsatz.

In der von [2] durchgeföhrten Metaanalyse werden Übernahmerektszeiten, definiert als Zeitdauer von einem Übernahmesignal bis zur Wiederaufnahme der manuellen Fahrzeugsteuerung, aus insgesamt 25 Studien der Jahre 2012 bis 2016 vergleichend betrachtet. Als durchschnittliche Reaktionszeit ermitteln die Autoren einen Wert von  $2,96 \pm 1,96$  s. Eine wichtige Beobachtung ist, dass unter bestimmten Umständen auch deutlich verlängerte Reaktionszeiten auftreten. So dauerten die Übernahmen im Fahrversuch von [4] bis zu 15 s; auch in der Arbeit von [5] wurden deutlich längere Übernahmerektszeiten (bis 6,9 s) ermittelt.

Betrachtet man die einzelnen Versuchsbedingungen im Detail, erkennt man mehrere das Übernahmeverhalten beeinflussende Faktoren:

- Mit Zunahme der sog. Vorbereitungszeit (*lead time*, Zeitdauer von der Übernahmeaufforderung bis zum kritischen Ereignis / Ende der Automatisierung) verhalten sich Fahrer eher taktisch und planen bewusst die nächsten Handlungsschritte. Diese Beobachtung steht im Zusammenhang mit der Unterscheidung sog. Fahrer-bestimmter („driver-paced“) und System-bestimmter („system-paced“) Übernahmen. Fahrer-bestimmte Übernahmen, die ohne Zeitdruck für den Fahrer erfolgen, gehen mit längeren Übernahmerektszeiten einher. Betrachtet man allerdings die Qualität des Regelverhaltens, scheint die Wiederübernahme der Fahrzeugsteuerung in dieser Bedingung robuster und harmonischer zu gelingen [6].
- Einen entscheidenden Einfluss auf das Übernahmeverhalten üben fahrfremde Tätigkeiten aus (Lesen, Spielen, Essen etc.). Diese müssen vom Fahrer zunächst kontrolliert beendet werden, bevor die Neuausrichtung der Aufmerksamkeit auf das Verkehrsgeschehen erfolgen kann (siehe z.B. [7]). Dabei dürfte eine Rolle spielen, welche (kognitiven) Ressourcen durch die Nebentätigkeit gebunden sind und welche Ressourcen für die Wiederaufnahme der Fahraufgabe erforderlich werden. Gemäß des Modells multipler Ressourcen von [8] ist insbesondere dann eine Verschlechterung der Übernahmefähigkeit zu erwarten, wenn die Fahraufgabe und die fahrfremde Tätigkeit – zumindest in einem Übergangsbereich – die gleichen Kombinationen von Modalitäten (visuell, auditiv etc.) und Verarbeitungscodes (räumlich, sprachlich) beanspruchen.
- Auch die Ausgestaltung des Informations- und Warnkonzepts – man betrachte z.B. die Ausgabemodalitäten akustisch, visuell und vibrotaktile – wirkt sich maßgeblich auf das Übernahmeverhalten aus [9]. In diesem Kontext sind außerdem der Typ der fahrfremden Tätigkeit

(z.B. Musik hören vs. Buch lesen) sowie der Vigilanzzustand des Fahrers (z.B. wach vs. schlafig) von Bedeutung.

- Schließlich sind diverse Personenvariablen (z.B. Alter, Fahrerfahrung, Fahrstil) und Umgebungscharakteristika (z.B. Verkehrssituation, Fahrstreifen, Verkehrsichte) weitere wichtige Prädiktoren für die Übernahmereaktionszeit sowie -qualität (siehe z.B. [10]).

Aktuell beschäftigen sich Forschungsprojekte mit der Frage, wie die verschiedenen Einflussgrößen auf die Übernahmereaktionszeit und -qualität zu einem einzelnen Indikator „Fahrerverfügbarkeit“ (*driver availability*) zusammengefasst werden können, welcher kontinuierlich über die Wahrscheinlichkeit erfolgreicher Übernahmen Auskunft gibt (z.B. [11]).

Die Prognose erfolgreicher Übernahmen steht auch im Mittelpunkt dieser Studie. Im Speziellen soll einer Frage nachgegangen werden, der bislang nur wenig Beachtung geschenkt wurde: Welchen Einfluss hat die *Unterbrechbarkeit* verschiedener Typen von Nebentätigkeiten auf die Übernahmestrategie des Fahrers, wenn dieser über das Zeitbudget selbst bestimmen kann (driver-paced-Bedingung)? Anders ausgedrückt: Wie gestalten sich Transitionsprozesse vom automatisierten zum manuellen Fahren, wenn der Abbruch einer Nebentätigkeit für den Anwender „kostenfrei“ ist bzw. mit negativen Konsequenzen und Gefühlen der Frustration einher geht? Außerdem soll untersucht werden, ob und unter welchen Bedingungen Fahrer die Tendenz zeigen, unterbrochene Handlungen nach der Übernahme wieder aufzunehmen (sog. Ovsiankina-Effekt [12]).

### 3. Methode

#### Stichprobe

An der Untersuchung nahmen 24 Personen teil, davon 11 Frauen und 13 Männer. Die Personen stammen aus der Probandendatenbank der Continental Automotive GmbH und arbeiten nicht in der Automobilbranche. Das Durchschnittsalter betrug 47 Jahre (Bereich: 18–75 Jahre). Die Teilnahme am Versuch wurde finanziell vergütet.

#### Fahrsimulation

Die insgesamt 189 km lange Versuchsstrecke führte ausschließlich über Autobahnabschnitte. Als Simulationssoftware wurde SILAB5 verwendet. Der Versuch fand im 360°-Fahrimulator der Continental Automotive GmbH in Babenhausen statt, der automatisiertes Fahren in Stufe 4 ermöglicht. Ein Piktogramm auf dem Kombiinstrument informierte den Fahrer über den aktuellen Betriebsmodus (Automatisierung verfügbar, eingeschaltet, ausgeschaltet). Vor der ei-

gentlichen Versuchsfahrt musste eine Trainingsstrecke absolviert werden, in der auch die Bedienung des Fahrautomaten erlernt wurde. Die Probanden befanden sich während des Versuchs alleine im Simulatorfahrzeug, siehe Bild 1.



Bild 1: Versuchsperson im Continental-Fahrtsimulator während manuellen Fahrens.

### Fahrfremde Tätigkeiten

Die Auswahl der fahrfremden Tätigkeiten, die den Probanden in Form von „Aufgaben“ über einen Lautsprecher im Fahrzeuginnenraum gestellt wurden, erfolgte auf Grundlage des Modells multipler Ressourcen (siehe Abschnitt 2); es wurden verschiedene Aufgaben gestellt, deren Bearbeitung eher den auditiven, eher den visuellen oder eher den haptischen Sinneskanal ansprachen.

Um die Versuchsfahrer in einen Interessenkonflikt zwischen der fahrfremden Tätigkeit und der Wiederaufnahme der Fahrzeugsteuerung zu verwickeln, wurden Aufgaben gestellt, die sich ohne negative Konsequenzen und unangenehme Gefühle unterbrechen lassen (Typ I) bzw. deren Unterbrechung und Nichterfüllung mit einem Erlebnis der Verärgerung und Frustration einhergehen und eine Tendenz zur Wiederaufnahme auslösen (Typ II), siehe [12]. Wie in Abschnitt 2 bereits ausgeführt, wird insbesondere bei den Aufgaben vom Typ II erwartet, dass diese auch nach Ertönen des Übernahmesignals für einen bestimmten Zeitraum weiterbearbeitet werden, und dass es zu einem Konflikt zwischen der Fahrzeugsteuerung und der fahrfremden Tätigkeit kommt, der sich in einer veränderten Übernahmestrategie, verlängerten Übernahmezeiten und schlechteren Regelungsleistungen manifestiert.

Folgende Aufgaben wurden in Phasen automatisierten Fahrens in Zufallsreihenfolge gestellt:

- **Visuell / Typ I:** Verschiedene Videos auf dem Mittelkonsolendisplay sollten betrachtet werden.
- **Visuell / Typ II:** Zusätzlich zur obigen Bedingung sollten bestimmte im Video erscheinende Autos gezählt werden. Die korrekte Anzahl der Autos war an ein Extrahonorar gekoppelt.
- **Auditiv / Typ I:** Der Proband sollte Telefongespräche führen und Auskunftsdiensste anrufen.
- **Auditiv / Typ II:** Zusätzlich sollten bestimmte Informationen memoriert werden. Die Richtigkeit der Informationen war an ein Extrahonorar gekoppelt.
- **Haptisch / Typ I:** Bauklötzte, die sich in einem Beutel auf dem Passagiersitz befanden, sollten mit den Händen ertastet werden.
- **Haptisch / Typ II:** Drei bestimmte Bauklötzte sollte per Ertasten gefunden werden. Die Anzahl der gefundenen Bauklötzte war an ein Extrahonorar gekoppelt.
- **Sonderbedingungen:** Außerdem gab es Fahrabschnitte, in denen keine Aufgabe gestellt oder entspannende Musik abgespielt wurde.

### Gestaltung des Übernahmeprozesses

Die Versuchsfahrer wurden instruiert, sich nach Ertönen eines kurzen akustischen Signals auf die Wiederaufnahme der Fahrttätigkeit vorzubereiten. Handelte es sich um einen Abschnitt, in dem eine Nebentätigkeit zu bearbeiten war, wurde dieses Signal zu einem Zeitpunkt maximaler Zuwendung zur Nebenaufgabe ausgegeben. Da sich die Automatisierung nicht selbsttätig ausschaltete (*driver-paced transition*), wurden die Probanden dabei nicht unter Zeitdruck gebracht. Wenn bereit zur manuellen Steuerung, sollten die Versuchsfahrer zwei am Lenkrad befindliche Tasten betätigen, um die Automatisierung auszuschalten. Diese Tasten wurden auch dazu verwendet, die Automatisierung später auf Anforderung wieder einzuschalten.

### Versuchsdesign

Der Studie liegt ein Versuchsplan mit kompletter Messwiederholung zugrunde. Die verschiedenen Bedingungskombinationen wurden in einer einmal ermittelten Zufallsreihenfolge präsentiert. Neben den Faktoren „Aufgabenmodalität / Sonderbedingungen“ und „Unterbrechbarkeit“ wurde die Schwierigkeit der Streckenabschnitte variiert (Veränderung der Kurvigkeit und Verkehrsdichte). Insgesamt wurde jeder Testfahrer während der 189 km langen Versuchsstrecke 20-mal zu Übernahmen aufgefordert. Einen Überblick über das Versuchsdesign gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Versuchsbedingungen des Fahrversuchs. Die Zahlen in den Matrixfeldern geben die Anzahl der Aufgaben bzw. Übernahmevergänge in den jeweiligen Bedingungen wieder. Weitere Erläuterungen im Text.

		Aufgabenmodalität			Sonderbedingungen	
		Visuell	Auditiv	Haptisch	Keine Aufgabe	Entspannungsmusik
Einfache Strecke	Typ I	1	1	1	2	2
	Typ II	1	1	1		
Schwierige Strecke	Typ I	1	1	1	2	2
	Typ II	1	1	1		

### Abhängige Variablen

Die abhängigen Variablen der Studie sind:

- Übernahmezeiten: Zeitdauer vom Übernahmesignal bis zum Ausschalten des Fahrautomaten über die Lenkradtasten,
- Anteil von Aufgaben, die nach dem Übernahmesignal weiterbearbeitet wurden,
- Anteil von Aufgaben, die nach der Übernahme wieder aufgenommen wurden,
- Messwert zur Beschreibung der Spurhaltegüte während und nach der Wiederübernahme.

### 4. Ergebnisse

Die Probanden absolvierten eine Gesamtstrecke von 4206 km. Auf dieser Strecke fanden 535 Rückübernahmen statt, die die Grundlage der folgenden Auswertungen bilden.

### Analyse der Übernahmezeiten

Betrachtet man zuerst Übernahmezeiten, d. h. die von Übernahmeaufforderung bis zur tatsächlichen Übernahme der Steuerung vergangene Zeit losgelöst von eventuell von den Probanden ausgeführten fahrfremden Tätigkeiten, zeigt sich die in Bild 2 dargestellte Verteilung.

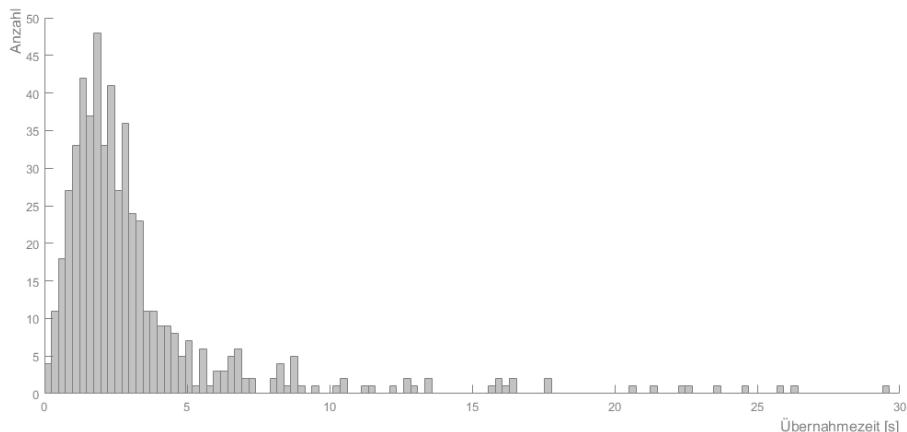


Bild 2: Histogramm der Übernahmezeiten. Median: 2,3 s; Mittelwert: 3,4 s; SD: 3,8 s.

In der überwiegenden Mehrheit aller Übernahmen ( $p = 0,95$ ) übernahmen die Fahrer in weniger als 10 Sekunden. 90 % der Übernahmen wurden in weniger als 6,6 Sekunden absolviert. Im Mittel erfolgte 0,5 s nach Übernahmeaufforderung der erste Blick auf die Straße, sofern der Blick zuvor abgewendet war. Diese Ergebnisse sind im Einklang der im Kontext des *hochautomatisierten Fahrens* (SAE Level 3 „Conditional Automation“) diskutierten Zeitfenster, innerhalb derer ein Fahrer für ein Eingreifen in außergewöhnlichen Szenarien die Steuerung wieder übernehmen muss (siehe [13]). Insbesondere die Ausreißer stellen bei den Übernahmezeiten die für die Fahrerbeobachtung relevanten Messpunkte dar, da diese auf missglückende Übernahmen, d. h. riskante Fahrmanöver oder Beinaheunfälle hindeuten könnten. Hier gilt es, Ursachen für die außergewöhnlich langen Übernahmezeiten zu identifizieren.

#### *Erklärungsansatz: Interindividuelle Schwankungen*

Ein möglicher Erklärungsansatz für lange Übernahmezeiten können interindividuelle Schwankungen sein: Unter Umständen sind einige Fahrer schlichtweg schneller in ihrer Reaktion im Hinblick auf Übernahmeaufforderungen. Staffelt man entsprechend die in der Studie gesammelten Übernahmezeiten nach Probanden, so zeigen sich zwar in der Tat leichte Unterschiede in der durchschnittlichen Übernahmezeit zwischen Personen, allerdings können sie die Ausreißer in der Übernahmezeit nicht erklären, siehe Bild 3. Zu beobachten ist allerdings, dass sich die Ausreißer der Übernahmezeiten zwischen mehreren Probanden verteilen, es allerdings auch Studienteilnehmer gibt, die ein sehr konstantes Übernahmeverhalten an den Tag legen und jede Übernahme in weniger als 10 Sekunden absolviert haben.

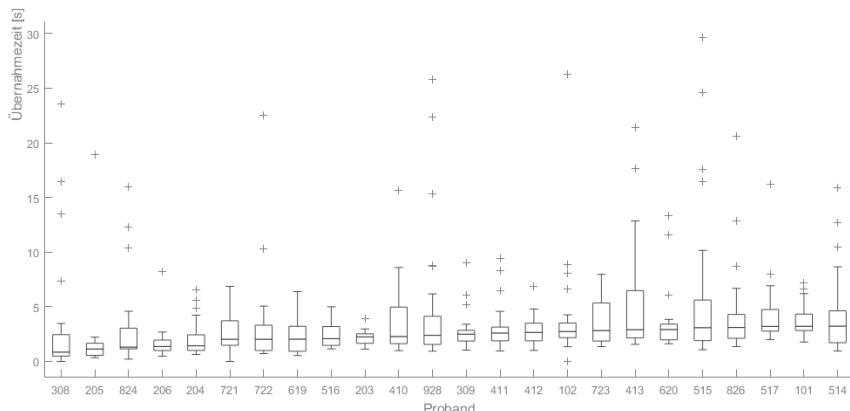
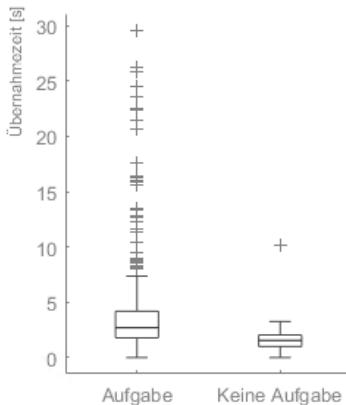


Bild 3: Übernahmemeit je Proband. Median des schnellsten Probanden: 0,8 s; Median des langsamsten: 3,2 s.

#### *Erklärungsansatz: Fahrfremde Tätigkeiten*

Ein weiterer Ansatzpunkt für die Erklärung langer Übernahmzeiten kann die Ausübung fahrfremer Tätigkeiten sein. Stellt man die Übernahmen während der Ausführung solcher Tätigkeiten jenen Phasen gegenüber, in denen die Probanden keine Aufgaben zu bearbeiten hatten, zeigt sich ein erstes Deutungsmuster für außergewöhnlich lange Übernahmen, siehe Bild 4.



Der naheliegende Schluss, dass die Ausführung bestimmter Tätigkeiten die Übernahmezeit zwingend außergewöhnlich lange herauszögert, ist jedoch nicht haltbar. Differenziert man die Darstellung der vorigen Grafik nach den in der Studie ausgeübten Tätigkeiten, ergibt sich die in Bild 5 illustrierte Verteilung der Übernahmezeiten.

Bild 4: Übernahmezeit in Abhängigkeit davon, ob während automatisierter Fahrt eine Aufgabe bearbeitet wurde.

Betrachtet man die Ausreißer im Bild 5 im Detail, zeigt sich, dass die Studienteilnehmer bis auf wenige Ausnahmen die Übernahmen bewusst herausgezögert hatten. Dies ließ sich an einer kurzen Abwendung von der Aufgabe im Moment der Übernahmeaufforderung, prüfenden Blicken auf die Fahrsituation und einem anschließenden Wiederaufnehmen der Tätigkeit in den Szenenvideos belegen.

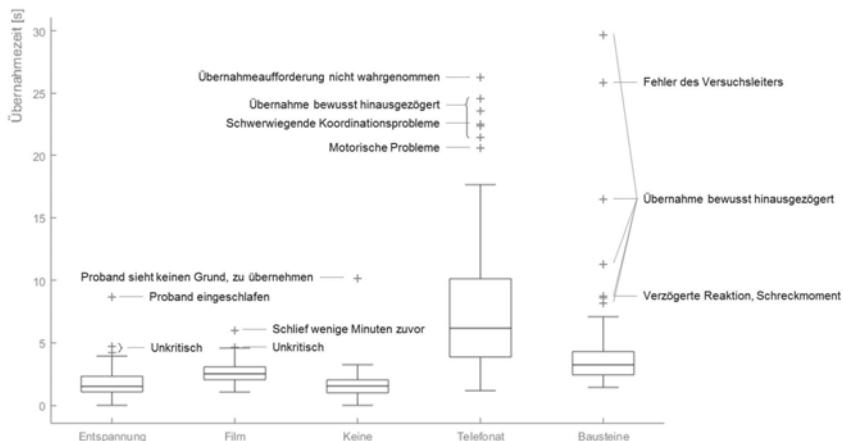


Bild 5: Übernahmezeiten aufgeschlüsselt nach Typ der Tätigkeit.

Derartiges Verhalten wurde wahrscheinlich durch das Studiendesign begünstigt, da für die Fahrer kein Grund zur sofortigen Übernahme erkennbar war, wie beispielsweise ein Objekt auf der Fahrspur, fehlende Spurmarkierungen oder Baustellen und ferner das HMI keinerlei Erklärung der Übernahmeaufforderung bot. Probanden haben sich in diesen Fällen nach einer Abwägung zwischen einer sofortigen Übernahme der Fahraufgabe und einem zeitweiligen Fortführen der Aufgabe für letzteres entschieden. Im Bild sind jedoch auch einige Fälle aufgeführt, in denen es zu einem Ressourcenkonflikt kam: Bei Unentschlossenheit, ob beispielsweise das Telefonat weitergeführt werden oder die Steuerung des Fahrzeugs übernommen werden soll, waren bei einem Probanden mehrmalige fehlgeschlagene Versuche erkennbar, die Automation einhändig zu deaktivieren. Da derartige Konfliktsituationen auch unmittelbar nach der Rückübernahme Einbußen auf die Fahrqualität nahelegen, wird dieser Aspekt weiter unten ebenfalls betrachtet. Ein Proband schließt während einer Entspannungsphase ein, wachte erst einige Sekunden nach der Übernahmeaufforderung auf und übernahm die Fahrzeugsteuerung. Zwar zeigten sich hier in der unmittelbaren Folge der Übernahme keine deutlichen Einbußen in der Fahrqualität, allerdings zeigte der Proband in dem unmittelbar folgenden Abschnitt ebenfalls eine überdurchschnittlich lange Übernahmzeit. Dies legt die Vermutung nahe, dass Schlaf während automatisierter Fahrphasen auch noch mehrere Minuten lang Einwirkungen auf den Fahrer zeigt. Allerdings ist diese Aussage aufgrund der marginalen Stichprobenmenge in dieser Studie nicht belegbar. Zwischen den einfach unterbrechbaren Aufgaben ohne den schwierigen Aufgaben mit Wiederaufnahmeanreiz zeigte sich hingegen *kein* statistisch signifikanter Unterschied der Übernahmzeiten.

### **Unterbrechungsverhalten**

Da sich gezeigt hat, dass einige Probanden dem Fortführen ihrer fahrfremden Tätigkeit gegenüber einer sofortigen Übernahme der Fahrzeugsteuerung den Vorzug geben, ist eine nähere Betrachtung des Unterbrechungsverhaltens angezeigt. Die linke Seite von Bild 6 illustriert, dass der Großteil der Probanden zwischen der Übernahmeaufforderung und der eigentlichen Übernahme die Aufgabe mindestens einmal unterbrochen hatte. Als Unterbrechung wurde hier die Abwendung von der Aufgabe für mehr als 1,5 s definiert. Vor allem die Telefonaufgabe wurde auch während der Übernahme weiter ausgeübt, da sich hier die Probanden meist damit behelfen, das Telefon zwischen Kopf und Schulter einzuklemmen – streng genommen wurden bei dieser Aufgabe also auditive und verstärkt motorische Ressourcen benötigt, was bei Planung der Studie nicht vorauszusehen war. Bild 6 zeigt auf der rechten Seite, wie häufig Aufgaben nach der Übernahme der Fahrzeugsteuerung wiederaufgenommen wur-

den, sofern sie für die Übernahme unterbrochen worden waren. Die hohe Rate der Wiederaufnahme für die Aufgabe „Film“ lässt sich damit erklären, dass während der Fahraufgabe Blicke leicht zwischen der Straße und dem Display wandern können, während die Suchaufgabe mit einer motorischen Beanspruchung einherging, die während manueller Fahrt auch von einer deutlichen Verschlechterung in der Spurhaltequalität begleitet war. Die Telefonaufgabe wurde nur in etwa 5 % der Fälle wiederaufgenommen, sofern sie für die Übernahme unterbrochen worden war. Dies lässt sich u.a. damit erklären, dass die Probanden wesentliche Informationen während der Übernahme verpassten, sodass ein korrektes Memorieren der Daten und damit das Lösen der Aufgabe nicht mehr möglich war.

Wie bei der Übernahmezeit zeigen sich auch bei dem Unterbrechungsverhalten keine signifikanten Unterschiede zwischen einfach und nicht einfach unterbrechbaren Aufgabenmodalitäten. Die Hypothese, dass Aufgaben, die einen Wiederaufnahmeanreiz, bspw. in Form einer Belohnung im Falle einer erfolgreichen Absolvierung, häufiger wiederaufgenommen werden ist in den vorliegenden Studienergebnissen nicht haltbar.

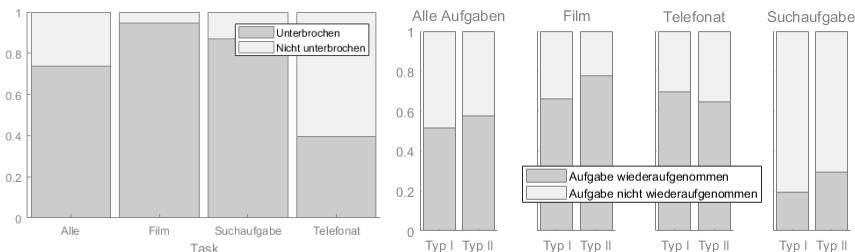


Bild 6: Aufstellung, ob die Ausführung einer Aufgabe zwischen Übernahmeaufforderung und Übernahme unterbrochen wurde (links) und ob für die Übernahme unterbrochene Aufgaben nach der Übernahme wiederaufgenommen wurden (rechts).

Analysiert man hingegen, wie lange sich Probanden nach der Übernahme mit einer Aufgabe während manueller Fahrt weiterbeschäftigt haben, lässt sich erkennen, dass einige Probanden eine verstärkte Neigung zu besitzen scheinen, begonnene Tätigkeiten weiterzuführen bzw. abzuschließen. Diese Aufstellung ist in Bild 7 zu sehen.

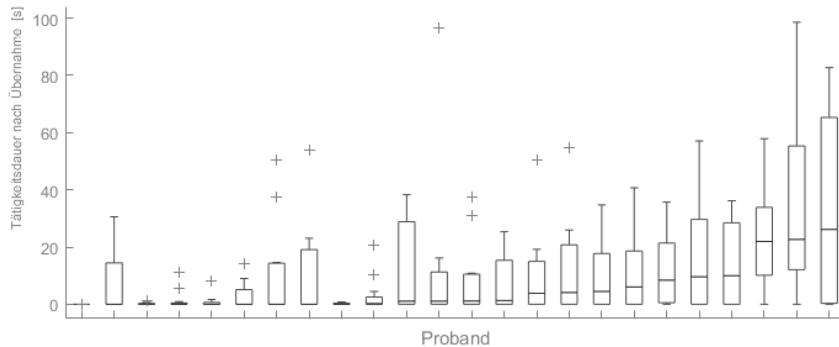


Bild 7: Individuelle durchschnittliche Fortführungsduer von Aufgaben nach Übernahme.

### Auswirkungen auf die Fahrqualität

Für die Vergleichbarkeit der Fahrqualität innerhalb der Studie wurde eine Metrik zur Qualitätsbestimmung angewandt, die sich an dem Versatz zur Spurmitte orientiert. Für jeden Probanden wurden die Phasen manuellen Fahrens herangezogen, in denen keine Tätigkeit ausgeübt wurde und die länger als 30 s nach einer Fahrzeugübernahme liegen. Für diese Abschnitte wurde der Hochpass-gefilterte Abstand zwischen der Fahrzeugmitte und der Mitte der Fahrspur integriert. Dieses Flächenmaß wurde auf die Länge eines Samplingintervalls normalisiert und dient als Referenz für gutes Fahren für den jeweiligen Fahrer. Entsprechend wurde für die Phasen nach der Übernahme der Fahrzeugsteuerung das Flächenmaß bestimmt, das durch den Vergleich zum Referenzmaß eine grobe Aussage über die Spurhaltegüte bietet. Anders als die reine Betrachtung des Abstands zur Spurmitte können auch so „Schlangenlinien“ um die Fahrbahnmitte herum als Anzeichen schlechter Spurhaltegüte identifiziert werden.

In Abschnitten, in denen Probanden Tätigkeiten während manueller Fahrt fortgesetzt haben, zeigt sich insbesondere bei Aufgaben, die eine motorische Komponente besitzen, wenig überraschend eine deutliche Verschlechterung der Fahrqualität. Allerdings sind auch dann, wenn eine Tätigkeit nach Übernahme nicht fortgeführt wurde, vereinzelt schlechtere Fahrleistungen zu beobachten im Vergleich zu Übernahmen in Abschnitten, in denen keine Aufgabe zu bearbeiten war. Ein eindeutiger, statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen zuvor ausgeführter fahrfremder Tätigkeit und Fahrleistung nach Übernahme der Fahrzeugsteuerung ließ sich in dieser Studie allerdings nicht herstellen. Die Hypothese, dass bestimmte Tätigkeiten auch nach ihrer Beendigung oder Unterbrechung womöglich Einflüsse auf das Fahrverhalten zeigen, gilt es daher in weiteren Studien zu überprüfen.

## 5. Sensorische Erfassung und Klassifikation relevanter Fahrerzustände

Da das Simulatorfahrzeug für die Studie sowohl mit Head-Eye-Tracking-Systemen (HET) als auch einer Tiefenkamera ausgestattet wurde, lassen sich diese Systeme hinsichtlich ihrer Eignung, Ereignisse im Innenraum zu erkennen und zu interpretieren, vergleichen. Da bislang seriennahe HET vorrangig auf den Einsatz im manuellen Fahren zugeschnitten sind, ist die Erfassung des Primärsichtfelds beim manuellen Fahren, das sog. „Eyes on Road“-Fenster, mit sehr hoher Verfügbarkeit möglich. Entsprechend lassen sich visuelle Ablenkungen vom Fahrgeschehen, aber auch Müdigkeit implizierende Veränderungen im Lidschlussverhalten zuverlässig erkennen.

Während automatisierter Fahrt gewinnen allerdings andere, meist im Fahrzeugraum liegende Blickschwerpunkte, sei es das Infotainmentsystem, das Smartphone oder Passagiere, an Bedeutung. Die damit einhergehende Veränderung der hauptsächlichen Blickausrichtung weg vom ursprünglichen, gut erfassbaren Primärsichtfeld führt zu einer deutlichen Reduktion der Signalverfügbarkeit. Zudem zeigen einige Tätigkeiten, bspw. Telefonieren, ähnliche Blickmuster wie das manuelle Fahren, können also trotz guter Verfügbarkeit von HET-Signalen nicht zwingend von Blickmustern, wie sie beim manuellen Fahren auftreten, unterschieden werden. Neben der Lösung, zusätzliche Blickerfassungskameras für die Erweiterung der Abdeckung zu integrieren, bieten hier Tiefenkameras eine Alternative, um den Kontext im Fahrzeuginnenraum zu erschließen.

Eine im Dachhimmel verbaute und auf den Fahrer gerichtete Tiefenkamera kann genutzt werden, um ein Skelettmodell des Fahrers zu berechnen, das die Position von Körpergelenken wie Ellbogen oder Handgelenke im Fahrzeuginnenraum zur Verfügung stellt. So können Verlagerungen der Körperpose oder das Halten von Gegenstände erkannt werden. Insbesondere über die Fusion der Daten mit den Informationen eines HET sollten sich so Tätigkeiten im Fahrzeuginnenraum klassifizieren lassen, siehe Bild 8.



Bild 8: Blickmuster während eines Telefonats (grüner Punkt auf der Windschutzscheibe) ähneln den Blickverteilungsmustern während manueller Fahrt ohne Nebentätigkeit (graue Punktwolke). Eine 3D-Skelettmodell (rechts, Blickwinkel vom Rückspiegel im Dachhimmel. Linker Arm rot, rechter Arm blau dargestellt) kann über die Auswertung der Position von Körpergelenken helfen, fahrfremde Tätigkeiten zu erkennen.

## 6. Ausblick

In vollautomatisierten Szenarien übernahmen Fahrer im Falle einer Übernahmeaufforderung auch ohne erkennbare Dringlichkeit in der Mehrheit sehr schnell die Steuerung des Fahrzeugs. So wurden 95 % der Übernahmen in weniger als 10 Sekunden, 90 % der Übernahmen sogar in weniger als 6,6 Sekunden absolviert. Des Weiteren waren die Probanden bis auf wenige Einzelfälle in der Lage, zwischen der Fortführung fahrfremer Tätigkeit und der Übernahme der Fahrzeugsteuerung eigenverantwortlich zu priorisieren. In besagten Einzelfällen kam es zu Ressourcenkonflikten, die die Übernahme verzögerten. Diese gilt es zukünftig im Vorfeld zu erkennen. Die Kenntnis des Fahrerzustands und das Wissen über die Art und Attraktivität fahrfremer Tätigkeiten können daher einen wichtigen Beitrag für ein „holistisches“ Interaktionskonzept im Kontext des automatisierten Fahrens liefern. Hierbei wird es das Ziel sein, den Fahrer mit situationsangemessenen Informations- und Warnstrategien auf die Übernahme vorzubereiten und abgestimmt auf dessen Leistungspotenzial einen optimalen Zeitpunkt für den Beginn der Transition zu definieren. Sofern fahrer- und situationsbezogen der „Anreiz-“ und „Wiederaufnahmeharakter“ einer Nebentätigkeit ermittelt werden kann, sollte es außerdem möglich sein, dem Fahrer einige dieser Tätigkeiten während und nach der Wiederübernahme in einem „sicheren“ Modus anzubieten. Beispielsweise könnte in diesen Fällen nachgefragt werden, ob der Fahrer einen Film in der Hörfassung weiter verfolgen will oder ob die Tastatur des Chatprogramms auf Spracheingabe umgeschaltet werden soll.

## Literatur

- [1] SAE J3016:2016-09, Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles.
- [2] Eriksson, A. & Stanton, N.A. (2017). Takeover Time in Highly Automated Vehicles: Noncritical Transitions to and From Manual Control. *Human Factors*, 59, 689-705.
- [3] Radlmayr, J. & Bengler, K. (2015). Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren (FAT Schriftenreihe 276). Berlin: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.
- [4] Merat, N., Jamson, A.H., Lai, F.C.H., Daly, M., & Carsten, O.M.J. (2014). Transition to manual: Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 26 (Part A), 1–9.
- [5] Naujoks, F., Mai, C., & Neukum, A. (2014). The effect of urgency of take-over requests during highly automated driving under distracted conditions. Paper presented at the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, Krakow, Poland.
- [6] Eriksson, A. & Stanton, N.A. (2017). Driving performance after self-regulated control transitions in highly automated vehicles. *Human Factors*. Artikel in Vorbereitung.doi: 10.1177/0018720817728774.
- [7] Rampillon, F. & Feron, S. (2017). Take over Time in level 3 autonomous car. Vortrag gehalten auf der Car HMI Europe, Berlin, 29.-30.06.2017.
- [8] Wickens, C.D. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human Factors*, 50, 449–455.
- [9] Petermeijer, S., Doubek, F. & de Winter, J. (2017). Driver response times to auditory, visual, and tactile take-over requests: A simulator study with 101 participants. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Banff, Canada, 1505-1510.
- [10] Gold, C. (2016). Modeling of Take-Over Performance in Highly Automated Vehicle Guidance. Dissertation, TU München, Lehrstuhl für Ergonomie.
- [11] Marberger C., Mielenz H., Naujoks F., Radlmayr J., Bengler K. & Wandtner, B. (2017). Understanding and Applying the Concept of "Driver Availability" in Automated Driving. In N. A. Stanton (Ed.), *Advances in Human Aspects of Transportation*. Proceedings of the AHFE 2017 International Conference on Human Factors in Transportation, July 17–21, 2017, Los Angeles (pp. 595-605). Cham: Springer.
- [12] Osvankina, M. (1928). Die Wiederaufnahme unterbrochener Handlungen. *Psychologische Forschung*, 11, 302–379.
- [13] Gold, C., Dambock, D., Lorenz, L., & Bengler, K. (2013). „Take over!“ How long does it take to get the driver back into the loop? In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 57th Annual Meeting* (pp. 1938–1942). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.

# Müdigkeit und lange Fahrt dauern im Zusammenhang mit Übernahmeaufforderungen beim automatisierten Fahren

Dr.-Ing. **M. Kühn**, Unfallforschung der Versicherer, Berlin;  
M.Sc. **T. Vogelpohl**, Prof. Dr. **M. Vollrath**, TU Braunschweig

## Kurzfassung

Ziel der Studie war es, die Dauer bis zu einer sicheren Übernahme der manuellen Steuerung nach einer hochautomatisierten Fahrt bei müden Fahrern und nach langen Fahrt dauern abzuschätzen. Dazu wurden die jeweils ersten Reaktionen in einem typischen komplexen Autobahnszenario nach einer Übernahmeaufforderung analysiert. Dem Szenario voran ging jeweils eine hochautomatisierte Fahrt, während der die Müdigkeit der Fahrer in regelmäßigen Abständen von geschulten Bewertern anhand von validen Müdigkeitsindikatoren (Lidschluss-Dauer, Blickverhalten, Gähnen und weitere verhaltensbasierte Indikatoren) eingestuft wurde. Den Fahrern wurden während der Fahrt keine ablenkenden Nebenaufgaben zur Verfügung gestellt.

An der Studie nahmen N = 60 Versuchspersonen im Alter von 18 bis 87 (Jahren) teil. Der Anteil der jüngeren Fahrer im Alter von 18 bis 35 Jahren lag bei 48%, Fahrer im mittleren Alter (36-55 Jahre) machten einen Anteil von 25% aus und ältere Fahrer (55+) waren mit einem Anteil von 27% in der Stichprobe repräsentiert. In der Stichprobe waren 38 Personen (63%) männlich und 22 Personen (37%) weiblich. Die Studie wurde im statischen Fahrsimulator der TU Braunschweig umgesetzt. Das Szenario bildete die Fahrt auf einer mehrspurigen Autobahn ab. Die Automation war auf eine Geschwindigkeit von 120 km/h eingestellt. Sie blieb jeweils so lange aktiv, bis sie von den Testpersonen durch einen Eingriff am Bremspedal oder über einen Hebel hinter dem Lenkrad ausgeschaltet wurde.

Es zeigt sich, dass 90% der automatisiert fahrenden Fahrer nach einer Fahrt, in der sie ein mittleres Müdigkeitslevel erreichten und nicht abgelenkt waren, nach 1 Sekunde das erste Mal den Blick wieder auf die Straße gerichtet hatten, nach 3-4 Sekunden die Hände wieder am Lenkrad und die Füße an den Pedalen hatten und nach 6-7 Sekunden die Automation abschalteten. Untersucht man allerdings als Indikatoren des Situationsbewusstseins für die Fahrsituation den ersten Blick in den Spiegel und den Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige, wurden 12-15 Sekunden benötigt. Diese Reaktionen, die zum Verständnis der aktuellen Verkehrssituation notwendig sind, waren damit um bis zu 6 Sekunden verzögert im Vergleich zu der gleichen Situation bei einer manuellen Fahrt. Mit Ausnahme des ersten Blicks auf die

Straße sind die Werte müder automatisiert fahrender Fahrer vergleichbar mit einer kurzen, wachen automatisierten Fahrt, bei der der Fahrer durch eine motivierende Nebenaufgabe stark visuell, motorisch und kognitiv abgelenkt ist [4].

Besonders kritisch ist in diesem Kontext, dass auch die automatisiert fahrenden Fahrer, die normal geschlafen hatten und tagsüber an der Studie teilnahmen, nach einer Fahrtdauer von ca. einer Stunde von den Bewertern als im Durchschnitt ähnlich müde eingeschätzt wurden wie die Fahrer, die in der Nacht zuvor kürzer geschlafen hatten. Automatisiert fahrende Fahrer, die zu wenig geschlafen hatten, erreichten einen vergleichbaren Müdigkeitslevel bereits nach ca. 15-20 Minuten. Im Gegensatz hierzu wurden die manuellen Fahrer ohne Schlafdefizit auch nach einer Fahrzeit von einer Stunde als wenig bis gar nicht müde eingestuft. Manuelle Fahrer mit Schlafdefizit erreichten einen vergleichbaren Müdigkeitslevel nach ca. 35-40 Minuten. Allgemein erreichten die Fahrer in den automatisierten Gruppen damit einen höheren Müdigkeitslevel als die manuellen Fahrer und sie erreichten diesen Müdigkeitslevel außerdem früher. Einige dieser automatisiert fahrenden Fahrer schlossen für längere Zeiträume die Augen oder schliefen sogar ein.

## 1. Einleitung

Bislang zeigen nur wenige Studien, wie die Dauer der Fahrt und die Müdigkeit des Fahrers die Interaktion mit hohen Stufen der Fahrzeugautomatisierung beeinflusst. Es wird vermutet, dass Effekte von Fahrermüdigkeit ihre Relevanz für die Sicherheit im Straßenverkehr auch in teil- oder hochautomatisierten Fahrzeugen nicht verlieren [1], [2]. Solange der Fahrer als Rückfallebene eingesetzt werden soll, wird es Kontrollübergaben vom Fahrzeug an den Fahrer geben. In solchen Situationen ist der Fahrer darauf angewiesen, nicht nur möglichst schnell wieder die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen, sondern auch möglichst schnell ein vollständiges Bewusstsein für die Verkehrssituation und den Zustand des Fahrzeugs aufzubauen. Müde oder ermüdete Fahrer nach Phasen einer automatisierten Fahrt könnten in solchen Situationen genauso oder sogar stärker beeinträchtigt sein als Fahrer in herkömmlichen Fahrzeugen.

Zusätzlich von Interesse ist die Entwicklung der Müdigkeit des Fahrers in der Interaktion mit der Nutzung von Automation. Erste Hinweise deuten darauf hin, dass Fahrer in Zusammenarbeit mit Automation schneller ermüden und das dauerhafte Aufrechterhalten von Aufmerksamkeit in einer monotonen Fahrumgebung eventuell sogar anstrengender ist als bei einer manuellen Fahrt. Müde Fahrer könnten sich in der Interaktion mit hochautomatisierten Fahrzeugen anders verhalten als Fahrer im wachen Zustand und möglicherweise die Überwachung von Funktionen vernachlässigen oder bestimmte Hinweisreize auf potentiell gefährdende Situationen verpassen.

Vor diesem Hintergrund wurde im Jahr 2016 die nachfolgend vorgestellte Fahrsimulator-Studie an der TU Braunschweig durchgeführt, um einige der als relevant identifizierten Parameter gezielt zu untersuchen. Ziel der Studie war eine Quantifizierung der Müdigkeit bei Fahrern in hochautomatisierten Fahrzeugen im Vergleich zu manuellen Fahrern. Jeweils für Fahrer mit leichtem Schlafmangel und für Fahrer ohne Schlafmangel wurde Müdigkeit systematisch gemessen und aufgezeichnet. Außerdem wurden in Abhängigkeit von diesen Variablen Übernahmeaufforderungen an den Fahrer ausgegeben und die Dauer und Qualität der Reaktionen auf Übernahmeaufforderungen und nachfolgende kritische Ereignisse analysiert.

## 2. Versuchsdesign

Ziel der Studie war es, die Dauer bis zu einer sicheren Übernahme der manuellen Steuerung nach einer hochautomatisierten Fahrt bei müden Fahrern und nach langen Fahrtzeiten abzuschätzen. Dazu wurden die jeweils ersten Reaktionen in einem typischen komplexen Szenario nach einer Übernahmeaufforderung analysiert. Dem Szenario voran ging jeweils eine

hochautomatisierte Fahrt, während der die Müdigkeit der Fahrer in regelmäßigen Abständen von geschulten Bewertern anhand von validen Müdigkeitsindikatoren (Lidschluss-Dauer, Blickverhalten, Gähnen und weitere verhaltensbasierte Indikatoren) eingestuft wurde. Den Fahrern wurden während der Fahrt keine ablenkenden Nebenaufgaben zur Bearbeitung gegeben.

Die Hälfte der Probanden wurde gebeten, in der Nacht vor dem Versuch maximal 5 Stunden zu schlafen und vor dem Versuch keine koffeinhaltigen Getränke zu sich zu nehmen. Diese Probandengruppe wurde zusätzlich zu Uhrzeiten zwischen 20 Uhr und 24 Uhr zu den Versuchen eingeladen, um späte Heimfahrten nach einem Arbeitstag zu simulieren. Versuchsteilnehmer in dieser Gruppe hatten im Durchschnitt 4 Stunden und 52 Minuten geschlafen. Die andere Hälfte der Probanden wurde gebeten, in der Nacht vor dem Versuch normal zu schlafen. Diese Probandengruppe wurde für den Versuch in den Zeiten von 9 Uhr bis 11 Uhr, sowie von 15 Uhr bis 17 Uhr eingeladen. Versuchsteilnehmer in dieser Gruppe hatten im Durchschnitt 7 Stunden und 52 Minuten geschlafen.

Jeweils die Hälfte der Fahrer dieser zwei Gruppen fuhr mit Automation und erhielt vor dem komplexen Szenario eine Übernahmeaufforderung (Warnton + visuelle Warnung). Die andere Hälfte der Fahrer steuerte das Fahrzeug manuell und erhielt vor dem Szenario ebenfalls einen Warnton (siehe Tabelle 1). Das komplexe Szenario wurde je nach Versuchsguppe zu unterschiedlichen Zeitpunkten von den geschulten Müdigkeitsbewertern ausgelöst, um die Reaktionen in vergleichbaren Fahrerzuständen zu überprüfen: Bei den Fahrern mit geringer Schlafdauer (mit/ohne Automation) wurde das Szenario ausgelöst, wenn die Fahrer ein „mittleres“ Müdigkeitslevel erreicht hatten (lange Lidschlüsse von ca. einer Sekunde, starrer Blick, Strecken des Körpers). Bei den Fahrern mit normaler Schlafdauer (mit/ohne Automation) wurde das Szenario nach etwa einer Stunde Fahrtzeit ausgelöst unabhängig vom Müdigkeitslevel der Fahrer.

**Tabelle 1: Versuchsdesign und Stichprobenplanung.**

Stichproben/Quelle der Müdigkeit	Versuchsbedingung	Anzahl Versuchspersonen
<i>Population 1:</i> Müdigkeit (Schlafmangel + negativer Effekt circadianer Rhythmik)	manuelle Fahrt	15 Personen
	automatisierte Fahrt	15 Personen
<i>Population 2:</i> lange Fahrtdauer (Daueraufmerksamkeit + positiver Effekt circadianer Rhythmik)	manuelle Fahrt	15 Personen
	automatisierte Fahrt	15 Personen

### 3. Übernahmeszenarien

Die Studie wurde im Fahrsimulator der TU Braunschweig durchgeführt. Die Fahrdaten wurden in der Fahrsimulation SILAB in der Version 5 erhoben [3]. Der verwendete Fahrsimulator bestand aus einer Sitzkiste mit Fahrer- und Beifahrersitz, einem Lenkrad und Pedalerie. Die Simulation wurde von drei Beamern auf Leinwände projiziert. Über die Simulation wurden außerdem vier kleine Bildschirme angesteuert, die als Seitenspiegel, Rückspiegel und Geschwindigkeitsanzeige dienten. Fahrgeräusche, Motorgeräusche und Geräusche des umgebenden Verkehrs wurden über ein Surround-Sound System ausgegeben. Die Konfiguration des Simulator-Raums ist in Abbildung 1 dargestellt.



Bild 1: Konfiguration der Sitzkiste und des Simulator-Raums (Foto: Matthias Powelleit).

Um die Auswirkungen von Müdigkeit und langer Fahrtzeit auf die Fähigkeit zur Übernahme der Steuerung nach einer Übernahmeaufforderung zu testen, wurden bereits in Teil 1 dieser Studienreihe verschiedene Szenarien entworfen [4]. Grundlage aller entworfenen Szenarien war die Annahme, dass ausschließlich für das Fahrzeug planbare Übernahmesituationen für die Stufe des hochautomatisierten Fahrens relevant sind. Plötzliche Interventionen durch den Fahrer, zum Beispiel beim schnellen Einscheren von vorausfahrenden Fahrzeugen, sind bei diesem Grad der Automation nicht mehr zu erwarten und müssen durch das Fahrzeug abgefangen werden.

Vor diesem Hintergrund wurden Experteninterviews durchgeführt, aus denen realistische Szenarien für solche planbaren Übernahmesituationen abgeleitet wurden [4]. Hierzu zählten der Wechsel von einem für Automation freigegebenem Autobahnabschnitt zu einem Abschnitt, in dem die Automation nicht verfügbar ist, der Ausfall eines (redundanten) Sensorsystems, fehlende oder schlecht sichtbare Fahrbahnmarkierungen, ein Baustelle sowie Wetterbedingungen, die die Sensorik des Fahrzeugs behindern. Auf Grundlage der Erfahrungen aus dem ersten Studienteil wurde für diese Studie das Szenario M05 ausgewählt, in dem die Wetterbedingungen (einsetzender Starkregen) die Sensorik behindern. Um den Anwendungsfall „Heimfahrt von der Arbeitsstelle nach einer Nacht mit zu wenig Schlaf“ der Versuchsgruppe „Müdigkeit“ realistischer zu gestalten, wurde die Simulation für diese Gruppe sowohl in der automatisierten Bedingung als auch in der manuellen Bedingung auf „Nacht“ umgestellt. Hierdurch änderte sich die Beleuchtung der Simulation und alle Fahrzeuge wurden mit aktiven Scheinwerfern dargestellt.

Zeitgleich mit dem einsetzenden Starkregen wurde an die Fahrer in den automatisiert fahrenden Versuchsgruppen eine akustische und visuelle Übernahmeaufforderung ausgegeben. Das Design der Übernahmeaufforderung orientierte sich an der Gestaltung solcher Übernahmeaufforderungen in aktuellen Studien und aktuellen Serienfahrzeugen mit teilautomatisierten Funktionen. Die verwendete Symbolik für die verschiedenen Zustände der Automation ist in Tabelle 2 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle 2: Mögliche Zustände der Automation und verwendete Symbolik.**

Das Assistenzsystem ist bereit zur Übernahme der Steuerung (Lenkung, Gas, Bremsen).	Das Assistenzsystem ist aktiv und übernimmt die Überwachung der Umgebung sowie die Steuerung des Fahrzeugs.	Das Assistenzsystem hat eine Situation erkannt, die ein Eingreifen des Fahrers erforderlich macht. Bitte übernehmen Sie die Steuerung des Fahrzeugs.

In der Studie sollte nicht nur die Dauer der Übernahme der manuellen Steuerung nach einer Übernahmeaufforderung evaluiert werden, sondern auch die Fähigkeit der Fahrer nach solch einer Übernahme auf kritische Verkehrssituationen zu reagieren. Zu diesem Zweck wurde für jedes Szenario ein realistisches, kritisches Ereignis implementiert, das zeitlich in dem Bereich lag, kurz nachdem die Fahrer die manuelle Steuerung wieder übernommen hatten. Der Ablauf des Übernahmeszenarios wurde analog zum ersten Studienteil beibehalten, um eine Vergleichbarkeit der Reaktionen der Fahrer aus beiden Studien zu ermöglichen.

Für das in dieser Studie verwendete Wetter-Szenario wurde 175 Meter (ca. 5 Sekunden) nach der Übernahmeaufforderung eine starke Bremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs von 120 km/h auf 80 km/h implementiert. Das vorausfahrende Fahrzeug hatte zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung einen Abstand von ca. 250 Metern zum „Versuchsfahrzeug“. Hierdurch sollte das Bremsen von vorausfahrenden Fahrzeugen als Reaktion auf den einsetzenden Regen nachgebildet werden. Der Abstand von 5 Sekunden nach der Übernahmeaufforderung wurde auf Grundlage der verfügbaren Literatur als Zeitraum gewählt, in dem ein Großteil der Fahrer die Automation bereits abgeschaltet hatten [4].

Die Fähigkeiten der simulierten Automation waren analog zu den Fähigkeiten der durch die Experteninterviews berichteten Automation [4]. Die Automation entsprach weitestgehend der Stufe hochautomatisiertes Fahren nach [1], bzw. der Stufe 3 „Conditional Automation“ nach [2]. Die Automation war auf eine Geschwindigkeit von 120 km/h eingestellt und versuchte, diese Geschwindigkeit unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie des umgebenden Verkehrs zu halten.

Das simulierte Fahrzeug konnte die Spur und den Abstand zu vorausfahrenden Vorderfahrzeugen halten, auf Geschwindigkeitsbegrenzungen reagieren und selbstständig Überholmanöver durchführen, wenn sich ein langsamer fahrendes Fahrzeug in der Spur befand. In dem oben spezifizierten Übernahme-Szenario gab das Fahrzeug eine Übernahmeaufforderung aus. In dem Fall, dass ein Fahrer 10 Sekunden nach einer Übernahmeaufforderung die Automation noch nicht abgeschaltet hatte, wechselte das Fahrzeug in einen risikominimalen Zustand, indem es die Spur hielt und bis zum Stillstand abbremste, bzw. einem vorausfahrenden Fahrzeug in sicherem Abstand folgte.

#### 4. Versuchsablauf

Die Instruktion der Probanden entsprach weitgehend den Instruktionen aus dem ersten Teil der Studienreihe [4], entsprechend werden die Instruktionen hier nur noch einmal kurz zusammengefasst und Unterschiede und Ergänzungen im Vergleich zur vorangegangenen Studie vorgestellt. Die Probanden wurden über die Fähigkeiten der simulierten Automation informiert und ihnen wurde mitgeteilt, dass die Automation 100 Prozent aller Situationen, in denen eine Übernahme notwendig wird, korrekt erkennt und in diesen Situationen warnt. Die Probanden lernten während einer Trainingsfahrt von ca. 12 Minuten sowohl das manuelle Fahren im Simulator als auch das Fahren mit aktiver Automation kennen. Hierzu gehörte auch eine Übernahmesituation, in der die Probanden die akustische und visuelle Warnung im Übernahmefall erlebten und den Prozess der Übernahme der Steuerung einmal üben konnten. Das Aktivieren der Automation erfolgte über den Lenkstockhebel am Lenkrad. Im Falle einer Übernahmeaufforderung konnten die Fahrer die Automation entweder über das Treten der Bremse, oder über den Lenkstockhebel deaktivieren. Die Automation blieb nach einer Übernahmeaufforderung immer so lange aktiv, bis die Probanden die Automation nicht deaktiviert hatten.

Die Probanden wurden gebeten, ihre Mobiltelefone oder sonstigen technischen Geräte nicht mit in den Simulator zu nehmen. Die Probanden in den automatisiert fahrenden Gruppen wurden dahingehend instruiert, dass Sie die Automation nicht dauerhaft überwachen müssen, da im Fall einer Übernahmesituation auf jeden Fall eine Übernahmeaufforderung ausgegeben wird. Es wurde den Probanden aber außer der Beobachtung der Fahrsituation keine weitere Möglichkeit zur Beschäftigung oder Ablenkung gegeben. Fahrern in der manuell fahrenden Gruppe wurde eine „Geschichte“ zur Plausibilisierung der Warnung vorgegeben. Den Probanden wurde gesagt, ihr Fahrzeug besitze ein Assistenzsystem, das potentiell kritische Situationen vorhersehen kann und vor solchen Situationen einen Warnton ausgibt.

Die Probanden in allen Gruppen wurden gebeten, während der Fahrtzeit, außer in Notfällen bzw. beim Auftreten von Übelkeit, nicht über die Gegensprechanlage mit den Versuchsleitern zu sprechen und sich vorzustellen, Sie seien alleine im Fahrzeug. Hierdurch sollte Ablenkung sowie dem Vermeiden von Müdigkeit durch Gespräche vorgebeugt werden. Von den Probanden wurde vor dem Versuch die generelle Erlaubnis eingeholt, Fahrdaten und Videodaten aufzuzeichnen. Den Probanden wurde jedoch nicht explizit erklärt, dass während der Fahrt ihre Müdigkeit über eine auf den Kopf und Oberkörper gerichtete Kamera aufgezeichnet und von den Versuchsleitern bewertet wurde. Weiterhin wurde den Probanden nicht erklärt, dass die Übernahmesituation dynamisch von den Versuchsleitern in Abhängigkeit der gemessenen Müdigkeit ausgelöst wurde. Vielmehr bekamen die Probanden die Coverstory, dass die Anzahl und der Zeitpunkt solcher Übernahmesituationen zufällig vom Computer ausgewählt und nicht durch die Versuchsleiter beeinflussbar sei. Hierdurch sollte vermieden werden, dass Probanden Müdigkeit vortäuschen, um ein schnelleres Ende des Versuchs herbeizuführen. Außerdem sollten Probanden sich entsprechend der Situation in einem eigenen Fahrzeug weitgehend unbeobachtet fühlen. Die Probanden wurden nach dem Ende der Versuchsfahrt von den Versuchsleitern über den Zweck des Versuchs aufgeklärt.

## 5. Versuchspersonen

An der Studie nahmen N = 60 Versuchspersonen im Alter von 18 bis 87 ( $M = 41.3$ ,  $SD = 21.1$ ) Jahren teil. Der Anteil der jüngeren Fahrer im Alter von 18 bis 35 Jahren lag bei 48 Prozent, Fahrer im mittleren Alter (36-55 Jahre) machten einen Anteil von 25 Prozent aus und ältere Fahrer (55+) waren mit einem Anteil von 27 Prozent in der Stichprobe repräsentiert. In der Stichprobe waren 38 Personen (63 Prozent) männlich und 22 Personen (37 Prozent) weiblich. Etwa 75 Prozent der Teilnehmer hatten bereits Erfahrungen mit Assistenzsystemen der Längs- und/oder Querführung gesammelt. Etwas über die Hälfte der Teilnehmer hatte bereits mindestens einmal an einer Fahrsimulator-Studie teilgenommen. Keiner der Teilnehmer hatte im ersten Teil dieser Studienreihe an den Fahrversuchen teilgenommen, sodass das verwendete Übernahmeszenario für alle Teilnehmer unbekannt war.

## 6. Erhobene Daten

Die erhobenen Daten in der vorliegenden Studie entsprachen den Parametern, die im ersten Teil der Studienreihe aufgezeichnet und ausgewertet wurden [4]. Zusätzlich zu den Reaktionszeiten, Fahrdaten und Blickbewegungsdaten wurden in dieser Studie noch von geschulten Bewertern im Verlauf der Fahrt regelmäßig Müdigkeits-Indikatoren erhoben.

### 6.1. Müdigkeitsmessung

Um die Müdigkeit und die Ermüdung der Fahrer im Verlauf der Fahrtzeit aufzuzeichnen, wurden alle Versuchsleiter in einem Müdigkeitsbewertungsverfahren geschult. Die Grundlage für diese Schulung entsprach der Vorlage von Wierwille und Ellsworth [5] sowie der Weiterentwicklung von Wiegand [6]. Dazu gehörten schriftliche Unterlagen mit Beschreibungen der objektiven Indikatoren von Müdigkeit als auch Videoausschnitte aus Naturalistic Driving – Studien. Die Videoausschnitte zeigten Beispiele für alle möglichen Müdigkeitsindikatoren anhand von verschiedenen Personen.

Die Fahrermüdigkeit wurde während der Versuchsfahrten von den Bewertern über eine hochauflösende Infrarotkamera beobachtet, die auf das Gesicht und den Oberkörper der Probanden gerichtet war. Die Indikatoren für Müdigkeit (z.B. lange Lidschlüsse, Gähnen, Reiben des Gesichts) wurden jeweils in Abständen von 5 Minuten über eine Dauer von einer Minute mithilfe eines Beobachtungsbogens ausgezählt. Die Einstufung der Müdigkeit auf einer Skala von 0 (wach) bis 8 (sehr starke Müdigkeit) wurde anschließend anhand der gewichteten Anzahl der gezählten Indikatoren für diesen Zeitraum vorgenommen. Tabelle 3 listet die Müdigkeitsindikatoren auf, die für die unterschiedlichen Abstufungen der Müdigkeit in dieser Studie von den Bewertern erfasst wurden.

**Tabelle3: Müdigkeitsstufen und erfasste objektive Müdigkeitsindikatoren für jede Stufe.**

Müdigkeits-Stufe	Müdigkeits-Indikatoren
0 - wach	Schnelle Lidschlüsse, unauffälliges Lidschlussverhalten, kontinuierliche Blickwechsel, Aufrechte Sitzposition, Schnelle Sakkaden, Lenkradhaltung „10 vor 2“
1 – leichte Müdigkeit (-)	Verlangsamter Lidschluss bis zu 0.5 Sekunde, müder
2 – leichte Müdigkeit (+)	Gesichtsausdruck, Gähnen, Reiben/Kratzen im Gesicht, Gesicht verziehen, Kopf schieflegen/abstützen
3 – mittlere Müdigkeit (-)	Lange Lidschlüsse (ca. 0.5-1 Sekunde), Augen
4 – mittlere Müdigkeit (0)	starren/glasiger Blick ohne Blinzeln (Dauer > 3 Sekunden), Strecken/Räkeln, Augen halb geöffnet
5 – mittlere Müdigkeit (+)	
6 – starke Müdigkeit (-)	Sehr lange Lidschlüsse (1-2 Sekunden), Wegrollen der
7 – starke Müdigkeit (+)	Augen, Kopfnicken
8 – sehr starke Müdigkeit	Lidschluss > 2 Sekunden, Sekundenschlaf, Aufschrecken

Anmerkung: Die Feinabstufungen der Müdigkeit (+/-) wurden jeweils für die Grobkategorien der Müdigkeit anhand der Häufigkeit des Auftretens der einzelnen Indikatoren innerhalb des Bewertungszeitraum von einer Minute vorgenommen.

Erreichten Fahrer in der Versuchsbedingung mit Schlafdefizit die Müdigkeitsstufe 3, wurde eine Übernahmeaufforderung ausgelöst. Im Gegensatz zu der Versuchsbedingung, in denen Fahrer ausreichend Schlaf in der vorausgegangenen Nacht gehabt hatten, wurde die Müdigkeit hier also teilweise für kürzere Abschnitte aufgezeichnet. Fahrer, die die Fahrt beendet hatten, weil die Versuchsleiter die Übernahmeaufforderung ausgelöst hatten, wurden in den Daten als „ausgeschieden“ klassifiziert. Die Übernahmeaufforderung wurde in allen Versuchsbedingungen frühestens nach einer Fahrdauer von 15 Minuten und spätestens nach einer Fahrtzeit von 60 Minuten (lange Fahrtzeit) ausgelöst.

## 6.2. Reaktionszeiten

Als Maß für die Dauer der Übernahme der manuellen Steuerung nach einer Übernahmeaufforderung wurden die Reaktionszeiten der Fahrer erfasst. Einige dieser Reaktionszeiten beziehen sich hierbei auf Zeiten, die aus Videobebobachtungen abgeleitet wurden, bzw. die sich aus den im Fahrsimulator aufgezeichneten Fahrdaten ergaben. Zusätzlich wurden aus den mit einem Blickerfassungssystem erhobenen Blickbewegungsdaten

Reaktionszeiten abgeleitet. Die Endzeitpunkte für die Reaktionszeiten sowie die Kriterien für die Messung sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Allgemein wurde der Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung als Startpunkt für die Reaktionszeitmessung gewählt. Dieser Zeitpunkt ließ sich auch für die manuellen Fahrer verwenden, da manuelle Fahrer in dieser Versuchsbedingung zum gleichen Zeitpunkt wie die automatisiert fahrenden Fahrer eine Warnung bekamen und der Zeitpunkt der Warnung bzw. Übernahmeaufforderung somit für alle Versuchsteilnehmer gleich war. Die Start- und Endpunkte für die Reaktionszeitmessungen wurden im ersten Berichtsteil auf Grundlage der verfügbaren Literatur definiert und sind dort ausführlicher berichtet [4]. Für diese Studie wurden die Kriterien für die Reaktionszeitmessungen vollständig aus dem ersten Berichtsteil übernommen [4].

**Tabelle 4: Definierte Reaktionszeiten und Endzeitpunkte der Reaktionszeitmessungen.**

Reaktionszeit	Endzeitpunkt der Reaktionszeitmessung
Eyes on Road	Blickfokus eindeutig auf der Straßenmitte (abgeleitet aus Blickbewegungsmessung)
Hands On	Mindestens eine Hand umfasst vollständig das Lenkrad (abgeleitet aus Videobeobachtung)
Feet On	Der rechte Fuß berührt das Gas- oder Bremspedal bzw. der rechte Fuß verharrt reaktionsbereit unmittelbar über dem Bremspedal (abgeleitet aus Videobeobachtung)
Automation Off	Die Automation ist über die Verwendung des Bremspedals bzw. über das ziehen des Lenkstockhebels hinter dem Lenkrad vom Fahrer deaktiviert worden
Brake Reaction	Das Bremspedal ist nach dem Zeitpunkt des Eintretens des kritischen Ereignisses um mindestens 10 Prozent durchgetreten
Gaze Side Mirror	Der erste Blick auf den linken Seitenspiegel nach der Übernahmeaufforderung
Gaze Speed	Der erste Blick auf den Tacho nach der Übernahmeaufforderung

### 6.3. Fahrdaten

Zusätzlich zu den Reaktionszeiten wurden in dieser Studie auch Fahrdaten aus der Fahrsimulation aufgezeichnet, um Maße für die Qualität der Fahrzeugführung nach der Übernahme der manuellen Steuerung zu sammeln. Die hier erhobenen und ausgewerteten Daten waren analog zu den Fahrdaten, die in Teil 1 dieser Studienreihe aufgenommen wurden [4]. Fahrdaten umfassten unter anderem den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug nach der Übernahmeaufforderung, den minimalen Abstand zum Vorderfahrzeug während der Übernahmesituation sowie die gewählte Geschwindigkeit während der Übernahmesituation. Zusätzlich wurden Parameter der Querführung und Spurhaltegüte ausgewertet, die die mittlere Abweichung von der Idealspur, die maximalen Querbeschleunigungen und den Zeitpunkt eines Spurwechsels beinhalteten. Auch mögliche Kollisionen mit dem umgebenden Verkehr und die Anzahl der Eingriffe der Automation bei Ausbleiben einer Übernahmereaktion des Fahrers wurden aufgezeichnet.

## 7. Ergebnisse

Es zeigt sich in den Abbildungen 2 bis 4, dass 90 Prozent der automatisiert fahrenden Fahrer nach einer Fahrt, in der sie ein mittleres Müdigkeitslevel erreichten und nicht abgelenkt waren, nach 1 Sekunde das erste Mal den Blick wieder auf die Straße gerichtet hatten, nach 3-4 Sekunden die Hände wieder am Lenkrad und die Füße an den Pedalen hatten und nach 6-7 Sekunden die Automation abschalteten. Untersucht man allerdings als Indikatoren des Situationsbewusstseins für die Fahrsituation den ersten Blick in den Spiegel und den Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige, wurden 12-15 Sekunden benötigt. Diese Reaktionen, die zum Verständnis der aktuellen Verkehrssituation notwendig sind, waren damit um bis zu 6 Sekunden verzögert im Vergleich zur gleichen Situation bei einer manuellen Fahrt. Mit Ausnahme des ersten Blicks auf die Straße sind die Werte müder automatisiert fahrender Fahrer vergleichbar mit einer kurzen, automatisierten Fahrt, bei der der wache Fahrer durch eine motivierende Nebenaufgabe stark visuell, motorisch und kognitiv abgelenkt ist [4].

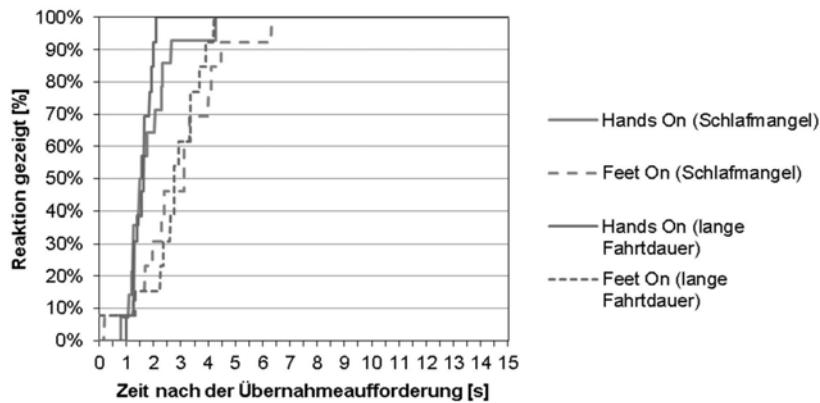


Bild 2: Darstellung der Dauer der Bewegungen zu den Stellteilen Lenkrad und Pedale nach einer Übernahmeaufforderung.

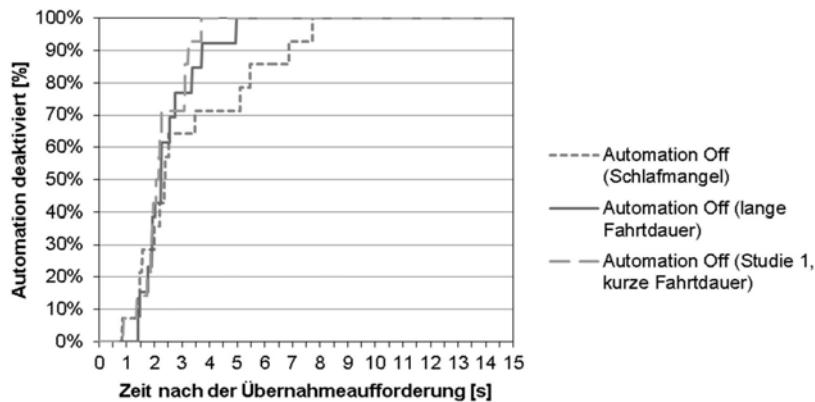


Bild 3: Darstellung der Reaktionszeiten bis zur Deaktivierung der Automation nach einer Übernahmeaufforderung.

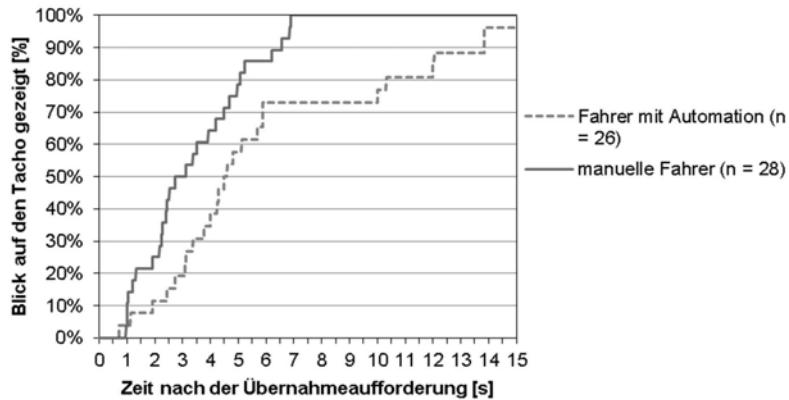


Bild 4: Darstellung der Reaktionszeiten bis zum ersten Blick auf den Tacho nach einer Übernahmeaufforderung/Warnung.

### 7.1. Müdigkeitsverlauf

Besonders kritisch ist in diesem Kontext, dass auch die automatisiert fahrenden Fahrer, die normal geschlafen hatten und tagsüber an der Studie teilnahmen, nach einer Fahrtzeit von ca. einer Stunde von den Bewertern als im Durchschnitt ähnlich müde eingeschätzt wurden wie die Fahrer, die in der Nacht zuvor kürzer geschlafen hatten. Diese automatisiert fahrenden Fahrer, die zu wenig geschlafen hatten, erreichten einen vergleichbaren Müdigkeitslevel bereits nach ca. 15-20 Minuten. Im Gegensatz hierzu wurden die manuellen Fahrer ohne Schlafdefizit auch nach einer Fahrzeit von einer Stunde als wenig bis gar nicht müde eingestuft. Manuelle Fahrer mit Schlafdefizit erreichten einen vergleichbaren Müdigkeitslevel nach ca. 35-40 Minuten. Allgemein erreichten die Fahrer in den automatisierten Gruppen damit einen höheren Müdigkeitslevel als die manuellen Fahrer, und sie erreichten diesen Müdigkeitslevel außerdem früher (siehe Abbildung 5 und 6). Einige dieser automatisiert fahrenden Fahrer schlossen für längere Zeit die Augen oder schliefen sogar ein. Für die folgenden Abbildungen gilt, dass die Kategorie „ausgeschieden“ die Teilnehmer bezeichnet, die in der Versuchsbedingung mit Schlafdefizit mindestens das Müdigkeitslevel „3 – Mittlere Müdigkeit“ erreicht hatten und die Versuchsleiter daher die Übernahmeaufforderung ausgelöst hatten.

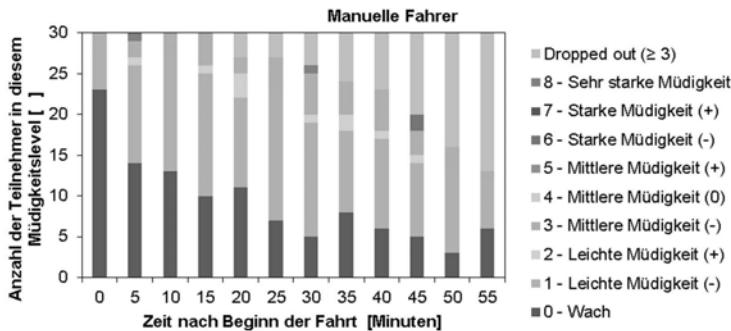


Bild 5: Verlauf der Müdigkeitsbewertungen der Testfahrer in der Versuchsbedingung manuelles Fahren (mit und ohne Schlafdefizit) über die Fahrdauer.

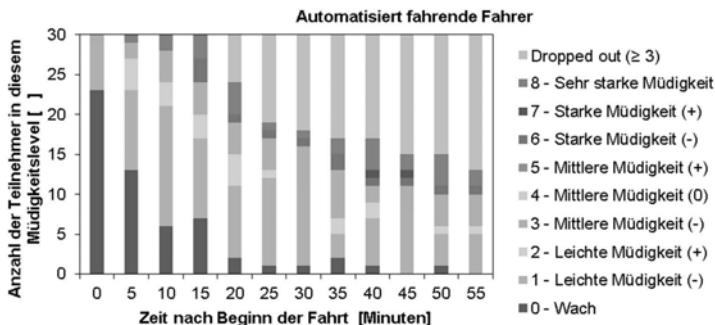


Bild 6: Verlauf der Müdigkeitsbewertungen der Testfahrer in der Versuchsbedingung automatisiertes Fahren (mit und ohne Schlafdefizit) über die Fahrdauer.

Auf Grundlage der grafischen Aufbereitung der Müdigkeitsverläufe der einzelnen Versuchsgruppen (siehe Abbildungen 7) kann davon ausgegangen werden, dass die von den Bewertern beurteilte Müdigkeit allgemein im Verlauf der Fahrt zunahm. Diese Zunahme war stärker ausgeprägt für die automatisiert fahrenden Fahrer als für die manuellen Fahrer. Zusätzlich wurde der Effekt durch die vorherige Anwesenheit eines Schlafdefizits verstärkt. Fahrer im automatisierten Fahrmodus scheinen also besonders anfällig für Fahrermüdigkeit zu sein. Zwar zeigten auch manuelle Fahrer mit Schlafdefizit im Verlauf der Fahrt deutliche Anzeichen von Fahrermüdigkeit, bezogen auf die vorliegende Stichprobe trat diese Müdigkeit aber langsamer ein als bei automatisiert fahrenden Fahrern. Besonders kritisch ist, dass selbst

bei automatisiert fahrenden Fahrern ohne Schlafdefizit bereits nach relativ kurzen Fahrt dauern hohe Level von Müdigkeit gefunden wurden, die so bei den manuellen Fahrern ohne Schlafdefizit nur sehr selten vorkamen.

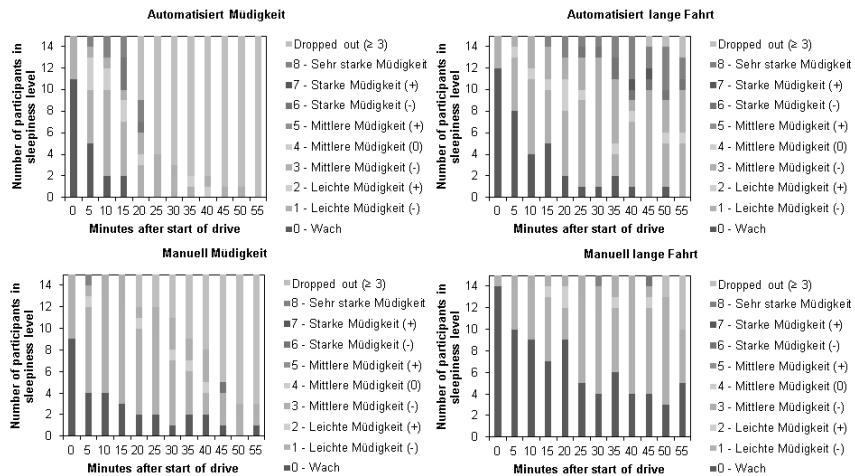


Fig. 7: Verlauf der Müdigkeitsbewertungen der Testfahrer in den Versuchsbedingung automatisiertes Fahren mit Schlafmangel, automatisiertes Fahren ohne Schlafmangel, manuelles Fahren mit Schlafmangel und manuelles Fahren ohne Schlafmangel (von links oben nach rechts unten) über die Fahrt dauer.

## 8. Einschränkungen und offene Fragestellungen

Die den Einschätzungen zugrunde liegende Studie wurde in einem statischen Fahrsimulator mit Probanden im Alter von 18 bis 87 Jahren ( $M = 41.3$ ,  $SD = 21.1$ ) Jahren durchgeführt. Die Reaktionen unterscheiden sich möglicherweise in einem realen Fahrzeug und bei deutlich älteren oder jüngeren Probanden. Der Schlafentzug, dem die Probanden in dieser Studie ausgesetzt waren, induzierte keine extremen Müdigkeitslevel in denen z.B. Sekundenschlaf-Episoden, das Wegrollen der Augen oder das Wegnickeln des Kopfes auftreten. Vielmehr sollte eine realistische Müdigkeit bei einer Abend-Fahrt nach einer Nacht mit zu wenig Schlaf abgebildet werden. Extremere Reaktionen, längere Reaktionszeiten und ein schnelleres Erreichen der hohen Müdigkeitslevels können durch diese Studie bei noch kürzerer Schlafdauer oder einem über mehrere Tage angehäuften Schlafdefizit nicht ausgeschlossen werden. Da solche angehäuften Schlafdefizite aber gerade bei Schichtarbeitern oder Berufskraftfahrern häufig auftreten, sollten zukünftige Studien auch stärkere Schlafdefizite berücksichtigen.

## 9. Fazit

Eine hochautomatisierte Fahrt ohne Nebentätigkeiten sollte eine Dauer von 15 Minuten nicht überschreiten. Längere Fahrdauern ohne Unterbrechung sind als nicht sicher einzustufen, da Fahrer nicht in der Lage sind, eine monotone Fahraufgabe über einen längeren Zeitraum zu überwachen ohne zu ermüden und der Zustand des Fahrers durch technische Systeme nicht mit letzter Sicherheit bewertet werden kann. Im müden oder ermüdeten Zustand benötigen Fahrer für die Übernahme der Kontrolle vergleichbar lang wie Fahrer, die durch eine motivierende Nebentätigkeit stark abgelenkt sind.

Fahrer sind nach einer hinreichend langen Vorwarnzeit auch im müden Zustand oder nach einer langen Fahrt grundsätzlich in der Lage, Fahrsituationen nach einer Übernahmeaufforderung vergleichbar gut zu bewältigen wie manuell fahrende Personen. Eine hinreichende Vorwarnzeit für den überwiegenden Teil der Fahrer liegt nach einer Fahrdauer von mehr als 30 Minuten bzw. bei einem müden Fahrer und einer Fahrdauer von mehr als 15 Minuten bei 12-15 Sekunden. Fahrer schalteten zwar selbst die Automation deutlich schneller (nach 6-7 Sekunden) aus und konnten auch ähnlich gut auf kritische Situationen reagieren wie bei einer manuellen Fahrt, für ein umfassendes Verständnis der Verkehrssituation wird aber nach dem Abschalten zusätzliche Zeit (6-7 Sekunden) benötigt.

Die Überwachung des Zustands des Fahrers während der automatisierten Fahrt und die Berücksichtigung des Fahrerzustands bei der Entscheidung über die Dauer einer sicheren und komfortablen Übernahme ist somit essentiell für die Sicherheit beim Übergang aus einem automatisierten Modus zurück zum manuellen Fahren. Zusätzlich sollten die Gefahren der Ablenkung durch Nebenaufgaben bei automatisiert fahrenden Fahrern gegen die Gefahr des Einschlafens während einer automatisierten Fahrt abgewogen werden. Im Gegensatz zum manuellen Fahren, könnte es bei automatisierten Fahrten sogar sinnvoll sein, wenn Fahrer durch eine vom Fahrzeug kontrollierbare Nebenaufgaben zur Vermeidung von Müdigkeit abgelenkt sind.

## Literatur

- [1] Gasser, T. M., & Westhoff, D. (2012). BASt-study: Definitions of automation and legal issues in Germany. In Proceedings of the 2012 Road Vehicle Automation Workshop.
- [2] SAE, Society of Automotive Engineers (2014). Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. Surface Vehicle Information Report J3016, 1-12. [http://standards.sae.org/j3016\\_201401/](http://standards.sae.org/j3016_201401/), online abgerufen am 28.02.2017.
- [3] Krueger, H. P., Grein, M., Kaussner, A., & Mark, C. (2005). SILAB - A task-oriented driving simulation. In Proceedings of the driving simulator conference (DSC). Orlando (pp. 232-331).
- [4] Vogelpohl, T., Kühn, M., Hummel, T., Gehlert, T., & Vollrath, M. (2016). Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung. Teil 1: Review der Literatur und Studie zu Übernahmezeiten. *Forschungsbericht Nr. 39*, Berlin: Unfallforschung der Versicherer, GDV.
- [5] Wierwille, W. W., & Ellsworth, L. A. (1994). Evaluation of driver drowsiness by trained raters. *Accident Analysis & Prevention*, 26(5), 571-581.
- [6] 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 Reports (NSTSCE, VTTI), 40.



# Die Angemessenheit der Risikowahrnehmung des Fahrers – ein Beitrag zum automatisierten Fahren

Dr. G. Weller, Chr. Strümpler, TAKATA AG, Berlin;  
J.-C. Lenk, Dr. A. Lüdtke, Humatects GmbH, Oldenburg

## Kurzfassung

In einem experimentellen Ansatz wurden im Fahrsimulator bei unterschiedlichen Überholsituationen neben Fahrdaten auch physiologische Maße und das subjektive Risiko erhoben. Nach der Untersuchung der Wirksamkeit der experimentellen Bedingungen auf die erhobenen Maße, erfolgte eine Modellierung des subjektiven Risikos mit Dynamischen Bayes'schen Netzen. Ziel dieses Ansatzes war die Vorhersage des subjektiven Risikos. Bei einer möglichen Integration dieses Ansatzes u.a. beim automatisierten Fahren, ist eine Erhöhung der Akzeptanz und der Verkehrssicherheit zu erwarten. Die Ergebnisse zeigen zunächst den Einfluss der Umsetzung der experimentellen Variation und in der eigentlichen Modellierung gute Ergebnisse. Diese sollen in nachfolgenden Schritten weiter verbessert werden und so einen Beitrag zum automatisierten Fahren liefern.

## 1. Hintergrund

Insbesondere auf der Manöverebenen steuert das subjektive Risiko die Handlungen des Fahrers und ist damit eine zentrale Komponente der Verkehrssicherheit. Stimmen subjektives und objektives Risiko nicht überein, kann es zu unangemessenen oder gefährlichen Fahrerhandlungen kommen [1]. Eine situationsangepasste Rückmeldung zum objektiven Risiko an den Fahrer ist über die Erfassung der tatsächlichen Verkehrssituation möglich. Erfolgt diese Rückmeldung an den Fahrer jedoch ohne Berücksichtigung des subjektiven Risikos, bildet sie möglicherweise selber die Ursache für eine potentiell kritische Fahrerablenkung oder führt zu Reaktanz. Für die Entwicklung des automatisierten Fahrens kann die Angemessenheit des subjektiven Risikos in Übernahmesituationen (Level 3 und 4) und in den folgenden Phasen des manuellen Fahrens - das dann weniger geübt sein wird - eine entscheidende Rolle zur Verwirklichung der Sicherheitsziele des automatisierten Fahren spielen. Im Folgenden wird dargestellt, wie über die Modellierung von Daten, die in einem experimentellen Ansatz im Fahrsimulator gewonnen wurden, eine Abschätzung des subjektiven Risikos möglich ist. Unter Einbeziehung weiterer Schritte ermöglicht dies die Entwicklung einer angemessenen Rückmeldung an den Fahrer und stellt damit einen Beitrag zur Akzeptanz des automatisierten Fahrens dar.

## 2. Experimenteller Aufbau und Methoden

Die Versuche fanden im statischen Fahrsimulator der TAKATA AG in Berlin statt. In diesem Simulator dient eine erweiterte Vierelkarosse eines realen PKW als Mockup, die Simulationssoftware SILAB (WIVW GmbH) wird mit einer drei-kanaligen Projektion auf drei Projektionsflächen dargestellt.

Im hier dargestellten Versuch bestanden sowohl das Instrument Cluster als auch die beiden Außenspiegel und der Innenspiegel jeweils aus einem Display. In den Spiegel-Displays wurde die entsprechende Spiegelansicht der Simulationssoftware dargestellt, im Display des Instrument Clusters das für den experimentellen Aufbau entworfene HMI (s. Abbildung 2). In Abbildung 1 ist eine exemplarische Versuchssituation dargestellt. Zusätzlich zu diesen Displays war auf der Mittelkonsole ein Tablet montiert (Microsoft Surface Pro 3, 12'') auf dem in entsprechenden experimentellen Bedingungen (Übersicht siehe Tabelle 1) eine Surrogate Reference Task (SURT) in einer Version des DLR Braunschweig (DominionSURT [2]) dargeboten wurde. Diese Aufgabe wird in einigen Bedingungen als visuell motorische Ablenkung verwendet (s. Tabelle 1).



Bild 1: Exemplarische Ansicht des Versuchsaufbaus

Tabelle 1: Experimentelle Bedingungen

		Ablenkung		
		Visuell (SURT)	Akustisch / kognitiv einfach (0-back)	Akustisch / kognitiv schwer (2-back)
HMI	Nicht-adaptiv	1	4	5
	Adaptiv	2		
	Adaptive Automation	3		

Die Bedingungen mit kognitiver Ablenkung (Tabelle 1) wurden über die Verwendung einer n-back-Aufgabe (Delayed Digital Recall Task des MIT [3] [4]) umgesetzt. Die Zeit zwischen zwei akustisch eingespielten Zahlen betrug etwa drei Sekunden, die Darbietung erfolgte jeweils in Zehnerblöcken mit einer Pause von zwölf Sekunden zwischen zwei Blöcken.

Zur Erhebung der Blickdaten wurde das Kopfbasierte Dikablis System (Ergoneers GmbH) verwendet. Zur Zuordnung der Blickdaten zu ausgewählten Arealen wurden Marker sowohl in der Simulation als auch an den relevanten Orten im und am Fahrzeug (Spiegel, Instrument Cluster, Mittelkonsole) platziert.



Bild 2: Das HMI im Instrument Cluster im automatischen Modus mit Übernahmeaufforderung und Marker für das Eye-tracking System.

Weiter wurden verschiedene physiologische Parameter erhoben. Basierend auf ihrer Relevanz zur Erfassung von Beanspruchung und Erregtheit [5] wurden hier die Herzrate (HR) in Schlägen pro Minute (beats per minute, bpm), die nicht-spezifischen Fluktuationen des Hautleitwertes (non-specific fluctuations, NSFs) und die Atemrate (respiration rate, RR) erhoben. Die hier berichteten Daten wurden über einen mit entsprechender Sensorik verbundenen Varioport (Becker Meditec, Karlsruhe) aufgenommen. Als Sensor zur Erfassung der Atmung diente ein in einen Brustgurt integrierter geschwungener Draht und dessen - sich mit der Atmung ändernden - Längen- und daraus resultierenden Induktivitätsänderung. Die elektrodermale Aktivität wurde mittels Trockenelektroden an der linken Hand erhoben, das Elektrokardiogramm wurde mit drei Elektroden (je eine am oberen und unteren Ende des Brustbeins und eine in Höhe der Herzspitze) erhoben. Basierend auf den extrahierten R-Zacken wurde die Herzrate berechnet.

Neben der Erfassung mit Hilfe des Varioport erfolgte zusätzlich die Aufnahme des EKG und der elektrodermalen Aktivität über ein Vital Sign Steering Wheel (VSStW) der TAKATA AG.

Neben der Variation der Belastung über die SURT und die n-back-Aufgabe, wurde der Grad der Adaptivität variiert: während in der nicht-adaptiven Bedingung die Darbietung der Nebenaufgaben unabhängig von der Situation erfolgte, wurden diese in der adaptiven Bedin-

gung bei Vorliegen einer kritischen Situation und gleichzeitigem Vorliegen von Nichtaufmerksamkeit unterbrochen. Nichtaufmerksamkeit wurde über die Auswertung der Blickdaten und der Fahrereingaben in Echtzeit erhoben und war wie folgt definiert: wurde entweder die SURT innerhalb der letzten zwei Sekunden bedient oder war der Fahrerblick innerhalb der letzten fünf Sekunden für einen Zeitraum von mindestens einer Sekunde auf die SURT gerichtet, wurde der Fahrer als abgelenkt klassifiziert.

Um gleichzeitig eine hohe Bandbreite und eine systematische Variation der Gefährlichkeit zu erzielen, wurden Überholsituationen auf der Autobahn mit unterschiedlicher objektiver Gefährlichkeit in der Simulation umgesetzt. Objektive Gefährlichkeit kann hier einerseits verstanden werden als Ausmaß des Absicherungsaufwands (kein vs. ein von hinten kommendes Fahrzeug) und andererseits als Anstieg der Unfallwahrscheinlichkeit bei Nichteingreifen des Fahrers. Die schematische Überholsituation ist in Abbildung 3 dargestellt, Tabelle 2 gibt die Variation der Situationen wieder. Sowohl die Darbietung der Bedingungen als auch die Darbietung der Situationen erfolgte quasi-randomisiert.

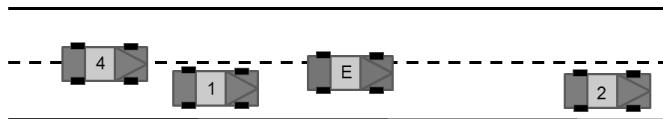


Bild 3: Schematische Darstellung der relevanten Überholsituation mit von hinten kommendem Fahrzeug 4 (E = Ego-Fahrzeug).

Tabelle 2: Variation und Benennung der Überholsituationen  
(Fahrzeugnummern laut Abbildung 3).

	Ohne sich von hinten nähерndes Fahrzeug	Mit sich langsam [...] näherndem Fahrzeug 4	Mit sich schnell [...] näherndem Fahrzeug 4
Langsam bremsendes Fahrzeug 2 vor Ego	A	B	C
Stark bremsendes Fahrzeug 2 vor Ego	D	E	F

Neben den Verkehrs- und Fahrdaten aus der Simulation, den physiologischen Daten wie oben beschrieben und den Blickdaten, wurde das subjektive Risiko für jede der in Tabelle 2 genannten Situationen erfragt. Hierzu wurde eine von [6] zur Erfassung der Kontrollierbarkeit bei Eingriff eines Assistenzsystems entwickelte Skala an die Erfassung der subjektiven Gefährlichkeit angepasst (Abbildung 4).

Zur Erfassung der subjektiven Gefährlichkeit wurden die Probanden nach jeder Überholssituation vom Versuchsleiter über Lautsprecher zur Einschätzung der Gefährlichkeit nach Abbildung 4 befragt.

<b>Extrem·gefährlich·und·nicht·kontrollierbar¤</b>	10¤
Gefährlich·und·schlecht·kontrollierbar¤	9¤
	8¤
	7¤
Gefährlich,·aber·kontrollierbar¤	6¤
	5¤
	4¤
Gering·gefährlich·und·sehr·gut·kontrollierbar¤	3¤
	2¤
	1¤
<b>Absolut·ungefährlich¤</b>	0¤

Bild 4: Zehnstufige Skala zur Erhebung der subjektiven Gefährlichkeit (basierend auf [6]).

Zusätzlich wurde die Beanspruchung der Probanden nach Ende jeder Bedingung mit dem NASA TLX [7] erhoben.

Tabelle 3: Verteilung der Probanden in der Stichprobe

Geschlecht		Altersgruppe			
		18-24	25-40	41-54	55+
	Weiblich [N]	5	5	5	5
	Männlich [N]	5	5	5	5

Die Stichprobe bestand aus 40 Probanden, die sich in Anlehnung an die NHTSA [8] wie in Tabelle 3 dargestellt nach Alter und Geschlecht aufgeteilt haben.

### 3. Datenaufbereitung und Datenauswertung

Vor der eigentlichen Auswertung der Daten erfolgte deren Aufbereitung. Hierfür wurden die Überholssituationen in verschiedene Abschnitte unterteilt. Als relevant für die Erhebung des Risikos wurde hierzu der Bereich definiert, bei dem zum ersten Mal eine Überholabsicht erkennbar war, bis zu dem Zeitpunkt, an dem sich das Ego-Fahrzeug neben dem zu überho-

lenden Fahrzeug befand. Eine Überholabsicht wurde definiert als Zeitpunkt, bei dem entweder der Blinker betätigt wurde, oder der Lenkwinkel zum ersten Mal  $1,72^\circ$  überschritt.

Innerhalb dieses Bereiches wurden verschiedene Maße der objektiven Gefährlichkeit ausgewertet. Auch wegen seiner Nähe zum subjektiven Risiko [9] wurde als Maß der objektiven Gefährlichkeit die minimale time-to-collision (min TTC) innerhalb des oben genannten Bereiches ausgewählt.

Die beschriebenen physiologischen Daten wurden für den ausgewählten Bereich gemittelt.

Mögliche fehlende Werte wurden für alle Daten durch – nach Bedingungen und Situationen getrennte - Mittelwerte ersetzt.

Die so aufbereiteten Daten wurden im Weiteren auf Unterschiede sowohl zwischen den Bedingungen als auch zwischen den Situationen untersucht. Vor der eigentlichen statistischen Auswertung der Daten wurden die Voraussetzungen insbesondere auf Normalverteilung sowie Schiefe und Kurtosis mit dem Shapiro-, dem Agostino- und dem Anscombe-Test geprüft [10]. Bei Nichtvorliegen der Voraussetzungen werden zusätzlich zu den parametrischen Verfahren die Ergebnisse von nicht-parametrischen Verfahren berichtet.

Nach Auswertung von Unterschieden zwischen Bedingungen und Situationen wurden die Zusammenhänge zwischen den Daten mit Korrelationsanalysen untersucht. Abschließend wurden die Daten mit Hilfe von Bayes'schen Netzen einer Modellierung unterzogen. Ziel dieses zentralen Schrittes war eine Modellierung und Erfassung der subjektiven Gefährlichkeit basierend auf der objektiven Gefährlichkeit und den physiologischen Daten.

### **3.0 Effekt der Adaptivität auf die Beanspruchung**

Zunächst wurde global untersucht welchen Einfluss die experimentellen Bedingungen auf die Beanspruchung der Probanden hatten. Exemplarisch wird hier die Beanspruchung der Probanden getrennt nach der adaptiven und der nicht-adaptiven Bedingung berichtet. Hier zeigen sich die erwarteten Effekte: die nicht-adaptive Bedingung wurde als signifikant anstrengender erlebt als die adaptive Bedingung (t-Test für Messwiederholung:  $t = -12.38$ ,  $df = 40$ ,  $p < .001^{**}$ ).

### **3.1 Einfluss der experimentellen Bedingungen auf die objektive Gefährlichkeit**

Im nächsten Schritt wurden die Daten wie beschrieben nach Abschnitten innerhalb der einzelnen Überholsituationen aufgeteilt und innerhalb dieser Abschnitte die relevanten Kenngrößen extrahiert. In Abbildung 5 ist die minimale TTC zu allen Fahrzeugen als Maß der objektiven Gefährlichkeit dargestellt.

Die Daten wurden mit einer ANOVA ausgewertet, aufgrund der Verletzung der Sphärizität (signifikante Mauchley-Test) werden die nach Greenhouse-Geisser korrigierten Freiheitsgrade berichtet: sowohl der Effekt der Bedingung als auch der Effekt der Situation und die

Wechselwirkung waren signifikant (Bedingung:  $F_{(3,32; 136,11)} = 4,12$ ;  $p<.001^{**}$ ; Situation:  $F_{(3,68; 150,75)} = 27,27$ ;  $p<.001^{**}$ ; Interaktion Bedingung \* Situation ( $F_{(11,77; 482,59)} = 2,01$ ;  $p<.01^{**}$ ).

Als post-hoc Tests wurden t-Tests mit Korrektur nach Bonferroni gerechnet. Für die Bedingung zeigten sich hierbei lediglich zwischen der Bedingung 2 (adaptiv) und der automatisierten Bedingung 3, sowie zwischen der Bedingung 2 und der Bedingung 4 (0-back) signifikante Unterschiede ( $p<.05$ ), jeweils mit niedrigeren minimalen TTC-Werten in der Bedingung 2.

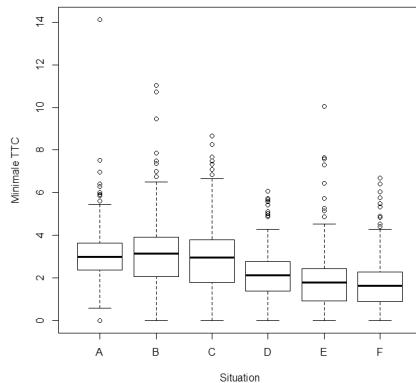


Bild 5: Objektives Risiko (minimale TTC) getrennt nach Situationen (siehe Tabelle 2).

Für die Situation zeigten sich hoch signifikant höhere minimale TTC Werte jeweils für die Situationen A, B und C zu den Situationen D, E und F, bei denen das vorausfahrende Fahrzeug stark abbremste.

### 3.2 Einfluss der experimentellen Bedingungen auf die subjektive Gefährlichkeit

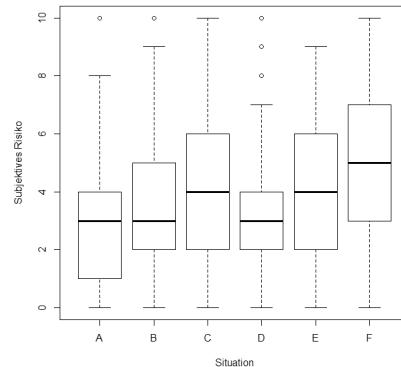


Bild 6: Subjektives Risiko getrennt nach Situationen.

Für die Auswertung der subjektiven Gefährlichkeit zeigte sich sowohl ein signifikanter Effekt der Bedingung als auch der Situation, jedoch kein signifikanter Wechselwirkungseffekt (Bedingung:  $F_{(3,22; 132,18)} = 9,16; p < .05^*$ ; Situation:  $F_{(3,61; 148,01)} = 21,76; p < .05^*$ ).

Für den Effekt der Bedingung zeigten die post hoc gerechneten paarweisen t-Tests eine signifikant niedrigere subjektive Gefährlichkeit in der Bedingung 4 (0-back) im Vergleich zu allen anderen Bedingungen (jeweils  $p < .001$ ).

Für die Situation ergaben die post-hoc Tests signifikant niedrigere Bewertungen der subjektiven Gefährlichkeit für die Situationen A und D (ohne sich von hinten nähertes Fahrzeug) im Vergleich zu den Situationen C, E und F (jeweils  $p < .001$ ).

### 3.3 Einfluss der experimentellen Bedingungen auf die physiologischen Daten

Die Auswertung der physiologischen Daten folgt der Auswertung nach Abschnitten der vorangegangenen Variablen.

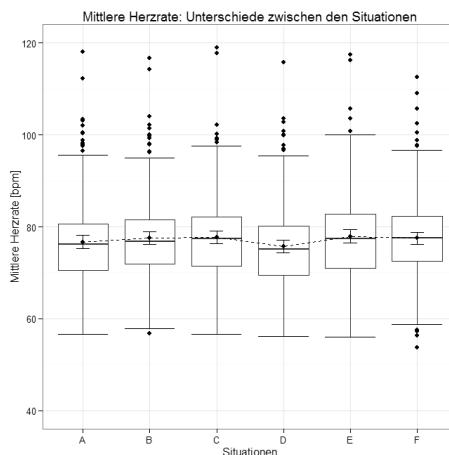


Bild 7: Mittlere Herzrate (HR in bpm) für die ausgewählten Abschnitte in den einzelnen Situationen.

In Abbildung 7 sind beispielhaft die Werte der mittleren Herzrate getrennt nach Situationen dargestellt. Für diese Variable ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen, jedoch signifikante Unterschiede zwischen den Situationen ( $F_{(4,11; 160,36)} = 9,78; p < .01^{**}$ ) und ein signifikanter Wechselwirkungseffekt Situation \* Bedingung ( $F_{(9,41; 366,97)} = 2,38 p < .01^{**}$ ). Die post-hoc Auswertung ergab dagegen keine signifikanten Unterschiede zwischen einzelnen Situationen.

Ähnliche Ergebnisse ergaben sich für die Auswertung der nicht-spezifischen Fluktuationen des Hautleitwertes und der Atemrate. Für beide Variablen zeigten sich allerdings signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen (NSFs:  $F_{(3,67; 143,00)} = 5,33$ ,  $p<.001^{**}$ ; RR:  $F_{(3,70; 144,27)} = 38,13$ ,  $p<.001^{**}$ ). Hier zeigten die post-hoc Daten insbesondere für die Atemrate signifikant niedrigere Werte für die Bedingungen 4 (0-back) und 5 (2-back) im Vergleich zu den drei SURT-Bedingungen 1, 2 und 3.

### **3.4 Zusammenhang zwischen subjektivem und objektivem Risiko**

Für den Zusammenhang zwischen den nachfolgend in der Modellierung verwendeten Daten wurden zunächst einfache Korrelationen nach Pearson und Kendall berechnet. Dieser Berechnung liegen die über alle Probanden, Situationen und Bedingungen aufgetragenen Daten zugrunde. Eine Übersicht der Korrelationsmatrix mit den Korrelationen nach Kendall ist mit markierten Signifikanzen in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Korrelationsmatrix (Kendalls Tau) der in der Modellierung verwendeten Variablen.

	Subjektives Risiko	Mittlere HR	Mittlere NSF	Mittlere RR	Minimale TTC
Subjektives Risiko		0,087**	0,051	0,101**	-0,264**
Mittlere HR	0,087**		0,089**	0,079*	0,046
Mittlere NSF	0,051	0,089**		0,096**	0,065*
Mittlere RR	0,101**	0,079*	0,096**		-0,029
Minimale TTC	-0,264**	0,046	0,065*	-0,029	

Insgesamt bewegen sich die Korrelationen auf relativ niedrigem Niveau werden jedoch – auch bedingt durch die hohen Fallzahlen – überwiegend signifikant und zeigen die erwarteten Vorzeichen. So steigt etwa das wahrgenommene Risiko mit abnehmender TTC.

### **3.6 Modellierung des subjektiven Risikos**

Ziel der im Folgenden dargestellten Modellierung war es, ein Dynamisches Bayes'sches Netz (BN) zu erstellen, das es ermöglicht, eine Abschätzung des subjektiven Risikos vorzunehmen. Die Entscheidung der Modellierung mit Bayes'schen Netzen liegt neben anderen Vorteilen in der guten Verständlichkeit der Darstellung [10] und deren bereits erfolgreichen Anwendung im Verkehrsbereich [11].

Das Dynamische BN besteht aus mehreren Zeitscheiben, die ihrerseits aus einem Sensormodell bestehen. In diesem Sensormodell wird die Statusvariable – hier das subjektive Risiko – mit den Sensorvariablen verbunden. Die Sensorvariablen bestehen aus den bereits beschriebenen Variablen Herzrate (HR), Atemrate (RR), nicht-spezifische Fluktuationen des Hautleitwertes (NSFs) sowie der minimalen TTC als Proxy der objektiven Gefährlichkeit. Als

Grundlage der zeitlichen Trennung der Zeitscheiben, wurde die Latenzzeit für physiologische Daten, die etwa 250ms beträgt, zugrunde gelegt. Somit entspricht die von vier Zeitscheiben abgedeckte Episode einer (Fahr-)zeit von einer Sekunde. Das resultierende BN ist in Abbildung 8 dargestellt.

Die Sensor- und Übergangsmodelle werden von bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben. Im vorliegenden Fall ist das BN ein Hidden Markov Modell, da die jeweilige Zielscheibe nur von der vorherigen abhängig ist.

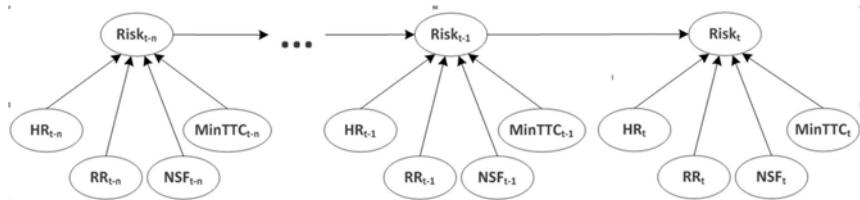


Bild 8: Dynamic Bayes'sches Netz für die Vorhersage des subjektiven Risikos für mehrere Zeitscheiben mit der objektiven Gefährlichkeit (Minimale TTC) und den physiologischen Variablen als Sensorknoten.

Da in den Trainingsdaten für alle Variablen Daten vorlagen, konnte der robuste Algorithmus zur Bayes'schen Parameterschätzung verwendet werden (bnlearn Paket in R [12]). Alle numerischen Beobachtungen der Fahrdaten und physiologischen Daten wurden in Quantile geteilt, um so eine gleiche Verteilung der Beobachtungen in jedem Bin sicherzustellen. Ebenso wurden die ursprünglich in elf Stufen unterteilte subjektive Beurteilung der Gefährlichkeit (siehe Abbildung 4) auf jetzt fünf reduziert.

Zur Validierung des dynamischen Bayes'schen Netzes erfolgte eine zehnfache Kreuzvalidierung, deren Ergebnisse in Tabelle 5 dargestellt sind. Die Vorhersage wurde sowohl getrennt nach allen experimentellen Bedingungen als auch über alle Bedingungen gerechnet. Die Bedingung 3 (adaptive Automation) wurde nicht in die Berechnung aufgenommen, da vermutet wurde, dass die Kombination aus erstmaligem Kontakt mit der Automation in der entsprechenden Situation zu einer Konfundierung der Risikowahrnehmung geführt hat.

Tabelle 5: Ergebnisse der Kreuzvalidierung für die Parameterschätzung des dynamischen Bayes'schen Netzes (Bed. = Bedingung).

	Gesamt	Bed. 1	Bed. 2	Bed. 4	Bed. 5
Beobachtungen	34898	7561	9902	8320	9109
Vohersagefehler ( $Risk_i$ )	0.24	0.069	0.104	0.077	0.108
RSME	0.722	0.423	0.485	0.357	0.54

Für die einzelnen Bedingungen zeigten sich sehr niedrige Fehlerraten von etwa zehn Prozent und niedriger, für die Berechnung über alle Bedingungen war die Fehlerrate mit etwa 20 Prozent deutlich höher.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Auswertung der Daten zeigte zunächst, dass die experimentelle Variation mit den untersuchten Bedingungen und Situationen zu signifikanten Unterschieden innerhalb der untersuchten Variablen zwischen den experimentellen Varianten führte. Dies zeigte sich sowohl für die objektive und subjektive Gefährlichkeit, als auch für die physiologischen Daten.

Im nächsten Schritt der Datenmodellierung mit Hilfe Bayes'scher Netze, konnte gezeigt werden, dass die Abschätzung des subjektiven Risikos mit guter Vorhersagegenauigkeit möglich ist. Diese Ergebnisse liefern erste Erkenntnisse für eine mögliche Umsetzung als Assistenzsystem im Fahrzeug. Dieses System könnte sowohl beim manuellen als auch beim automatisierten Fahren einen deutlichen Sicherheitsgewinn und – insbesondere beim Automatisierten Fahren – einen deutlichen Akzeptanzgewinn bewirken.

In nachfolgenden Schritten soll die Einbeziehung der Blickdaten in die Modellierung erfolgen. Anzunehmen ist, dass sich die Vorhersagegüte für das subjektive Risikoempfinden damit weiter steigern lässt. Unterstützt wird dies durch den Fortschritt bei der Entwicklung von Driver Monitoring Cameras (DMC) sowie von im Fahrzeug integrierten Sensoren zur Erhebung physiologischer Daten. Deren abzusehende weite Verbreitung in (teil-)automatisierten Fahrzeugen, erlaubt die Verwendung der hier vorgestellten Modellansätze als Beitrag zur Verbreitung von sicherem automatisiertem Fahren.

#### Danksagung

Diese Studie wurde mit Unterstützung des EU ARTEMIS JU Projekts HoliDes (<http://www.holides.eu/>), SP-8, GA No.: 332933, durchgeführt. Die hier erwähnten Inhalte spiegeln ausschließlich den Standpunkt der Autoren wider. ARTEMIS JU ist nicht verantwortlich für die hier enthaltenen Informationen und deren Verwendung.

## 2. Literaturverzeichnis

- [1] Schlag, B. (2006). Risikoverhalten im Straßenverkehr. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 55 (3-4), S. 35-40. Verfügbar unter: <http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/1869/1172667790025-2983.pdf> (zuletzt abgerufen im Oktober 2017)
- [2] Krehle, T. (2009) DominionSURT. Surrogate reference task (SURT). Documentation. Braunschweig (Germany): German Aerospace Center, Institute of Transportation Systems
- [3] Reimer, B. & Mehler, B. (2011). The Impact of Cognitive Workload on Physiological Arousal in Young Adult Drivers: A Field Study and Simulation Validation. *Ergonomics*, 54(10), pp. 932-942.
- [4] Mehler, B., Reimer, B., & Dusek, J. (2011). MIT AgeLab delayed digit recall task (n-back). Available at: [http://agelab.mit.edu/system/files/Mehler\\_et\\_al\\_n-back-white-paper\\_2011\\_B.pdf](http://agelab.mit.edu/system/files/Mehler_et_al_n-back-white-paper_2011_B.pdf) (zuletzt abgerufen am 29. Sept. 2017)
- [5] Healey, J. A., & Picard, R. W. (2005). Detecting stress during real-world driving tasks using physiological sensors. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 6(2), 156-166.
- [6] Neukum, A., Lübbeke, T., Krüger, H.-P., Mayser, C., & Steinle, J. (2008). ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), 5. Workshop Fahrerassistenzsysteme - FAS2008 (S. 141-150). Karlsruhe: Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik e.V. Verfügbar unter [http://www.psychologie.uni-wuerzburg.de/methoden/texte/2008\\_Neukum\\_etaL\\_ACC\\_Stop&Go.pdf](http://www.psychologie.uni-wuerzburg.de/methoden/texte/2008_Neukum_etaL_ACC_Stop&Go.pdf)
- [7] Hart, S.G. & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. *Advances in Psychology*, 52, S.139-183
- [8] NHTSA (2013). Guidelines for Reducing Visual-Manual Driver Distraction during Interactions with Integrated, In-Vehicle, Electronic Devices. Docket No. NHTSA-2010-0053. Version 1.1. Verfügbar unter [https://www.distraction.gov/downloads/pdfs/11302c-Visual\\_Manual\\_Distraction\\_Guidelines\\_V1-1\\_010815\\_v1\\_tag.pdf](https://www.distraction.gov/downloads/pdfs/11302c-Visual_Manual_Distraction_Guidelines_V1-1_010815_v1_tag.pdf). Zuletzt abgerufen 01.2017

- [9] Van der Horst (2007). Time-Related Measures for Modelling Risk in Driver Behaviour. In P. C. Cacciabue (Hrsg.): Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments. Critical Issues in Driver Interactions with Intelligent Transport Systems (S. 235-252). London: Springer.
- [10] Koller, D., & Friedman, N. (2009). Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques. Adaptive Computation and Machine Learning. Cambridge, MA: MIT Press.
- [11] Rigas, G., Katsis, C. D., Bougia, P., & Fotiadis, D. I. (2008). A reasoning-based framework for car driver's stress prediction. In Control and Automation, 2008 16th Mediterranean Conference on (pp. 627-632). IEEE.
- [12] Nagarajan, R., Scutari, M. & Lèbre, S. (2013). Use R! Vol. 48, Bayesian Networks in R: with Applications in Systems Biology. New York, NY: Springer.



# Welche Informationen lassen sich aus antizipatorischen Hautleitfähigkeitsdaten für Mensch-Maschine-Schnittstellen ableiten?

## Eine experimentelle Untersuchung situativer Einflussfaktoren

Dipl.-Psych. **T. Heine, G. Pöhler, M.Sc., J. Imbsweiler, M.Sc.**,  
Prof. Dr.-Ing. **B. Deml**,  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

### Kurzfassung

Auf Grundlage der Theorie der somatischen Marker werden antizipatorische Hautleitfähigkeitssignale untersucht, die im Vorfeld von potentiell riskanten Entscheidungen wirksam werden (sog. somatische Marker). Es sollte geprüft werden, durch welche situativen Merkmale einer Verkehrssituation die Stärke eines somatischen Markers beeinflusst wird. Insgesamt 32 Probanden fuhren in einem Fahrsimulator durch verschiedene Verkehrssituationen, die systematisch anhand von vier Faktoren variiert wurden. Es konnte gezeigt werden, dass die Stärke einer antizipatorischen Hautleitfähigkeitsreaktion signifikant vom Szenario, der gefahrene Geschwindigkeit und der Risikobedingung abhängt. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird diskutiert, wie mithilfe von relativen Vergleichen von verschiedenen situations- und personenspezifischen Hautleitfähigkeitswerten auf eine möglicherweise reduzierte Situationswahrnehmung geschlossen werden kann, was z. B. bei der Gestaltung von Übergabesituations in der automatischen Fahrzeugführung Verwendung finden könnte.

### 1. Einleitung

Psychophysiologische Maße spielen bei der Detektion des Fahrerzustands eine zentrale Rolle. Die Hautleitfähigkeit stellt hierbei eine besonders interessante Messgröße dar, da sie im Gegensatz zu anderen Parametern (z. B. EKG, Eyetracking) recht leicht zu erfassen ist. Wichtiger als die Einfachheit der Erfassung ist jedoch die Frage, welche Informationen sich aus Hautleitfähigkeitsdaten ableiten lassen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf Hautleitfähigkeitsreaktionen, die unmittelbar vor einer potentiell riskanten Entscheidung auftreten. Die theoretische Grundlage hierfür stellt die aus der Neurowissenschaft stammende Theorie der somatischen Marker dar. Somatische Marker sind unbewusste körperliche Signale (soma [griech]: Körper), die im Vorfeld von Entscheidungen aktiv werden und den Organismus auf

potentielle Gefahren hinweisen [1]. Auf physiologischer Ebene lassen sich somatische Marker anhand von Veränderungen der Hautleitfähigkeit erfassen. Es handelt sich dabei um emotionale Vorerfahrung, die in der aktuellen Situation wieder aktiviert wird. Ein Ausbleiben derartiger Signale geht mit einem schlechten bzw. dysfunktionalen Entscheidungsverhalten einher [2]. Eine theoretische Integration somatischer Marker in den Informationsverarbeitungsprozess des Fahrers wurde bereits in zwei Fahrerverhaltensmodellen vorgenommen [3 bis 6], für eine ausführliche Zusammenfassung siehe [7]).

Die vorliegende Arbeit untersucht die praktische Bedeutsamkeit somatischer Marker für Mensch-Maschine-Schnittstellen. Hierfür wurde ein Experiment im Fahrsimulator durchgeführt, bei dem systematisch verschiedene situative Einflussfaktoren variiert wurden.

## 2. Methode

### 2.1 Verkehrssituationen

Insgesamt wurden 20 Verkehrssituationen im Fahrsimulator durchfahren. Jede Situation ist durch eine spezifische Kombination der folgenden vier Merkmale gekennzeichnet:

- Szenario (Straßentyp und zu fahrendes Manöver)
- Fahrzeugtyp der beteiligten Fahrzeuge
- Geschwindigkeit der beteiligten Fahrzeuge
- Risikobedingung

Nachfolgend werden die einzelnen Faktoren genauer erläutert.

#### 2.1.1 Szenarien

Insgesamt wurden drei Szenarien untersucht: Autobahn, Kreuzung und Landstraße.

#### Szenario Autobahn

Im Szenario Autobahn startet der Proband auf einem Rastplatz. Er wird gebeten, auf eine 4-spurige Autobahn aufzufahren und dort auf der rechten Fahrspur zu bleiben, bis er einen weißen LKW vor sich entdeckt. Der Proband soll sich zunächst hinter dem LKW (Geschwindigkeit 85 km/h) einordnen und parallel den linken Außenspiegel beobachten, bis dort ein zweites Fahrzeug auf der Überholspur auftaucht. Die Aufgabe des Probanden besteht darin, vor dem sich nähernenden zweiten Fahrzeug auf die linke Spur zu wechseln und den LKW zu überholen.

Tabelle 1: Übersicht aller 20 Verkehrssituationen.

<b>Szenario</b>	<b>Beteiligtes Fahrzeug</b>	<b>km/h</b>	<b>Risikobedingung</b>
Autobahn	Sportwagen	Schnell (160)	Normal Letzte sichere Möglichkeit
		Langsam (120)	Normal Letzte sichere Möglichkeit
	Kastenwagen	Schnell (160)	Normal Letzte sichere Möglichkeit
		Langsam (120)	Normal Letzte sichere Möglichkeit
Kreuzung	Sportwagen	Schnell (80)	Normal Letzte sichere Möglichkeit
		Langsam (50)	Normal Letzte sichere Möglichkeit
	LKW	Schnell (80)	Normal Letzte sichere Möglichkeit
		Langsam (50)	Normal Letzte sichere Möglichkeit
Landstraße	PKW	Schnell (70)	Normal Letzte sichere Möglichkeit
		Langsam (50)	Normal Letzte sichere Möglichkeit

### **Szenario Kreuzung**

Im Szenario Kreuzung startet der Proband auf einer zweispurigen Landstraße, die auf eine 90 Grad querende zweispurige Landstraße zuläuft. Die Kreuzung ist in Form einer T-Kreuzung ausgestaltet, die Straße des Probanden endet an einer Stoppstelle. Die Aufgabe des Probanden besteht darin, an die Stoppstelle heranzufahren und an der Kreuzung nach links abzubiegen. Auf der querenden Straße nähert sich von links ein Fahrzeug.

### **Szenario: Landstraße**

Im Szenario Landstraße startet der Proband auf einer zweispurigen Landstraße. Der Proband wird gebeten, loszufahren und dem Straßenverlauf zu folgen. An einer Kreuzung schert ein Fahrzeug ein, dem der Proband folgen soll. Zunächst führt die Straße in ein Tal. Von der Talsohle aus steigt sie wieder langsam an und vollführt eine langgezogene Linkskurve. Der weitere Verlauf der Strecke hinter der Kurve ist aufgrund eines Waldes nicht einsehbar. Die Aufgabe des Probanden besteht darin, das Vorderfahrzeug vor dem Wald zu überholen.

Innerhalb der drei Szenarien wurden zusätzlich folgende Faktoren variiert.

### **2.1.2 Geschwindigkeit**

In jedem Szenario gab es zwei Geschwindigkeitsbedingungen (schnell und langsam). Die genauen Geschwindigkeitswerte sind in Tabelle 1 dargestellt.

### **2.1.3 Beteiligt Fahrzeug**

In den Szenarien Autobahn und Kreuzung wurde manipuliert, welche Art von Fahrzeug sich von hinten bzw. von der linken Seite nähert. (Autobahn: Sport- oder Kastenwagen; Kreuzung: Sportwagen oder LKW). Beim Szenario Landstraße gab es nur einen Fahrzeugtyp.

### **2.1.4 Risikobedingung**

Als letzter situativer Faktor wurde die Risikobedingung variiert. Die Probanden wurden gebeten, ein Szenario entweder zu einem selbst gewählten Zeitpunkt durchzuführen („Normal“), oder zum letzten möglichen sicheren Zeitpunkt. Die Probanden sollten so lange warten, bis sie die Einleitung des Manövers (z. B. das Abbiegen an der Kreuzung vor dem sich nähern- den Fahrzeug) als gerade noch sicher einstuften und es dann entsprechend ausführen.

## **2.2 Fahrsimulator & Messapparatur**

Das Experiment fand im institutseigenen Fahrsimulator statt (siehe Abbildung 1). Dieser besteht aus einer Golf-6 Fahrerkabine, die mit Displays für Innenspiegel und linkem Außen- spiegel ausgestattet ist. Die Projektion nach vorn findet auf einer speziellen konkav gebogenen Panoramaleinwand statt. Als Simulationssoftware kam SILAB in der Version 5 zum Einsatz (WIVW GmbH).

Für die Messung der Hautleitfähigkeit und der Atemaktivität wurde ein varioport-B Biosignal Rekorder (Becker Meditec) verwendet. Um die synchrone Aufzeichnung von Fahrparametern und Physiodaten sicherzustellen, wurden alle Daten über eine spezielle SILAB-Schnittstelle auf dem Simulationsrechner zusammengeführt und gespeichert.

Tabelle 2: Verhaltensbasierte Definition der Entscheidungszeitpunkte in den drei Szenarien.

Szenario	Definition Entscheidungszeitpunkt
Autobahn	Letzte Lenkbewegung, die den Spurwechsel einleitet
Kreuzung	Betätigen des Gaspedals beim Wiederanfahren nach der Stoppstelle
Landstraße	Letzte Lenkbewegung, die den Spurwechsel einleitet



Bild 1: Außenansicht (links) und Innenansicht (rechts) des Fahrsimulators.

### 2.3 Datenauswertung

Die Hautleitfähigkeitsdaten wurden zunächst T-standardisiert und im Anschluss mithilfe der kontinuierlichen Dekompositionsanalyse [8, 9] ausgewertet. Diese erlaubt eine Extraktion der dem Hautleitfähigkeitssignal zugrundeliegenden sympathischen Aktivität. Als Kennwert wurde ein Zeitintegral berechnet (integrated skin conductance response, ISCR). Hierfür wurde ein Zeitraum von drei Sekunden vor dem Entscheidungszeitpunkt des Fahrers berücksichtigt. Der Entscheidungszeitpunkt in jeder Situation wurde nachträglich anhand von definierten Verhaltensweisen aus den Fahrparametern extrahiert. Eine Übersicht der Entscheidungszeitpunkte in den drei Szenarien zeigt Tabelle 2. Der ISCR wurde anschließend auf eine Sekunde standardisiert und eine logarithmische Korrektur der rechtsschiefen Verteilung vorgenommen. Die Ergebnisse der Hautleitfähigkeit werden somit in Form T-standardisierter, logarithmierter Mikrosiemens angegeben, kurz  $T \log \mu\text{S}$ .

### 2.4 Versuchsablauf

Allen Probanden wurde zunächst eine schriftliche Einverständniserklärung vorgelegt, die über Inhalt und Zweck des Experiments informierte. Anschließend wurden die EDA-Elektroden an Thenar und Hypothenar der linken Hand angebracht. Im Rahmen einer Ein gewöhnungsfahrt konnte der Proband sich dann mit der Bedienung des Fahrsimulators vertraut machen. Im Anschluss erfolgte die Darbietung der 20 Verkehrssituationen. Die Situationen wurden dabei jeweils einzeln und in teil-randomisierter Reihenfolge durchfahren. Vor

jedem Start einer Situation wurde dem Probanden mitgeteilt, worin seine Fahraufgabe besteht (z. B. „Sie fahren auf der Autobahn. Von hinten nähert sich ein Sportwagen mit 160 km/h. Bitte überholen Sie den LKW zum letztmöglichen sicheren Zeitpunkt.“). Nach der letzten Situation wurden die Probanden gebeten, einen Fragebogen zur Erfassung von sozio-demographischen und mobilitätsbezogenen Variablen auszufüllen. Für die Teilnahme wurde eine pauschale Vergütung von 7,-EUR bezahlt.

## 2.5 Stichprobe

Insgesamt nahmen  $N = 32$  Probanden an der Untersuchung teil, davon sind  $N = 7$  weiblich und  $N = 25$  männlich. Das mittlere Alter der Probanden liegt bei 25.8 Jahren ( $SD = 6.4$ ).

## 3 Ergebnisse

Zunächst werden nur die Faktoren berücksichtigt, die in allen Situationen variiert wurden (d. h. Szenario, Geschwindigkeit und Risikobedingung, vgl. Tabelle 1). Der Faktor Fahrzeugtyp, der nur in den Situationen der Szenarien Autobahn und Kreuzung variiert wurde, findet in einer anschließenden Analyse Berücksichtigung

### 3.1 Einfluss von Szenario, Geschwindigkeit und Risikobedingung

Es wurde eine ANOVA mit Messwiederholung berechnet mit den messwiederholten Faktoren Szenario (Autobahn, Kreuzung, Landstraße), Geschwindigkeit (schnell, langsam) und Risikobedingung (normal, letzte sichere Möglichkeit). Die Hautleitfähigkeitswerte im Zeitfenster von 3 Sekunden vor der Entscheidung bilden die abhängige Variable. Die Ergebnisse für die Haupt- und Interaktionseffekte können Tabelle 3 entnommen werden. Nachfolgend werden die Ergebnisse detailliert erläutert.

#### 3.1.1 Haupteffekt Szenario

Da der Mauchly-Test für den Haupteffekt Szenario signifikant ist ( $\chi^2[2] = 11.27, p < .01$ ), werden die Freiheitsgrade entsprechend nach Greenhouse-Geisser korrigiert. Der Haupteffekt Szenario wird signifikant ( $F[1.52, 47.21] = 26.12, p < .001$ ). Bonferroni korrigierte Post-Hoc Tests zeigen, dass sich alle drei Szenarien signifikant unterscheiden (siehe Abbildung 2 und Tabelle 4).

Tabelle 3: Varianzanalyse mit Messwiederholung für die antizipatorischen Hautleitfähigkeitswerte und die Faktoren Szenario, Geschwindigkeit und Risiko.

Effekt	df Zähler	df Nenner	F	p
Szenario	25.67	47.21	26.12	< .001
Geschwindigkeit	1	31	10.44	< .01
Risiko	1	31	28.46	< .001
Szenario x Geschwindigkeit	1.61	49.94	1.71	.19
Szenario x Risiko	2	62	4.7	< .05
Geschwindigkeit x Risiko	1	31	2.02	.17

Tabelle 4: Post-Hoc Vergleiche für den Haupteffekt Szenario. Die p-Werte sind nach Bonferroni korrigiert.

Szenario 1	Szenario 2	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	df	t	p	r <sub>Eff</sub>
Autobahn	Kreuzung	1.57	1.95	32	-5.03	<.001	.66
Autobahn	Landstraße	1.57	1.32	32	3.41	<.01	.52
Kreuzung	Landstraße	1.95	1.32	32	5.75	<.001	.71

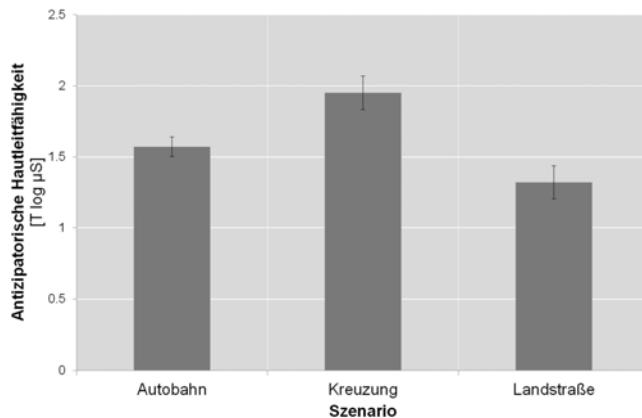


Bild 2: Antizipatorische Hautleitfähigkeitswerte für den Haupteffekt Szenario (N = 32). Die Fehlerbalken bezeichnen 95 %-Konfidenzintervalle des Mittelwerts für abhängige Stichproben.

### 3.1.2 Haupteffekt Geschwindigkeit

Der Haupteffekt Geschwindigkeit wird signifikant ( $F[1,31] = 10.44, p < .01$ ). Eine höhere Geschwindigkeit geht mit einer signifikant höheren antizipatorischen Hautleitfähigkeit einher ( $M_{Langsam} = 1.54, M_{Schnell} = 1.70$ ). Die Effektstärke beträgt  $r_{Eff} = .50$ .

### 3.1.3 Haupteffekt Risiko

Der Haupteffekt Risiko wird ebenfalls signifikant ( $F[1,31] = 28.46, p < .001$ ). Die Bedingung *Letzte sichere Möglichkeit* führt zu signifikant höheren antizipatorischen Hautleitfähigkeitswerten als die Bedingung *Normal* ( $M_{Normal} = 1.45, M_{Letzte sichere Möglichkeit} = 1.78$ ). Die Effektstärke beträgt  $r_{Eff} = .69$ .

### 3.1.4 Interaktionseffekt Szenario x Risiko

Der Interaktionseffekt Szenario x Risiko wird signifikant ( $F[2,62] = 4.70, p = .01$ ). Post-Hoc Vergleiche zeigen, dass die Bedingung *Letzte sichere Möglichkeit* im Vergleich zur Bedingung *Normal* sowohl im Szenario Autobahn als auch im Szenario Kreuzung mit signifikant höheren antizipatorischen SCR-Werten einhergeht (siehe Abbildung 3).

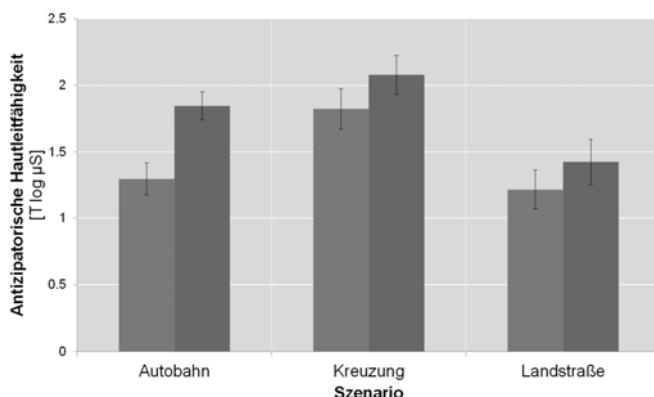


Bild 3: Antizipatorische Hautleitfähigkeitswerte für den Interaktionseffekt Szenario x Risiko ( $N = 32$ ). Die hellgrauen Balken stehen für die Bedingung „Normal“, die dunkelgrauen Balken stehen für die Bedingung „Letzte sichere Möglichkeit“. Die Fehlerbalken bezeichnen 95 %-Konfidenzintervalle des Mittelwerts für abhängige Stichproben

### 3.1.5 Einfluss des Fahrzeugtyps

Ob der Fahrzeugtyp bei den Szenarien Autobahn und Kreuzung (beim Szenario Landstraße wurde wie bereits erwähnt nur ein Fahrzeug verwendet) ebenfalls einen Einfluss auf die antizipatorischen SCR-Werte besitzt, wurde mit Hilfe einer zweiten ANOVA überprüft. Die Ergebnisse der ANOVA sind in Tabelle 5 zu finden. Weder der Haupt- noch die Interaktionsfaktoren werden signifikant.

Tabelle 5: Varianzanalyse mit Messwiederholung für die antizipatorischen Hautleitfähigkeitswerte und die Faktoren Fahrzeug sowie die Interaktionseffekte mit Fahrzeug.

Effekt	$df_{\text{Zähler}}$	$df_{\text{Nenner}}$	F	p
Fahrzeug	1	31	0.32	.58
Szenario x Fahrzeug	1	31	1.27	.27
Fahrzeug x Geschwindigkeit	1	31	0.001	.98
Fahrzeug x Risiko	1	31	0.02	.89

## 4. Diskussion

Es konnten verschiedene situative Merkmale identifiziert werden, die einen Einfluss auf die Stärke einer antizipatorischen Hautleitfähigkeitsreaktion besitzen. Ein wichtiger Faktor stellt die Art des durchfahrenen Szenarios dar. Die höchsten Werte ergaben sich für das Kreuzungsszenario, gefolgt von der Autobahn und der Landstraße. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass sich Autofahrer insgesamt auf Landstraßen (im Vergleich zu Autobahn und Stadtverkehr) am sichersten fühlen [10]. Das subjektive Sicherheitsempfinden steht dabei in einem deutlichen Widerspruch zu offiziellen Unfallzahlen. Diese besagen, dass die meisten tödlichen Unfälle auf Landstraßen stattfinden (knapp 60%, [11]). Trotz des objektiv hohen Unfallrisikos auf Landstraßen, erleben Autofahrer diese als besonders sicher. Die gefundenen geringen antizipatorischen SCR-Werte sind möglicherweise ein Ausdruck dieser Risikounterschätzung auf Landstraßen. Als weiterer wichtiger situativer Faktor übt auch die gefahrene Geschwindigkeit eines beteiligten Fahrzeugs einen signifikanten Einfluss auf die antizipatorischen SCR-Werte aus. Höhere Geschwindigkeiten gehen demnach mit einem höheren SCR-Niveau einher. Auch die Risikobedingung besitzt einen signifikanten Einfluss auf die antizipatorischen SCR-Werte. Wenn Probanden ein Manöver zum letzten sicheren Zeitpunkt einleiten, zeigen sie signifikant höhere Werte, als wenn sie das Manöver zu einem selbst gewählten früheren Zeitpunkt durchführen. Dies gilt allerdings nur für die Szenarien Kreuzung und Autobahn, beim Szenario Landstraße konnte kein entsprechender Unterschied zwischen den Bedingungen gefunden werden. Keinen signifikanten Einfluss zeigte

die Art des beteiligten Autos. Für die Höhe der antizipatorischen SCR-Werte scheint es somit unerheblich zu sein, ob sich ein großes Fahrzeug (LKW bzw. Kastenwagen) oder ein Sportwagen nähert.

## 6. Anwendungsmöglichkeit

Im vorliegenden Experiment konnte gezeigt werden, dass antizipatorische Hautleitfähigkeitsreaktionen von situativen Faktoren einer Verkehrssituation beeinflusst werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei unvollständiger Situationswahrnehmung eine veränderte Hautleitfähigkeitsreaktion zu erwarten ist. Damit ergibt sich ein interessanter Ansatzpunkt für Mensch-Maschine-Schnittstellen. Der grundlegende Gedanke dabei ist, aus einer veränderten Hautleitfähigkeit auf eine unzureichende Situationswahrnehmung bzw. Situationsbewusstsein zu schließen. Eine potentielle Anwendung im Fahrzeug müsste so angelegt sein, dass sie aus einem *relativen* Vergleich von situations- und personenspezifischen Hautleitfähigkeitswerten Informationen über den aktuellen Fahrerzustand gewinnt. Besonders relevant ist dies im Kontext der automatischen Fahrzeugführung. Wird die Kontrolle über die Fahraufgabe vom Fahrzeug zum Fahrer übergeben (v. a. SAE-Level 3 [12]), muss sichergestellt sein, dass der Fahrer über ein ausreichendes Situationsbewusstsein verfügt. Antizipatorische Hautleitfähigkeitsdaten könnten hier möglicherweise einen Beitrag dazu leisten, inadäquates Situationsbewusstsein zu detektieren und in der Folge Übergabesituationen (z. B. durch zusätzliche Hinweise oder eine Verlagerung des Übergabezeitpunkts) sicherer zu gestalten.

## 7. Ausblick

Die Verwendung antizipatorischer Hautleitfähigkeitsdaten stellt eine vielversprechende Informationsquelle für zukünftige Mensch-Maschine-Schnittstellen dar. In weiterführenden Studien sollten noch mehr bzw. andersartige Verkehrssituationen untersucht werden. Zudem sollten Untersuchungen im Realverkehr in Erwägung gezogen werden, um die externe Validität abzusichern. Für den tatsächlichen Einsatz im Fahrzeug muss zudem eine praxistaugliche Variante zur Ableitung der Hautleitfähigkeit gefunden werden (z. B. über das Lenkrad oder anhand von Fitnessarmbändern), die zugleich auch in der Lage ist, die erforderliche Signalqualität zu liefern.

## 1. Literaturangaben

- [1] Damasio, A. R.: *Descartes' error. Emotion, reason, and the human brain*. New York: Putnam 1994
- [2] Bechara, A., Damasio, H., Tranel, D. u. Damasio, A. R.: Deciding Advantageously Before Knowing the Advantageous Strategy. *Science* 275 (1997) 5304, S. 1293–1295
- [3] Kinnear, N.: Driving as you feel: A psychological investigation of the novice driver problem, Edinburgh Napier University Dissertation. Edinburgh 2009
- [4] Survival or deviance? A model for driver behaviour. (English summary of Norwegian report). TOI report 666/2003, Vaa, T., Oslo 2004
- [5] Vaa, T.: Modelling Driver Behaviour on Basis of Emotions and Feelings: Intelligent Transport Systems and Behavioural Adaptations. In: Cacciabue, P. C. (Hrsg.): *Modelling driver behaviour in automotive environments. Critical issues in driver interactions with intelligent transport systems*. London: Springer 2007, S. 208–232
- [6] Vaa, T.: Proposing a Risk Monitor Model Based on Emotions and Feelings: Exploring the Boundaries of Perception and Learning. In: Regan, M. A., Lee, J. D. u. Victor, T. W. (Hrsg.): *Driver distraction and inattention. Advances in research and countermeasures*, Volume 1. Surrey: Ashgate 2013, S. 103–119
- [7] Heine, T. u. Deml, B.: Stand der Theorie der somatischen Marker im Kontext von Fahrerverhaltensmodellen. VerANTWORTung für die Arbeit der Zukunft. Tagungsband 61. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund: GFA Press 2015
- [8] Benedek, M. u. Kaernbach, C.: Decomposition of skin conductance data by means of nonnegative deconvolution. *Psychophysiology* 47 (2010) 4, S. 647–658
- [9] Benedek, M. u. Kaernbach, C.: A continuous measure of phasic electrodermal activity. *Journal of Neuroscience Methods* 190 (2010) 1, S. 80–91
- [10] AXA Verkehrssicherheitsreport 2015, AXA Konzern AG, Köln 2015
- [11] Verkehrsunfälle 2015. Zeitreihen, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2016
- [12] Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems J3016, SAE International, 2014



# 3D-Displays – Das ungenutzte Potential? Die Wahrnehmung von stereoskopischen Informationen im Fahrzeug

**MSc. Johanna Sandbrink, Dr. Johannes Rhede,**  
Volkswagen Konzernforschung Wolfsburg;  
**Prof. Dr. Mark Vollrath, Technische Universität Braunschweig;**  
**BSc. Franziska Flehmer, Technische Universität Chemnitz**

## Kurzfassung

Ein Ziel bei der Entwicklung von Fahrerinformationssystemen ist die Optimierung der Informationsaufnahme durch den Fahrer. Dafür müssen Informationen logisch strukturiert dargestellt werden, um eine schnelle Wahrnehmung zu ermöglichen. Einen verhältnismäßig neuen Ansatz in diesem Zusammenhang bieten stereoskopische Darstellungen. Die auch als 3D bezeichnete Technik ist derzeit ein sehr populäres Thema und konnte in vielen benachbarten Disziplinen bereits positive Effekte durch den Einsatz von stereoskopischen HMIs bewirken [1]. Die Informationsstaffelung in einer weiteren Dimension bietet auch für den automobilen Kontext Potential für die Wahrnehmbarkeit, welches näher untersucht und nach Möglichkeit nutzbar gemacht werden sollte.

Der vorliegende Beitrag beschreibt eine Laborstudie zur Evaluation der Wahrnehmbarkeit von stereoskopischen Informationen im Fahrzeugkontext. Innerhalb der Studie wurden in einem Sitzkistenaufbau mit variablem Kombidisplay Listen und abstrakte grafische Abbildungen mit unterschiedlichen Komplexitätsgraden betrachtet. Dabei wurden Darstellungen ohne Tiefenreize denen mit binokularen bzw. monokularen Tiefeninformationen gegenüber gestellt. Die Abbildung der binokularen Tiefeninformationen erfolgte durch autostereoskopische Displays auf Basis der Lenticularlinsentechnik. Im Fokus der Untersuchung lag die Abhängigkeit der fehlerfreien Wahrnehmung bei sehr kurzen Anzeigedauern von der Darstellungsart und der Komplexität generischer Infotainmentinhalte. Darüber hinaus wurde insbesondere die erzeugte subjektive Beanspruchung erhoben. Um die optimalen Parameter zur Anzeigengestaltung zu bestimmen, wurden die Stärke und Richtung der Parallaxe variiert.

Die Analyse der Daten zeigt für die Bearbeitungsqualität und Beanspruchung einen deutlichen Unterschied zwischen den Darstellungen mit und ohne binokulare Tiefenreize. Komplexe Anzeigen können mit stereoskopischen Informationen fehlerfreier wahrgenommen werden und erzeugen weniger subjektive Beanspruchung. Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass die Nutzung der negativen Parallaxe für das Hervorheben von Objekten in grafischen Abbildungen geeignet ist.

## Abstract

One of the most important aspects when developing driver information systems is to avoid visual distraction and long glances. Therefore, information has to be presented clearly and in a structured way to enable fast and easy perception. A relatively new approach is provided by the use of stereoscopic displays. While the 3D technology gains more and more popularity in consumer electronics, research has already shown positive effects through the use of stereoscopic HMIs in nearby fields (e.g. in aviation) [1]. Similarly, the offset in depth has a high potential for enhancing automotive interfaces, which should be investigated to take full advantage of the third dimension.

The study reported here had the goal of evaluating the perception of stereoscopic information in in-vehicle user interfaces. During the study an instrument cluster display was used to display lists and graphical illustrations with varying complexity. Content without depth cues was compared to charts with binocular or monocular depth cues. Autostereoscopic depth has been generated through the use of lenticular lenses. The examination was focused on the dependence of dimensionality, time of visibility and the complexity of generic infotainment content on an accurate perception. Moreover, subjective stress has been measured. The size and direction of parallax has been varied in order to find the best way of using depth for layouting display content.

The results suggest that failure rates and stress ratings differ strongly between tasks with or without binocular depth cues. Complex illustrations have been identified more precisely and with less stress when a binocular offset in depth was used. Beyond that, the use of negative parallax appears to be the best way to accentuate items in graphical illustrations.

### 1. Motivation

Seit Jahren steht die Reduktion von Blickabwendungen beim Autofahren im Fokus bei der Entwicklung von Fahrzeuganzeigen, da sie einen bedeutenden Aspekt für die Gewährleistung der Verkehrssicherheit darstellen. Visuelle Ablenkung gilt als eine Hauptursache für Unfälle [2]. Auswertungen von Naturalistic Car Studies zeigen, dass bei fast 80 Prozent aller Unfälle und 65 Prozent aller Beinaheunfälle eine unmittelbare Blickabwendung des Fahrers vorausgeht [3].

Im Zusammenhang mit dieser Thematik können neue Technologien einen Ansatz bieten, um Blickabwendungen auf Fahrzeugdisplays zu reduzieren. Durch Gestaltungsmittel wie die stereoskopische Tiefe können die Leistungen bei einer visuellen Suche verbessert werden [4 bis 6]. Bei einer Tiefenstaffelung von Objekten im Raum kann durch einen wahrnehmungsbedingten Pop-out des Zielreizes die Suche innerhalb einer Tiefenebene durchgeführt

werden, ohne von Distraktoren auf einer anderen Ebene beeinflusst zu werden [7]. Metaanalysen zeigen, dass bei 60 Prozent der Studien eine Leistungsverbesserung durch stereoskopische Darstellungen erzielt werden konnte [1]. Diese Ergebnisse stammen überwiegend aus dem medizinischen oder militärischen Bereich. Es ist jedoch anzunehmen, dass stereoskopische Anzeigen auch Fahrzeugführer unterstützen könnten.

Im Design von Fahrzeuganzeigen ist seit einigen Jahren ein Trend der Nutzung von Perspektive zu bemerken. Dieser geht jedoch nicht so weit, stereoskopische Displays einzusetzen, um reale Tiefe in die Gestaltung der Anzeigen einzubeziehen. Die vorhandene Forschung zu diesem Thema ist bisher relativ gering und belegt hauptsächlich eine Steigerung der User Experience durch die Verwendung von autostereoskopischen Displays im Fahrzeug [8, 9].

Insbesondere wird in bisherigen Studien nicht die Auswirkung der Displays auf die Wahrnehmung des Fahrers untersucht. Darüber hinaus fehlen eindeutige Erkenntnisse, auf welche Art und Weise die darstellbare Tiefe genutzt werden muss, um eine gute Wahrnehmbarkeit zu gewährleisten. Bisherige Untersuchungen weisen zum Teil widersprüchliche Ergebnisse auf. So deuten einige Studien darauf hin, dass eine Suche am effektivsten vollzogen wird, wenn das Zielobjekt vor den Distraktoren liegt [4, 10]. Feststellungen anderer Autorengruppen befürworten dagegen grundsätzlich eher die positive Parallaxe als die negative Parallaxe zu nutzen, obwohl die negative Parallaxe eine größere Dringlichkeit hervorrufen kann [8, 11]. Darüber hinaus kann die verwendete Parallaxe auch Auswirkungen auf den visuellen Komfort besitzen. So können für kurze Blickdistanzen Hervorhebungen vor der Bildschirmebene als unkomfortabler wahrgenommen werden als der Bereich hinter dem Display [12]. Ebenso kann durch den Einsatz von autostereoskopischen Displays ganz grundsätzlich ein visueller Diskomfort hervorgerufen werden aufgrund der unnatürlichen Darstellungsweise [13]. Dieser Effekt muss für die Nutzung eines autostereoskopischen Displays im Fahrzeug vermieden werden.

## 2. Studie

### Fragestellung

Zur Ermittlung des Potentials von autostereoskopischen Displays als Kombiinstrument im Fahrzeug soll die Frage beantwortet werden, ob eine Tiefenstaffelung von Informationen mittels stereoskopischer Reize die Wahrnehmung von Displayinhalten unterstützt.

Im Fahrzeugkontext werden verschiedene Anzeigekategorien verwendet, die sich in ihrer Menge an Informationen und in ihrer Komplexität unterscheiden. Aus diesem Grund soll die oben gestellte Frage sowohl für häufig verwendete Gestaltungsmittel wie Listen und grafi-

sche Elemente, als auch für unterschiedliche Mengen an Informationen beantwortet werden. Darüber hinaus soll wegen der wenigen und widersprüchlichen Befunde zur Tiefenstaffelung geklärt werden, wie Inhalte in der Tiefe vorteilhaft gestaffelt werden können.

Des Weiteren hängt die Wahrnehmung eines stereoskopischen Effekts stark von der technischen Umsetzung ab. Einige Techniken zur Erzeugung von stereoskopischen Bildern, wie z.B. die Lenktikularlinsentechnologie, bedingen eine starke Reduzierung der sichtbaren Auflösung des Displays. Aus diesem Grund müssen sehr hoch aufgelöste Displays genutzt werden, um eine ansprechende Qualität zu gewährleisten. Je höher jedoch die Auflösung ist, desto weniger Tiefeneindruck lässt sich ohne starke Qualitätsverluste erzielen. Daher ergibt sich die Frage, welchen Einfluss die Wechselwirkung der Displayauflösung und Darstellungsqualität bzw. der nutzbaren Disparität auf die Wahrnehmbarkeit ausübt.

### **Methodik**

Für die Studie wurde ein Mixed-Design verwendet (siehe Tabelle 1). Dabei stellte der Faktor „Kategorie“ mit den beiden Ausprägungen „Grafik“ und „Liste“ einen von zwei Between-Faktoren dar. Der Zweite bezog sich auf die verwendete Anzeigedauer mit den Bedingungen „kurz“ und „lang“.

Tabelle 1: Faktordesign der Studien zur 3D-Wahrnehmung

	Kategorie (between)	Anzeigedauer (between)	Dimension (within)	Komplexität (within)
Ausprägungen	Bilder	kurz	2D 4K 2,5D 4K	gering mittel
		lang	3D 2K 3D 4K	
	Liste	kurz	2D 4K 3D 2K	hoch
		lang	3D 4K	

Als Within-Faktoren wurde die Komplexität der Anzeige in den Ausprägungen „gering“, „mittel“ und „hoch“ sowie die Dimension der Anzeige verwendet. Die Dimension umfasste eine Darstellung ohne Tiefenreize (2D – 4K) und eine Darstellung mit monokularen Tiefenreizen (2,5D – 4K, Größenanpassung) jeweils auf einem sehr hoch hochauflösten Display (3840 x 2160 Pixel). Zudem jeweils eine Darstellung mit binokularen Tiefenreizen auf einem Display mit geringerer Auflösung (3D – 2K; 1920 x 720 Pixel) und auf einem Display mit sehr hoher Auflösung (3D – 4K; 3840 x 2160 Pixel). Für den Versuch wurden autostereoskopische Elemente, als auch für unterschiedliche Mengen an Informationen beantwortet werden. Darüber hinaus soll wegen der wenigen und widersprüchlichen Befunde zur Tiefenstaffelung geklärt werden, wie Inhalte in der Tiefe vorteilhaft gestaffelt werden können.

sche Displays mit Lenticularlinsentechnik genutzt, die für fünf Ansichten ausgelegt waren. Damit reduzierte sich die Endauflösung auf ein Fünftel der ursprünglichen Auflösung. Für die Kategorie „Liste“ wurde auf die Darstellung von monokularen Tiefenreizen aufgrund des fehlenden Bezugs zur Anwendung verzichtet. Von jeder Darstellungsart wurden acht Abbildungen präsentiert. Die Anzeigedauer je Komplexität wurde anhand von Expertenurteilen definiert und ist in Tabelle 2 aufgetragen.

Tabelle 2: Anzeigedauer der jeweiligen Darstellungen in Abhängigkeit der Faktoren Anzeigedauer und Komplexität in Millisekunden.

Anzeigedauer	Komplexität „gering“	Komplexität „mittel“	Komplexität „hoch“
Kurz	300	600	1000
Lang	600	1000	1600

Die Aufgabe der Probanden bestand aus visuellen Such- bzw. Zählaufgaben. Diese wurden bereits in vorhergehenden Studien zur Ablenkung durch visuelle Nebenaufgaben im Fahrzeug verwendet und geprüft [14]. Die Entwicklung der grafischen Aufgaben wurde an die Pfeilaufgaben aus dem EU FP5 Projekt HASTE [15, 16] angelehnt und bestanden aus dem Zählen von einem bis fünf nach oben gerichteten Blockfeilen in einer Matrix mit unterschiedlich ausgerichteten Pfeilen. Für die Listenaufgabe sollte die Anzahl an Frauennamen innerhalb einer Liste aus Frauen- und Männernamen identifiziert werden. Eine Übersicht der Aufgaben je Komplexitätsgrad ist in Tabelle 3 abgebildet.

Tabelle 3: Beschreibender Überblick der gestellten Aufgaben

	Bild		Liste	
Aufgabe	Wie viele Pfeile zeigen nach oben?		Wie viele Frauennamen lesen Sie?	
Komplexität	Anzeige	Antwort	Anzeige	Antwort
gering	16 Pfeile, 2 Richtungen	1 - 5	3 Einträge	0 - 3
mittel	16 Pfeile, 4 Richtungen	1 - 5	6 Einträge	0 - 5
hoch	32 Pfeile, 4 Richtungen	1 - 5	9 Einträge	0 - 7

Bei der Tiefenstaffelung durch binokulare Reize erfolgte die Darstellung der Distraktoren in den verschiedenen Bedingungen jeweils auf der Nullebene, einer Ebene davor und einer Ebene dahinter. Dazu wurden die Zielreize für jede Grundebene sowohl in der negativen als auch in der positiven Parallaxe verschoben (Bild 1). Der Abstand zwischen den Ebenen war identisch. Um die Auswirkungen der Faktoren auf den Einsatz von stereoskopischer Tiefe zurückführen zu können, wurden bei den dreidimensionalen Darstellungen der monokularen Tiefenreize des Größenunterschiedes bei den Zielreizen künstlich unterdrückt. Außerdem wurde versucht, trotz unterschiedlicher Auflösungen der Displays, ein vergleichbarer Tiefeneindruck zu erzielen.

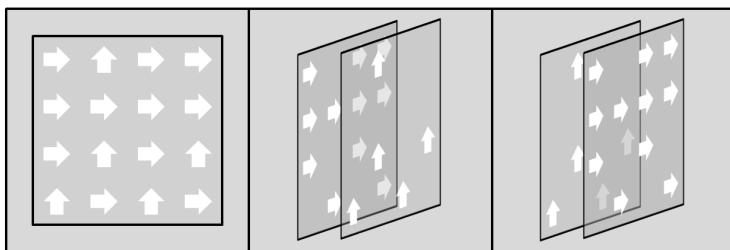


Bild 1: Schematische Abbildung der Tiefenstaffelung von Distraktoren und Zielreizen für die Kategorie „Grafik“ in geringer Komplexität. Dargestellt ist links die 2D-Ansicht, in der Mitte Zielreize in der negativen Parallaxe und rechts Zielreize in der positiven Parallaxe.

Die Durchführung der Studie fand in einer Sitzkiste in einem abgedunkelten Labor statt. Die Displays wurden auf einen Sichtabstand von 70 Zentimeter und 15 Grad unterhalb der Sichtlinie ausgelegt. In die Auswertung gingen 24 Versuchspersonen ein, deren Fähigkeit zum stereoskopischen Sehen im Vorfeld nachgewiesen wurde. Darunter waren 15 Frauen (62,5 %) und neun Männer (37,5 %), welche im Mittel 36,33 Jahre ( $SD = 11,34$ ) alt waren. Die Altersspanne lag zwischen 22 und 56 Jahren. Ein Großteil der Probanden (92 %) verfügte im Vorfeld bereits über Vorerfahrung mit 3D-Inhalten, wobei diese hauptsächlich durch Kinofilme oder Videospiele gesammelt wurde.

### 3. Vortest

Die wahrgenommene Tiefenwirkung wurde in einer gesonderten Erhebung bestimmt, um eine Vergleichbarkeit zwischen den autostereoskopischen Displays herzustellen und die wahrgenommene Disparität zu bestimmen.

Während die Wahrnehmung der Tiefe unabhängig von der Verschiebung der Zielreize zu den Distraktoren war ( $p = .235$ ), wurden die Unterschiede zwischen den Ebenen als größer wahrgenommen, je näher die Ebenen am Betrachter lagen ( $F_{(1,26, 13,89)}= 20.78, p < .001$ ). Bei Darstellung der Distraktoren auf der Nullebene betrug der wahrgenommene Abstand 6,42 Millimeter ( $SD = 0.82$ ), auf der positiven Grundebene 5,95 Millimeter ( $SD = 0.75$ ) und auf der negativen Grundebene 7,52 Millimeter ( $SD = 0.91$ ). Die wahrgenommene Tiefe unterschied sich zwischen den Displays nicht ( $p = .779$ ).

#### 4. Ergebnisse

Für die Qualität der Aufgabenbearbeitung weist die Teststatistik einen signifikanten Einfluss der Faktoren „Dimension“ ( $F_{(1,45, 31,95)}= 28.06, p < .001$ ) und „Komplexität“ ( $F_{(2, 44)}= 104.38, p < .001$ ) auf. Darüber hinaus zeigt sich eine Wechselwirkung zwischen diesen Faktoren ( $F_{(4, 88)}= 8.32, p < .001$ ), welche in Bild 2 dargestellt ist. In der geringen Komplexität liegt kein Einfluss der Dimension vor, wohingegen bei steigender Komplexität der Anzeige die Bedeutung der Darstellungsart zunimmt. In der mittleren und hohen Komplexität liegen die Fehlerprozentzahlen der zweidimensionalen Darstellungen um circa 20 Prozent höher als in der geringer aufgelösten 3D-Darstellung und sogar um 30 Prozent höher als in der hochaufgelösten 3D-Darstellung. Dabei erzeugt das Displays mit der höheren Auflösung und dem geringeren Potential an Tiefenwirkung weniger Fehler. Der visuelle Eindruck des Diagramms wird auch durch den Kontrast belegt ( $F_{(1, 22)}= 19.93, p < .001, r = .69$ ).

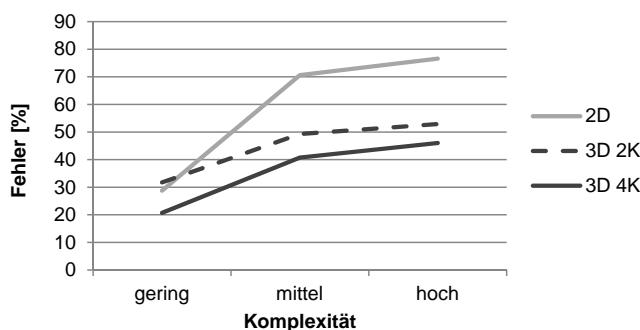


Bild 2: Interaktionsdiagramm der Fehlerprozentzahlen für die Faktoren Dimension und Komplexität

Rein deskriptiv erzeugt die Variante mit monokularen Tiefenreizen bei den Bildern ähnlich viele Fehleranteile wie die Darstellung ohne Tiefenreize. In der hohen Komplexität liegt sie mit 73,5 Prozent an Fehlern im Mittel ( $SD = 4.13$ ) sogar um mehr als zehn Prozent über der Fehlerprozentrate der 2D-Darstellung ( $M = 62.50$ ;  $SD = 5.06$ ).

Der Faktor „Kategorie“ (Bild bzw. Liste) hat im Gegensatz zur Anzeigedauer ( $F_{(1, 19)} = 4.60$ ,  $p = .045$ ) keinen Einfluss auf die Fehleranzahl ( $p = .405$ ). Bei der längeren Anzeigedauer werden im Mittel 39,4 Prozent ( $SD = 4.63$ ) Fehler gemacht, während bei der kurzen Anzeigedauer im Mittel 53,8 Prozent ( $SD = 6.86$ ) Fehler entstehen.

Die Effekte der positiven und negativen Parallaxe werden für die beiden Between-Faktoren einzeln und deskriptiv ausgewertet. Dabei zeigt sich für die Parallaxenverschiebung ein Unterschied bei den Bildern, aber nicht bei den Listen. Die Fehleranzahl liegt bei den Bildern für die negative Parallaxe ( $M = 29.69$ ;  $SD = 6.74$ ) um fast zehn Prozent niedriger als für die positive Parallaxe ( $M = 38.72$ ;  $SD = 7.67$ ). Bei den Listen ist dieser Unterschied zwischen der negativen ( $M = 44.99$ ,  $SD = 8.5$ ) und positiven Parallaxe ( $M = 45.37$ ,  $SD = 8.42$ ) nicht zu finden (Bild 3).

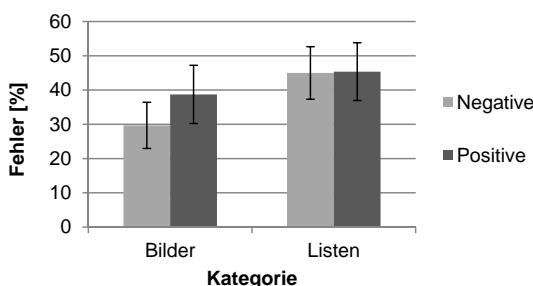


Bild 3: Mittelwertdiagramm mit Standardabweichung der Fehleranzahl für die negative und positive Parallaxe in Bezug zur Kategorie

Für die subjektiv empfundene Beanspruchung durch die Aufgabenbearbeitung, gemessen durch die Skala zur Erfassung subjektiv erlebter Beanspruchung (SEA), weist die Teststatistik einen Haupteffekt für die Dimension ( $F_{(2, 46)} = 5.20$ ,  $p = .009$ ) und die Komplexität ( $F_{(1,43, 32.97)} = 39.80$ ,  $p < .001$ ) auf. Dabei nimmt die Beanspruchung mit steigender Komplexität deutlich zu (Bild 4). Die Kontraste belegen diese Unterschiede zwischen geringer und mittlerer Komplexität ( $F_{(1, 23)} = 29.94$ ,  $p < .001$ ,  $r = .75$ ) und mittlerer und hoher Komplexität ( $F_{(1, 23)} = 26.86$ ,  $p < .001$ ,  $r = .73$ ). Im Post-hoc-Vergleich existiert jedoch nur ein Unterschied zwischen der zweidimensionalen und der hochaufgelösten dreidimensionalen Darstellung

( $p = .026$ ). Die Beanspruchung für die Darstellung mit monokularen Tiefenreizen (2,5D) ist deskriptiv gesehen am stärksten ( $M = 141.31$ ;  $SD = 4.12$ ).

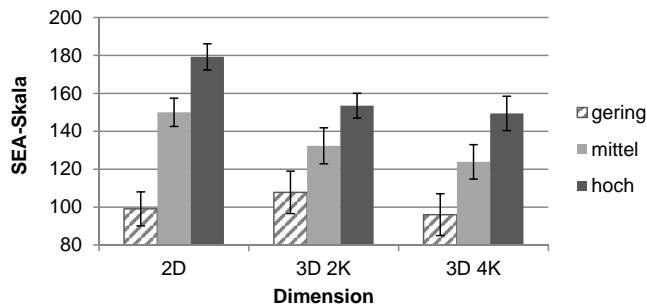


Bild 4: Mittelwertdiagramm der subjektiven Beanspruchung für die Faktoren „Dimension“ und „Komplexität“. Die SEA-Skala kann Werte von 0 bis 220 annehmen.

Für den Faktor „Anzeigedauer“ zeigt sich ein signifikanter Effekt ( $F_{(1, 20)} = 7.16$ ,  $p = .015$ ), während die Kategorie keinen Einfluss ausübt. Mit der kurzen Anzeigedauer ( $M = 145.88$ ;  $SD = 7.67$ ) wird das Bearbeiten der Aufgabe als beanspruchender wahrgenommen als bei der längeren Dauer ( $M = 117.85$ ;  $SD = 7.67$ ).

## 5. Diskussion und Ausblick

Die beschriebene Untersuchung hatte das Ziel, Aufschluss darüber zu geben, inwieweit eine Tiefenstaffelung von Informationen mittels stereoskopischer Reize die Wahrnehmung von Displayinhalten unterstützen kann. Des Weiteren sollten technische Gestaltungsparameter untersucht und deren Wirkung zu erfasst werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine binokulare Tiefenstaffelung die Wahrnehmung von Informationen unterstützt. Die Betrachter machen weniger Fehler und erleben eine geringere Beanspruchung als bei einer zweidimensionalen Darstellung. Die Interaktion des Effekts der Dimension mit der Komplexität zeigt, dass die Wahrnehmung besonders bei sehr komplexen Ansichten unterstützt werden kann. Dabei reicht sogar ein relativ geringer Tiefeneindruck von wenigen Millimetern aus, um eine Wirkung zu erzielen. Die Argumentation, dass die Vorteile einer parallelen Suche nur bei großen Disparitäten entstehen [5], ist damit aus Sicht dieser Studie hinfällig. Für die Gestaltung zeigt sich, dass für Listen sowohl die negative als auch die positive Parallaxe geeignet ist. Für die grafischen Elemente ist dagegen die Verwendung der negativen Parallaxe vorzuziehen.

Die Nutzung von monokularen Tiefenreizen für eine perspektivische Tiefe hat in dieser Studie keinen positiven Einfluss auf die Wahrnehmung. Damit stehen die hier gewonnenen Ergebnisse im Gegensatz zu Aussagen, welche einen Vorteil der perspektivischen Darstellungen gegenüber zweidimensionalen Darstellungen für die Erkennungsleistung besitzen [17, 18]. Das Ausbleiben dieser Vorteile bzw. die beschriebene Verschlechterung der Leistung durch eine 2,5D-Darstellung, wie sie in dieser Studie gefunden wurde, könnte aber auch auf die dezente Verwendung dieser Tiefenreize zurückzuführen sein.

Insgesamt kann aus den Ergebnissen geschlossen werden, dass Informationen aus sehr komplexen Anzeigehalten durch Unterstützung von stereoskopischen Tiefenreizen sehr schnell identifiziert und erfasst werden können. Dadurch könnten Blickzuwendungen deutlich verkürzt werden. Die Nutzung stereoskopischer Tiefe ist dieser Untersuchung nach eine gute Methode, um die visuelle Salienz zu erhöhen. Jedoch bleibt die Frage offen, in welchem Verhältnis ein stereoskopischer Pop-out-Effekt im Vergleich zu klassischen Designelementen wie Farbe und Größe steht.

Über die Staffelung von Informationen auf zwei Ebenen hinaus bieten dreidimensionale Darstellungen die Möglichkeit, Interfaces neu zu gestalten und beispielsweise Bedienmenüs neu zu strukturieren. Ebenso können stereoskopische Anzeigen des Fahrzeugumfelds oder der Navigationskarte den Abgleich zwischen Abbildung und Realität für den Fahrer vereinfachen. Dabei lässt sich auf Basis dieser Studie jedoch keine direkte Aussage darüber treffen, welche Wirkungen autostereoskopische Displays während der Fahrt auf das Blick- und Fahrverhalten ausüben. Die Umfokussierungen zwischen Fahrszene und künstlichen Tiefen auf dem Display stellen eine unbekannte Anforderung dar. Ebenso kann die für die verwendete Technik notwendige genaue Positionierung des Fahrers einen Einfluss besitzen. Zur Beantwortung dieser Fragen sollten als weitere Schritte Studien während des realen Fahrens durchgeführt werden.

## 6. Literaturangaben

- [1] McIntire, J. P., Havig, P. R. u. Geiselman, E. E.: Stereoscopic 3D displays and human performance: A comprehensive review. *Displays* 35 (2014), S. 18–26
- [2] Victor, T., Bärman, J., Boda, C. N., Dozza, M., Engström, J., Flannagan, C., Lee, J. D. u. Markkula, G.: Analysis of Naturalistic Driving Study Data. Safer Glances, Driver Inattention, and Crash Risk. SHRP 2 Safety Project S08A, 2014.  
[http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp2/SHRP2\\_prepupS08A/report.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp2/SHRP2_prepupS08A/report.pdf)
- [3] Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J., Perez, M. A., Hankey, J., Ramsey, D., Gupta, S., Bucher, C., Doerzaph, Z. R., Jermeland, J. u. Knipling, R. R.: The 100-Car Naturalistic Driving Study. Phase II – Results of the 100-Car Field Experiment. (No. HS-810 593). 2006
- [4] Dünser, A., Billinghurst, M. u. Mancero, G.: Evaluating visual search performance with a multi layer display. *OZCHI'08* (2008), S. 307–310
- [5] La Rosa, S. de, Moraglia, G. u. Schneider, B. A.: The magnitude of binocular disparity modulates search time for targets defined by a conjunction of depth and colour. *Canadian Journal of Experimental Psychology* 62 (2008) 3, S. 150–155
- [6] Nakayama, K. u. Silverman, G. H.: Serial and parallel processing of visual feature conjunctions. *Nature* 320 (1986) 6059, S. 264–265
- [7] Nakayama, K. u. Joseph, J. S.: Attention, Pattern Recognition, and Pop-Out in Visual Search. In: Parasuraman, R. (Hrsg.): *The Attentive Brain*. Cambridge: MIT Press 1998, S. 279–298
- [8] Broy, N.: Stereoscopic 3D User Interfaces. Exploring the Potentials and Risks of 3D Displays in Cars. Stuttgart
- [9] Krüger, K.: Nutzen und Grenzen von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen, Humboldt-Universität zu Berlin Dissertation. Berlin 2008
- [10] O'Toole, A. J. u. Walker, C. L.: On the preattentive accessibility of stereoscopic disparity. Evidence from visual search. *Perception & Psychophysics* 59 (1997) 2, S. 202–218
- [11] Broy, N., Guo, M., Schneegass, S., Pfleging, B. u. Alt, F.: Introducing novel technologies in the car. Conducting a real-world study to test 3D dashboards. *AutomotiveUI '15* (2015), S. 179–186
- [12] Shibata, T., Kim, J., Hoffman, D. M. u. Banks, M. S.: The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays. *Journal of vision* 11 (2011) 8, S. 11
- [13] Terzić, K. u. Hansard, M.: Methods for reducing visual discomfort in stereoscopic 3D. A review. *Signal Processing: Image Communication* 47 (2016), S. 402–416

- [14] Sandbrink, J.: Der Einfluss von Displayposition und Anzeigenkomplexität auf die Fahraufgabe. 2. Kongress Fachgruppe Verkehrspsychologie. Bergisch Gladbach 2017
- [15] Fowkes, M., Ward, D. D. u. Jesty, P.: Deliverable 4: Recommended Metodology for the preliminary safety analysis of the HMI of an IVIS concept or design. Report of European Project HASTE. 2005
- [16] Östlund, J., Nilsson, L., Carsten, O., Merat, N., Jamson, H., Jamson, S., Mouta, S., Carvalhais, J., Santos, J., Anttila, V., Sandberg, H.: Luoma, D., Waard, K. de, Brookhuis, E., Johansson, E., Engströ, J., Victor, T., Harbluk, J., Janssen, W. u. Brouwer, R.: Deliverable 2: HMI and Safety-Related Driver Performance. Report of European Project HASTE. 2004
- [17] Dixon, S., Fitzhugh, E. u. Aleva, D.: Human factors guidelines for applications of 3D perspectives: a literature review. SPIE Proceedings. SPIE 2009, 73270K
- [18] Naikar, N.: Perspective displays: a review of human factors issues. Technical Report DSTO-TR-0630. Australia 1998.  
<http://dspace.dsto.defence.gov.au/dspace/handle/1947/4253>

# Gestaltung eines Fahrzeuginterieurs aus ergonomischer Sicht – Gutes Raumgefühl oder verloren im Raum?

M. Sc. **Denis Krun**, Dr. **Gerrit Schmidt**,  
Volkswagen AG, Wolfsburg;  
Prof. Dr. **Matthias Rötting**, Technische Universität Berlin

## Kurzfassung

In dieser experimentellen Studie wurde der Einfluss der Instrumententafel-Länge auf das wahrgenommene Raum- und Sicherheitsgefühl sowie die präferierte Sitzposition untersucht. 24 Probanden bewerteten im Paarvergleich und mittels semantischen Differentials, sowohl aus Fahrer- als auch aus Beifahrerperspektive, drei unterschiedliche Varianten der Instrumententafel-Länge. Das Ziel der Untersuchung war, den Zusammenhang aus Länge der Instrumententafel und dem wahrgenommenen Raum- bzw. Sicherheitsgefühl zu bestimmen und den Einfluss auf die Sitzposition zu ermitteln.

Die Auswertung der Sitzeinstellung zeigte auf der Fahrerseite keine und auf der Beifahrerseite eine signifikante Veränderung der Sitzposition. Die subjektive Wahrnehmung scheint von der Perspektive unbeeinflusst zu sein, denn die Bewertungen des Raum- und Sicherheitsgefühls unterscheiden sich zwischen Fahrer und Beifahrer nicht. Die Länge der Instrumententafel hingegen beeinflusst Raum- und Sicherheitsgefühl entscheidend und zeigt ein deutliches Optimum bei der mittellangen Variante.

## 1. Einleitung

Raumgefühl ist heute mehr als nur ein Begriff zur Beschreibung des subjektiven Empfindens, das durch die Wahrnehmung einer Umgebung ausgelöst wird. Raumgefühl hat sich zum Bewertungs- und Vergleichskriterium für Automobile entwickelt und tritt verstärkt in das Bewusstsein der Menschen.

Die aktuelle ergonomische Fahrerplatzauslegung konzentriert sich auf die Themen Anthropometrie<sup>1</sup>, Vermeidung von Diskomfort sowie Sicht auf Instrumente und die Fahrzeugumgebung. Auf Basis dieser Methodik bieten heutige Automobile über alle Fahrzeugklassen ein hohes Komfortniveau, das ein ermüdungssarmes Reisen ermöglicht. Die hinreichende Erfüllung der

---

<sup>1</sup> Anthropometrie ist die Lehre/Wissenschaft der Maße des menschlichen Körpers

ergonomischen Bedürfnisse des Fahrers führt zu einer verstärkten Wahrnehmung der bisher weniger bedeutenden Faktoren der Ästhetik.

Das Gefallen eines Interieurs bzw. das sich Wohlfühlen innerhalb eines Fahrzeuges wird vom Kunden und der Presse zunehmend differenzierter beurteilt. Dabei sind nicht allein die Maße des Innenraumes von Bedeutung, sondern auch die Gestaltung der einzelnen Komponenten, wie Instrumententafel (I-Tafel), A-Säule, Mittelkonsole oder Türverkleidung sowie deren Zusammenspiel als Gesamtheit. Die gestaltgebenden Faktoren Form, Farbe, Material und Oberfläche [1] wirken sich auf das Raumgefühl aus und beeinflussen damit das ganzheitliche Komfortempfinden in einem Fahrzeug; sowohl positiv als auch negativ. Aktuelle Bestrebungen im Bereich der Automobilentwicklung zielen darauf ab, die Fahrerplatzauslegung um den Aspekt psychophysischer Funktionen zu erweitern, indem Zusammenhänge aus objektiven Parameteränderungen und subjektiver Raumgefühlbewertung experimentell untersucht werden.

Die vorliegende Studie – durchgeführt an einer sog. Sitzkiste<sup>2</sup> – zeigt einen Auszug dieses Vorhabens. In einem Probandenversuch wurde die Länge der I-Tafel auf der Beifahrerseite variiert und neben der Bewertung von Raum- und Sicherheitsgefühl erfolgte die messtechnische Erfassung der Sitzposition für die Fahrer- und Beifahrerseite.

## 2. Grundlagen

Für ein einheitliches Verständnis wird zunächst der Begriff Raumgefühl erklärt und in das Modell der Komfortpyramide eingeordnet. Das Modell stellt zudem die Verknüpfung zur Fahrerplatzauslegung dar und macht die Bedeutung der visuellen Raumwahrnehmung sowie des gestaltgebenden Faktors Form für den Fachbereich der Fahrzeugergonomie deutlich.

### 2.1 Raumgefühl

Um den Begriff Raumgefühl zu verstehen, bedarf es einer Kontextbetrachtung. Denn Raumgefühl ist ein subjektives Maß, das sowohl von der Umgebung als auch der Person abhängig ist. Ein gutes Raumgefühl im architektonischen Zusammenhang begründet sich auf anders priorisierten Attributen als es in einem Fahrzeuginterieur der Fall ist. Zudem ist Raumgefühl immer individuell, da es das Resultat des Kognitionsprozesses ist, in den sowohl die mit allen Sinnen wahrgenommene, räumlich limitierte Umgebung als auch die persönlichen Erfahrungen und Erwartungen der jeweiligen Person einfließen [2].

Raumgefühl ist nicht mit Raumangebot bzw. der Raumgröße – im Falle eines Fahrzeugs der verfügbare, den Fahrer und Beifahrer umgebende, Freiraum – gleichzusetzen. Vielmehr ist die Größe eines Fahrzeuginnenraumes ein objektiver Parameter, der in einzelne Unterkategorien

---

<sup>2</sup> Ein aus Hartschaum gefrästes Fahrzeugmodell in Originalgröße

wie Dachhöhe, Radstand oder Fahrzeugsbreite unterteilt werden kann und als Teilaspekt das Raumgefühl beeinflusst [3].

## 2.2 Ergonomische Fahrerplatzauslegung

Die ergonomische Fahrerplatzauslegung erweitert die gesetzlichen Vorschriften, welche die Themen der Fahrzeugsicherheit und Sichtbedingungen beschreiben, um menschbezogene Kriterien. Neben der Bereitstellung einer sicheren Führung des Fahrzeugs ist das primäre Ziel der Ergonomie die Minimierung von Diskomfort, wozu sowohl mentale und physische Belastung, als auch die Ablenkung des Fahrers zählen. Die unterschiedlichen anthropometrischen Anforderungen des relevanten Kundenspektrums werden, von der Definition der Sitz- und Lenkradposition über die Festlegung von Erreichbarkeit und Sichtbarkeit aller weiteren Bedien- und Anzeigekomponenten, bis hin zur Lokalisierung und Gestaltung von unterstützenden Elementen wie Armlehnen, berücksichtigt.

Das Komfortempfinden des Menschen gliedert sich in verschiedenartige Bedürfnisse, die sich in ihrer Priorisierung unterscheiden. Inspiriert von der Maslowschen Theorie, beschreibt Krist [4] diesen Zusammenhang in einer Komfortpyramide (Bild 1). In diesem Modell nimmt die Wichtigkeit bzw. der Einfluss der Bedürfnisebenen von unten nach oben ab.

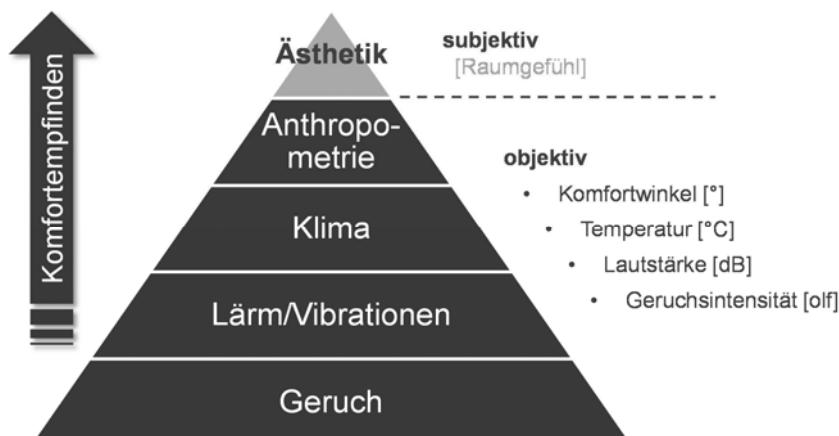


Bild 1: Komfortpyramide [5], nach [4]

Die hierarchische Unterteilung stellt hierbei lediglich die globalen Schwerpunkte der Bedürfnisse dar, die individuell oder je nach Ausprägung der einzelnen Kriterien variieren und sich überlappen können [6]. Das wahrgenommene Komfortniveau ist dabei umso höher, je mehr

Grundbedürfnisse erfüllt sind. Kriterien der Anthropometrie sind in diesem Modell den Umweltfaktoren Geruch, Lärm und Klima übergeordnet und gewinnen erst dann an Bedeutung, wenn die darunterliegenden Bedürfnisse zufriedenstellend erfüllt sind.

Zhang et al. [7] stellten fest, dass Komfort und Diskomfort keine Begriffe sind, die als entgegengesetzte Extrema einer Achse anzusehen sind, sondern als zwei unabhängige Dimensionen zur selben Zeit vom Menschen wahrgenommen werden können. Diskomfort bezieht sich auf objektive, physikalische Größen und wird mit dem Aspekt des Erleidens in Verbindung gebracht. Komfort hingegen beruht auf subjektiven Urteilen und wird dem Aspekt des Gefalens zugeordnet. Aufgrund des kontinuierlichen Fortschrittes in der Automobilentwicklung ist Diskomfort auf ein sehr geringes Maß reduziert, sodass ästhetische Faktoren für das wahrnehmbare Komfortempfinden in einem Fahrzeug immer bedeutender werden. Ulrich [8], zitiert nach [9], postuliert dem Menschen eine affektive, emotionale und unmittelbare Beurteilung ästhetischer Reize. Demnach wird der Gesamtkomfort eines Fahrzeugs, über die Bewertung des Raumgefühls, bereits beim Erstkontakt mit dem Interieur entscheidend beeinflusst.

Aus diesem Grund konzentrieren sich diese Studie sowie weiterführende Betrachtungen zu diesem Thema ausschließlich auf Querschnittsanalysen. Ebenso ist Langzeitdiskomfort kein Bestandteil der Untersuchungen.

### **2.3 Form als entscheidende Einflussgröße auf die visuelle Raumwahrnehmung**

Bei heutigen Fahrzeugen sind die Kriterien des Umweltkomforts – von Ausnahmen abgesehen – hinreichend erfüllt. Aufgrund von Gleichteilstrategien, die alle Hersteller aus ökonomischen Aspekten verfolgen, sind Komponenten wie Sitz, Lenkrad oder Bedienelemente oftmals identisch. Die Differenzierung der Fahrzeuge innerhalb einer Marke erfolgt somit größtenteils auf Basis ästhetischer Merkmale, welche der visuellen Wahrnehmung unterliegen und das Raumgefühl entscheidend beeinflussen. Damit gewinnen Faktoren wie Form, Farbe, Material oder Oberfläche für das ganzheitliche Komfortempfinden an Bedeutung. Diese Aussage stützen Untersuchungen von Tanoue, Ishizaka und Nagamachi [10]. Studien von Wagner [11] sowie Mandel, Senel und Maier [12] belegen zudem den Einfluss des Faktors Form sowohl auf die Sitzposition als auch auf das Raumgefühl.

Mit der Elektrifizierung des Antriebes reduziert sich die Anzahl der benötigten Komponenten, womit Freiraum im Fahrzeugpackage generiert wird. Insbesondere im Bereich des Innenraumes eröffnen sich neue Möglichkeiten der Gestaltung. Die Verlagerung von Bauteilen vor die Stirnwand bietet die Option sich vom bisherigen Grundkonzept der I-Tafel zu lösen und eine vollkommen neue Innenraumwirkung zu erzielen. Somit birgt der Faktor Form, insbesondere

im Bereich der I-Tafel, großes Potenzial das Raumgefühl und den Gesamtkomfort zukünftiger Fahrzeuge zu beeinflussen.

Bei Veränderung von gewohnten Abständen zu Flächen bzw. Bauteilen drängt sich im Automobilbereich zudem der Aspekt des Sicherheitsgefühls auf. Neben dem Unbehagen, welches große Räume hervorrufen können, verliert ein Fahrzeuginnenraum das Attribut einer Sicherheitszelle. Mandel, Müller und Maier [13] sehen das Bedürfnis nach Sicherheit als Gegenpol zum Bedürfnis nach Freiraum. Da im Rahmen dieser Studie die Variation der I-Tafel-Länge das gewohnte Maß übersteigt, wird auch das Sicherheitsgefühl erhoben.

### 3. Probandenstudie

Zur experimentellen Untersuchung des Einflusses der I-Tafel-Länge auf Raum- und Sicherheitsgefühl, wird in einer Sitzkiste die I-Tafel auf der Beifahrerseite mittels Aufsatzeilen modular gestaltet (Bild 2). Der Variationsbereich erstreckt sich von einem technisch- und packagebedingten Mindestmaß bis zur x-Lage<sup>3</sup> konventioneller I-Tafeln. Aus einer Voruntersuchung ging hervor, dass bei einer feinen Abstufung die wahrnehmbaren Unterschiede in Hinsicht auf die Raumwirkung zu gering für eine differenzierte Beurteilung sind. Demzufolge wurde die Anzahl der Varianten, unter Beibehaltung einer linearen Parameteränderung, auf drei Stufen reduziert. Auf diese Weise konnten den Versuchsteilnehmern die I-Tafel-Längen (lang, mittel und kurz) nacheinander präsentiert werden.

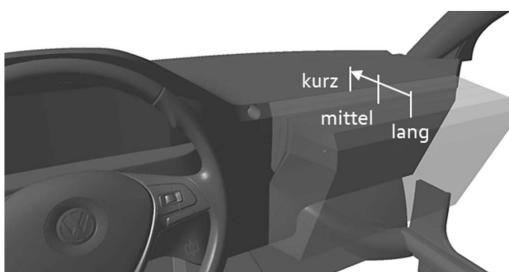


Bild 2: Modularer Variation der I-Tafel-Länge

Des Weiteren dient die vorliegende Studie der Erfassung potenzieller Einflüsse auf die präferierte Sitzposition. Hierzu erfolgte die messtechnische Aufzeichnung (Infrarot-Stereokamera und retroreflektierende Markierungspunkte) der eingestellten Sitzposition eines Probanden für

---

<sup>3</sup> Fahrzeulgängsachse; Orientierung: Mittelpunkt Vorderachse zum Fahrzeugh Heck (nach SAE J1100)

jede Variante der I-Tafel-Länge bei beiden Betrachtungsperspektiven (Fahrer- und Beifahrerplatz).

### 3.1 Probandenkollektiv

An der Studie partizipierten 24 Probanden im Alter von 21 bis 60 Jahren ( $M=31,3$  Jahre;  $SD=11,2$ ) und bedienten eine Bandbreite der Körpergröße von 160 cm bis 198,6 cm ( $M=177,1$  cm;  $SD=11,8$ ). Die Stichprobe setzt sich aus Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern verschiedener Abteilungen der Volkswagen AG zusammen (15 männliche und 9 weibliche Personen), die zum Zeitpunkt der Erhebung über kein Expertenwissen zum Thema Ergonomie bzw. Raumgefühl verfügten.

### 3.2 Studiendesign und Durchführung

Die Untersuchung begann mit einer Einweisung und der Vermessung der Körperhöhe bevor die Probanden in der Sitzkiste Platz nahmen. Um ihnen Zeit zur Eingewöhnung an die Testumgebung zu gewähren, wurden sie gebeten ihre präferierte Sitzposition für den Fahrer- und Beifahrerplatz jeweils drei Mal einzustellen. Hierbei verließen die Probanden nach jedem Durchgang die Sitzkiste und der Sitz und ggf. das Lenkrad wurden in die Initialposition gebracht. Die Messung der Sitzpositionen diente hierbei der Erhebung von intraindividuellen Streuungen bei der Sitzeinstellung. Im Anschluss daran bewerteten die Versuchsteilnehmer – ohne weitere Veränderung der Sitzposition – die I-Tafel-Varianten im Paarvergleich, indem sie ihre Präferenz in Bezug auf Raum- und Sicherheitsgefühl äußerten. Nachdem ein Proband aus Fahrer- und Beifahrerperspektive die Paarvergleiche abgeschlossen hatte, wurden die Sitze und das Lenkrad wieder in ihre Initialposition gebracht. Mit dem erneuten Einsitzen und Einstellen der Sitzposition beurteilten die Probanden den wahrgenommenen Fahrzeuginnenraum mittels eines semantischen Differentials auf einer siebenstufigen Skala. Hierzu standen 25 Adjektivpaare (Antonyme) zur Verfügung. Nach jeder Bearbeitung eines semantischen Differentials erfolgte eine Messung der eingestellten Sitzposition. Um Reihenfolgeeffekte auszuschließen, erfolgte die Datenerhebung stets in permutierter Anordnung.

## 4. Ergebnisse

Sowohl das Raumgefühl als auch das Sicherheitsgefühl sind von der Länge der I-Tafel, jedoch nicht von der Perspektive, beeinflusst. Der Vergleich der Polaritätsprofile der semantischen Beurteilung für die jeweiligen Varianten der I-Tafel-Länge stützt diese Erkenntnis. Bezüglich der Sitzposition sind auf der Fahrerseite keine Effekte nachweisbar. Auf der Beifahrerseite hingegen zeigt sich die Längseinstellung von der I-Tafel-Länge beeinflusst.

#### 4.1 Raumgefühl und Sicherheitsgefühl

Um eine Aussage zu Rangabständen zu treffen, wurden die Ordinaldaten der Paarvergleichsurteile mittels der Methode des „Law of Comparative Judgement“ (LoCJ) auf ein Intervallskalenniveau transformiert. Dabei wird der Nullpunkt der Skala auf diejenige Variante referenziert, welche die negativste Ausprägung aufweist [14]. Die transformierten Werte sind in Bild 3 visualisiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Perspektive keinen Einfluss auf die Beurteilung von Raum- und Sicherheitsgefühl nimmt. Der direkte Vergleich von mittlerer zu kurzer I-Tafel-Länge zeigt eine Halbierung der Raumgefühlbewertung, wobei diese bei der Variante „lang“ am schlechtesten ausfällt. Beim Sicherheitsgefühl ist eine ähnliche Veränderung der Bewertung von mittellanger zu langer I-Tafel festzustellen. Das pessimale Urteil findet sich hier jedoch bei der kurzen Variante. Die Versuchsteilnehmer bewerten sowohl das Raum- als auch das Sicherheitsgefühl bei der mittellangen I-Tafel am besten.

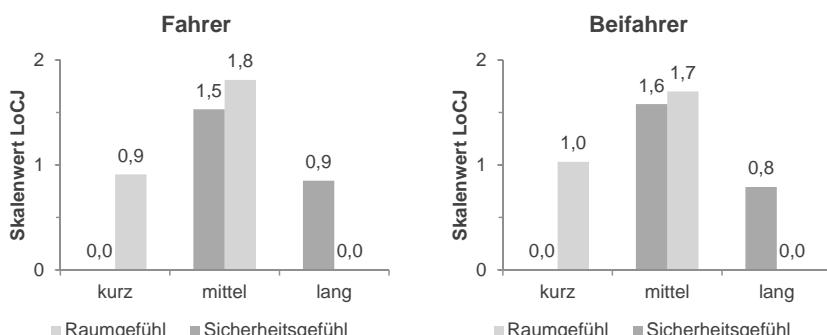


Bild 3: Bewertungen von Raumgefühl und Sicherheitsgefühl aus Fahrer- und Beifahrerperspektive

Aus einer semantischen Beurteilung ergeben sich für die einzelnen Urteilsobjekte (Fahrzeuginnenraum bei verschiedenen I-Tafel-Varianten) charakteristische Profilverläufe, deren Ähnlichkeit sich mittels Korrelationsrechnung bestimmen lässt [14]. Wie Tabelle 1 zu entnehmen ist, korrelieren die entsprechenden Profile der Fahrer- und Beifahrerseite sehr stark. Dies belegt erneut, dass die Perspektive keinen Einfluss auf die Wahrnehmung des Fahrzeuginterieurs hat.

Tabelle 1: Korrelationsmatrix der Polaritätsprofile des semantischen Differentials

	BFS-kurz	BFS-mittel	BFS-lang
FS-kurz	0,90	-	-
FS-mittel	-	0,94	-
FS-lang	-	-	0,92

Fahrerseite (FS), Beifahrerseite (BFS)

Einen detaillierteren Blick auf die Beurteilung des Fahrzeuginnenraumes bieten die Polaritätsprofile der Beifahrerperspektive, dargestellt in Bild 4. Die Adjektivpaare – nachträglich entsprechend ihrer Polung sortiert (links = eher positiv, rechts = eher negativ) – zeigen, dass die mittellange I-Tafel im Vergleich zur langen Variante insgesamt positiver bewertet wurde.

Eine weitere Reduzierung der I-Tafel-Länge resultiert zum einen in einer verbesserten Bewertung jener Items, die den Aspekten Raumgröße und Neugier zuzuordnen sind. Zum anderen verschlechtert sich die Bewertung von Items wie „geborgen/unbehaglich“, „angenehm/störend“ und „gemütlich/ungemütlich“ sowie „stimmig/unstimmig“, „harmonisch/disharmonisch“ und „attraktiv/unattraktiv“, die durch die Begriffe Sicherheit bzw. Design zusammengefasst werden können. Es zeigt sich also, dass auch bei der semantischen Bewertung des Interieurs das Optimum bei der mittleren I-Tafel-Länge liegt.

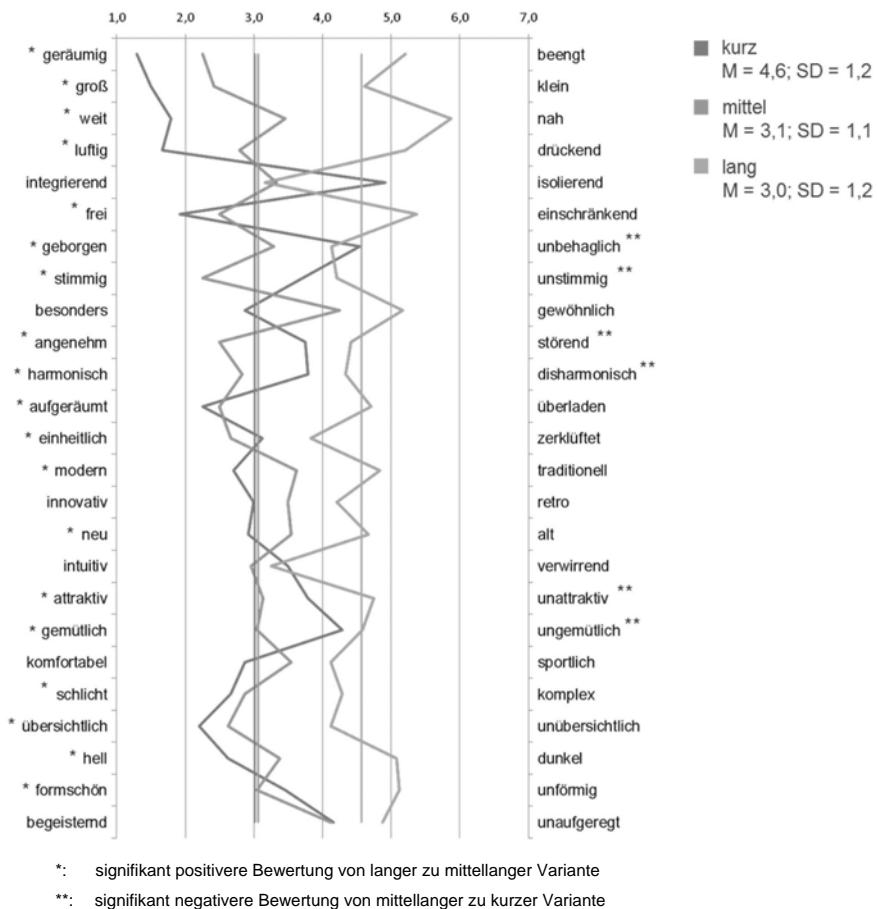


Bild 4: Polaritätsprofile der Beifahrerseite bei verschiedenen I-Tafel-Längen

#### 4.2 Sitzposition

Zur Ermittlung der intraindividuellen Streuung der Sitzeinstellung wurde aus den zu Beginn der Studie erfassten Sitzpositionen (drei Einsitzvorgänge pro Proband) zunächst die individuelle Standardabweichung berechnet und anschließend über das Gesamtkollektiv gemittelt. Für den Fahrerplatz ergibt sich eine intraindividuelle Streuung von 7,4 mm in Längs- und 1,7 mm in

Vertikalrichtung. Auf der Beifahrerseite fällt die Varianz bei der Längseinstellung mit 11,4 mm größer und bei der Höheneinstellung mit 1,2 mm nahezu identisch aus.

Es besteht die Annahme, dass der Einfluss der I-Tafel-Länge auf die Sitzposition mit der Körperhöhe der Testperson variiert. Daher wurden die Daten für die Gruppen „klein“ ( $\leq 1,76$  cm) und „groß“ ( $> 1,76$  cm) separat analysiert. Auf der Fahrerseite zeigt sich die Sitzposition unbeeinflusst von der I-Tafel-Länge, bei kleinen wie großen Versuchsteilnehmern.

Auf der Beifahrerseite allerdings ist für kleine ( $F(2, 22)=17.73, p<.05$ ) und große Probanden ( $F(1.35, 14.81)=6.85, p<.05$ ) ein signifikanter Einfluss der I-Tafel-Länge auf die Längseinstellung des Sitzes festzustellen. Die Detailbetrachtung mittels paarweiser Vergleiche<sup>4</sup> zeigt im Falle der Gruppe „klein“ eine signifikant weiter vorne liegende Sitzposition zwischen der mittellangen und langen I-Tafel ( $-21.6$  mm,  $p<.05$ , 95%-CI[-35.82, -7.45]) sowie zwischen der kurzen und langen I-Tafel ( $-27.6$  mm,  $p<.01$ , 95%-CI[-45.53, -11.59]). Große Probanden saßen nur zwischen der kurzen und langen I-Tafel signifikant weiter vorne ( $-26.4$  mm,  $p<.05$ , 95%-CI[-50.20, -2.65]). Die Höheneinstellung ist auf der Beifahrerseite nur bei der Gruppe „groß“ bei kurzer I-Tafel signifikant höher als bei der langen Variante ( $1.7$  mm,  $p<.05$ , 95%-CI[0.31, 3.03]).

## 5. Diskussion

Mit der Variation der I-Tafel-Länge wird das vom Fahrzeuginsassen wahrgenommene Raumgefühl beeinflusst. Die subjektive Bewertung ist hierbei unabhängig von der Betrachtungsperspektive. Fahrer und Beifahrer nehmen die einseitige Veränderung der I-Tafel-Länge in gleichem Maße wahr. Den Rangdaten der Präferenzurteile ist zu entnehmen, dass der Zusammenhang zwischen Raumangebot und Raumgefühl bzw. Sicherheitsgefühl kein linearer ist. Es existiert ein Optimum, das in dieser Studie im Bereich der mittellangen I-Tafel liegt. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass das Raumgefühl – bis zu einem gewissen Maß – vom Raumangebot profitiert. Beim Sicherheitsgefühl verhält es sich jedoch umgekehrt. Die Probanden scheinen mit den sie umgebenden Flächen Sicherheit und Schutz zu assoziieren. Rücken diese Flächen zu weit von ihnen weg, entsteht ein Gefühl der Unsicherheit. Sowohl aus den Daten der Paarvergleiche als auch aus der semantischen Bewertung des Fahrzeuginnenraumes wird deutlich, dass die alleinige Betrachtung des Raumgefühls zu einer unvollständigen Erfassung des subjektiven Eindrückes führen würde. Für das Wohlbefinden in einem Fahrzeug ist neben der Ästhetik auch der Aspekt der wahrgenommenen Sicherheit entscheidend.

---

<sup>4</sup> Anpassung nach Bonferroni

Die Messung der Sitzeinstellungen liefert zum einen die Erkenntnis, dass die Sitzposition auf der Fahrerseite von zusätzlichen Faktoren wie Erreichbarkeit von Pedalerie und Lenkrad dominiert zu sein scheint, weshalb die I-Tafel-Länge hier keinen Einfluss zeigt. Offen bleibt die Frage, ob der Fahrer seine Sitzposition auch dann nicht verändert, wenn die Länge der I-Tafel über die gesamte Breite variiert werden würde. Zum anderen kann festgestellt werden, dass Beifahrer ihre Sitzposition bei kürzerer I-Tafel (mittellang) um ca. 2 cm nach vorne verlagern. Eine weitere Verkürzung der I-Tafel (kurz) resultiert jedoch in keiner zusätzlichen Vorverlagerung der Sitzposition. Dies kann auf die Fußablage zurückgeführt werden, die als Orientierung bei der Sitzeinstellung fungiert und in ihrer Position nicht verändert wurde.

Die Studienergebnisse belegen, dass für ein gutes Raumgefühl in einem Pkw nicht allein die Raumgröße entscheidend ist, sondern auch ästhetische Faktoren einen Einfluss nehmen. Der Zusammenhang aus I-Tafel-Länge und subjektiver Bewertung, der einem Idealpunktverlauf folgt, belegt, dass ein großes Raumangebot nicht mit gutem Raumgefühl gleichgesetzt werden darf. Vielmehr gilt es für das Wohlbefinden innerhalb eines Fahrzeugs den optimalen Kompromiss aus Raum- und Sicherheitsgefühl bereitzustellen. Mithilfe der in dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse kann das vom Kunden wahrnehmbare Komfortniveau zukünftiger Fahrzeuge nochmals verbessert werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] M. Godau, „www.designwissen.net,“ SCHWERMER Design + Kommunikation, Juli 2008. [Online]. Available: <http://www.designwissen.net/seiten/designfunktionen>. [Zugriff am 17. Juli 2017].
- [2] R. Mandel, J. Klarzyk und T. Maier, „Impact of visual preconditioning on the comfort rating of the vehicle interior,“ in 15th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology, Stuttgart, 2015.
- [3] H. Bubb, R. E. Grünen und W. Remlinger, „Raumgefühl,“ in Automobilergonomie, Wiesbaden, Springer, 2015, p. 462.
- [4] R. Krist, Modellierung des Sitzkomforts, eine experimentelle Studie, Weiden: Schuch, 1994.
- [5] D. Krun, „Beeinflussen psychophysische Effekte auch die Sitzposition im Fahrzeug?,“ in RAMSIS User Conference 2017, Heidelberg, 2017.
- [6] J. Hartung, „Statischer Sitzkomfort,“ FAT 189 Darstellung des Schwingungsverhaltens von Fahrzeuginsassen - Symbiose aus Experiment und Simulation, p. 10, 2005.

- [7] L. Zhang, M. G. Helander und C. G. Drury, „Identifying factors of comfort and discomfort in sitting,“ *Human Factors* 38, pp. 377-389, 1996.
- [8] K. T. Ulrich, Design, Pennsylvania: Universitiy of Pennsylvania, 2011.
- [9] A. Oehme, Ästhetisches Verständnis und ästhetische Wertschätzung von Automobildesign, Potsdam: Universitätsverlag Potsdam, 2013, p. 53.
- [10] C. Tanoue, K. Ishizaka und M. Nagamachi, „Kansei Engineering: A study on perception of vehicle interior image,“ *International Journal of Industrial Ergonomics* 19(2), pp. 115-128, Februar 1997.
- [11] P.-O. Wagner, „Der Mensch als entscheidende Zielgröße im Produktentstehungsprozess,“ in *Digital Humans in Application*, Leipzig, 2013.
- [12] R. Mandel, F. Senel und T. Maier, „Nutzerzentrierte Gestaltung des Fahrzeuginnenraumes - Untersuchungen zur Raumwirkung,“ in *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2013*, Stuttgart, 2013.
- [13] R. Mandel, A. Müller und T. Maier, „How much room for convenience? Factors contributing to perceived comfort in electric vehicles,“ in *13th Stuttgarter International Symposium - Automotive and Engine Technology*, Stuttgart, 2013.
- [14] J. Bortz und N. Doering, *Forschungsmethoden und Evaluation*, Bd. 5, Berlin - Heidelberg: Springer, 2016.

# Objektive Erfassung und subjektive Bewertung menschlicher Trajektorienwahl in einer Naturalistic Driving Study

**C. Lex, M. Schabauer, M. Semmer, Z. Magosi, A. Eichberger,  
I. Koglbauer,**

Institut für Fahrzeugtechnik, Technische Universität Graz, Österreich;

**J. Holzinger, T. Schlömicher**, AVL List GmbH, Graz, Österreich

## Kurzfassung

In höher automatisierten Fahrfunktionen (SAE Level 3+) werden menschliche Fahrerinnen und Fahrer zu Insassen der automatisierten Fahrfunktion, die schrittweise keine Fahraufgaben mehr übernehmen müssen. Um zu gewährleisten, dass diese Fahrfunktionen verwendet werden, müssen hohe Niveaus von Vertrauen und Akzeptanz der Insassen in die Funktionen erreicht werden. Studien zeigen, dass diese dann erreicht werden, wenn automatisierte Funktionen menschliches Verhalten imitieren. Um Erkenntnisse über die menschliche Trajektorienwahl sowie die subjektive Bewertung dieser durch Insassen zu erlangen, wurde eine Studie mit 24 Autofahrerinnen und Autorfahern (12 Frauen) im Alter von 29 bis 40 Jahren durchgeführt. Eine Methodik wird präsentiert, anhand derer die gefahrene Trajektorie objektiv mit Messungen von Satellitennavigations- (GNSS) und Kameradaten rekonstruiert werden kann. Zusätzlich werden die Fahrgeschwindigkeit sowie der laterale Abstand zum Gegenverkehr berücksichtigt. Die erhaltenen Erkenntnisse tragen zur zukünftigen Gestaltung von Trajektorien für automatisierte Fahrfunktionen bei, die von hohen Werten für Vertrauen und Akzeptanz durch die Insassen gekennzeichnet sind.

## 1. Einleitung

Laut Weltgesundheitsorganisation werden durch Unfälle im Straßenverkehr jährlich bis zu 50 Millionen Menschen verletzt und mehr als 1,2 Millionen Menschen getötet. Die Verwendung von automatisierter Systemen gilt als zielführende Maßnahme zur Reduktion der Verletzten im Straßenverkehr und Verkehrstoten, (1). Auch die europäische Kommission hat die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen als Schlüsselmaßnahme zur Verbesserung der Verkehrssicherheit identifiziert, (2).

Mit steigender Automatisierung von Fahrfunktionen wird ab SAE Level 3+ schrittweise in gewissen Fahrsituationen oder Straßenabschnitten keine menschliche Fahrerin oder Fahrer mehr benötigt, (3). Dadurch werden alle Insassen zu "Beifahrerinnen und Beifahrern" der automatisierten Fahrfunktion, die ihren Fahrstil an anderen Verkehr-, Umgebungs- und Wit-

rungsbedingungen anpassen muss. Damit steigt die Bedeutung von Vertrauen, Akzeptanz und des Sicherheitsempfindens der Insassen in die automatisierte Fahrfunktion. In Fahrzeugen mit menschlichen Fahrerinnen oder Fahrern haben Insassen die Möglichkeit, mit dem Lenker oder der Lenkerin direkt zu kommunizieren, wenn zum Beispiel wenig Vertrauen in das Fahrverhalten in bestimmten Verkehrssituationen besteht.

Die Akzeptanz von automatisierten Fahrfunktionen hängt davon ab, ob Nutzerinnen und Nutzer einen deutlich spürbaren Vorteil durch die Fahrfunktion erleben, wie zum Beispiel durch höheren Komfort oder erhöhte Fahrsicherheit, (4). Untersuchungen über den Abstandsregeltempomaten haben gezeigt, dass Vertrauen und Akzeptanz von Fahrerinnen und Fahrern steigen, wenn die automatisierte Fahrfunktion menschliches Fahrverhalten nachahmt, (5). Für den Abstandsregeltempomaten konnte auch gezeigt werden, dass die Effektivität steigt, wenn die Zeitlücke und Abstandswarnungen individuell und an Umgebungsbedingungen angepasst werden können, (6).

Für höher automatisierte Fahrfunktionen ab SAE Level 3+ besteht die Notwendigkeit, die Bewegung des Fahrzeuges und seine Trajektorie vorausschauend zu planen. Dies wird meist unter dem englischen Begriff *Motion, Path oder Trajectory Planning* zusammengefasst. Unter Berücksichtigung von unvermeidlichen Modell- und Messunsicherheiten muss diese geplante Bewegung dann durch die automatisierte Fahrfunktion umgesetzt werden. Diese Fahraufgabe wird meist mit *Motion, Path oder Trajectory Tracking* bezeichnet. Die Bewegung des Fahrzeuges muss dabei sicher und komfortabel sein, während gleichzeitig die Gegebenheit der Straßeninfrastruktur, andere Verkehrsteilnehmer und Witterungsbedingungen berücksichtigen werden müssen, (7). Die Bedeutung, die Trajektorie auch an subjektiven Kriterien wie Komfort anzupassen, wird in mehreren Untersuchungen erwähnt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass eine Trajektorie sowohl sicher wie auch komfortabel sein muss. Um das zu erreichen, empfiehlt (8) eine klare Trennung zwischen der Entscheidungsfindung, ob ein Fahrstreifenwechsel stattfinden soll oder nicht, und der Trajektorienplanung selbst. In (9) wiederum wird die Berücksichtigung von subjektiven Kriterien vorgeschlagen, um die Qualität einer mathematisch optimierten Referenztrajektorie zu bewerten. Vordefinierte Anwenderpräferenzen gehen dabei in die Optimierung der Trajektorie ein, insbesondere dem Querabstand und der Krümmung innerhalb einer vorgegebenen Fahrstreifengeometrie. Der Fokus der erwähnten Untersuchungen liegt dabei in der technischen Berücksichtigung von gegebenen Anwenderpräferenzen für *Motion Planning* und *Trajectory Tracking*, nicht jedoch an verschiedenen Präferenzen selbst.

Studien haben gezeigt, dass diese Präferenzen einerseits von menschlichen Faktoren abhängen, wie dem Alter, dem Geschlecht und der Fahrerfahrung der Insassen, (10), (11). Das Vertrauen auf Fahrerassistenzsystemen ist größer, bei einer größere wahrgenommene Ähnlichkeit Menschen-Automat, (12).

In diesem Beitrag wird die Trajektorienwahl von menschlichen Fahrerinnen und Fahrern sowie die subjektive Bewertung von Beifahrerinnen und Beifahrern untersucht. Um objektive Kriterien zur Bewertung und Beschreibung der gefahrenen Trajektorie zu erhalten, wird in einem ersten Schritt die Rekonstruktion der gefahrenen Trajektorien auf Basis von einem Kamerasystem sowie Daten vom *Global Navigation Satellite System* (GNSS) in Kapitel 2 beschrieben. Eine Studie mit 12 Fahrerinnen und 12 Fahrern im Alter zwischen 29 und 40 Jahren wurde auf einer öffentlichen Straße durchgeführt, welche in Kapitel 3 dargestellt ist. Objektive und subjektive Ergebnisse dieser Studie werden in Kapitel 4 gezeigt und in Kapitel 5 diskutiert. Diese Ergebnisse dienen als Beitrag für die Gestaltung von Trajektorien für hochautomatisierte Fahrfunktionen, die hohe Werte von Akzeptanz und Vertrauen der Insassen hervorrufen sollen.

## 2. Objektive Rekonstruktion der Trajektorie

Die Untersuchung der zeitlich und örtlich aufgelösten Bewegung eines Fahrzeuges dient als objektives Maß um das Verhalten von menschlichen Fahrerinnen und Fahrern in verschiedenen Fahrsituationen verstehen zu lernen. Dabei sind die Position und die Geschwindigkeit (ev. auch Beschleunigungen) des Fahrzeuges sowie relativ zu relevanten Umgebungsobjekten von Interesse. Diese Daten können einerseits von externen Systemen erhoben werden, die fix mit der Infrastruktur verbaut sind und einen örtlich begrenzten Streckenabschnitt beobachten. Andererseits können diese Daten mit Hilfe von an Fahrzeugen montierten Sensoren erfasst werden, womit die örtliche Begrenzung entfällt. In diesem Fall ist man mit erhöhten Anforderungen der Datenverarbeitung aufgrund von Messrauschen und Messunsicherheiten der einzelnen Messsysteme konfrontiert. (13)

Für den hier dargestellten Forschungsansatz wurde ein fahrzeugfestes System verwendet. Ein fahrzeugfestes System wurde in (14) verwendet um das Folgeverhalten von zufällig nachfahrenden Fahrzeugen zu untersuchen. Das dort vorgestellte Versuchsfahrzeug verfügt über ein GNSS-basiertes Navigationssystem und CAN-Daten sowie zwei LIDAR-Sensoren und Kamerasysteme, um bis zu acht relevante Umgebungsobjekte vor und hinter dem Versuchsfahrzeug beobachten zu können. In (15) wird die automatisierte Erkennung von Fahr-

streifenwechseln in einem Testfahrzeug, welches mit vier Laserscannern, einer Mono-Kamera und einem Mittelbereichs-Radar ausgerüstet ist. Hauptziel dieser Sensorik ist die Erkennung von relevanten Objekten sowie Fahrbahnbegrenzungen zur zeitlichen und örtlichen Rekonstruktion von gefahrenen Trajektorien, (16).

Im hier vorgestellten Forschungsansatz wurde das Hauptziel verfolgt, die folgenden Daten während der Fahrt zu erheben

- Position des Versuchsfahrzeugs (Ego-Fahrzeuges) relativ zu Fahrbahnbegrenzungen, insbesondere der Querabstand
- Absolute Position des Ego-Fahrzeuges auf einem vordefinierten Streckenabschnitt (um Trajektorien von verschiedenen Versuchspersonen vergleichen zu können)
- Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeuges
- Relative Position zu vorausfahrenden und entgegenkommenden Verkehrsteilnehmern, im Fall von Gegenverkehr insbesondere der Querabstand
- Relative Geschwindigkeit zu vorausfahrenden und entgegenkommenden Verkehrsteilnehmern

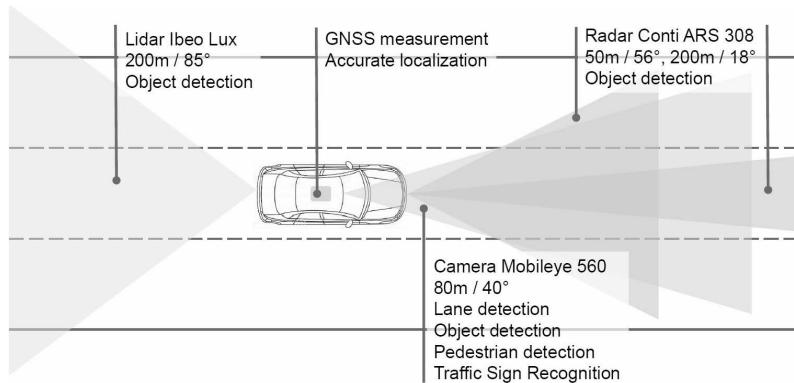


Bild 1: Übersicht über die Messtechnik, die für die Entwicklung der Methodik zur Trajektorien-Rekonstruktion im Versuchsfahrzeug verbaut wurde

Das Nebenziel der Untersuchung war es, mit den Daten von möglichst wenig unterschiedlichen Sensorsystemen auszukommen. Für die Methodenentwicklung und Plausibilisierung der Ergebnisse wurde daher im ersten Ansatz ein Versuchsfahrzeug mit zwei unterschiedlichen GNSS-basierten Navigationssystemen, einem kombinierten Mittel- und Fernbereichs-Radar, einem LIDAR-Scanner und dem Kamerasystem *Mobileye* ausgestattet, (17), welches

bereits über interne Objektklassifikation und Kollisionswarnung verfügt. Die Anordnung der Sensorik sowie relevante Reichweiten und Öffnungswinkel sind in Bild 1 dargestellt. Die im zweiten Ansatz daraus abgeleiteten Methoden zur Trajektorien-Rekonstruktion sowie für die Erhebung der in diesem Artikel dargestellten objektiven Kennwerte benötigten ausschließlich Daten des *Mobileye*-Systems sowie eines GNSS-basierten Positionsbestimmungssystems mit RTK-DGPS-Korrektur, (18). Um die gefahrenen Trajektorien von unterschiedlichen Probanden über dieselbe Fahrstrecke vergleichen zu können, wurde in einem ersten Schritt in einer Referenzmessung eine Referenzfahrbahn rekonstruiert.

## 2.1 Bestimmung der Referenzfahrbahn

Für die Bestimmung der Fahrstreifenbegrenzungen der ausgewählten Fahrstrecke wurden Daten des *Mobileye*-Systems verwendet. Für die Darstellung in globalen Koordinaten wurden Daten des GNSS-basierten Positionierungssystems verwendet und eine Referenzmessung mit dem Fahrzeug durchgeführt.

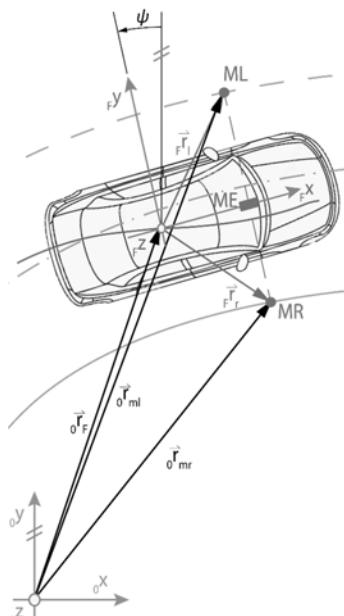


Bild 2: Schematische Darstellung der Vorgangsweise zur Bestimmung der Referenzfahrbahn

Bild 2 zeigt schematisch die Ermittlung der Referenz-Fahrstreifen. Für die Referenz-Fahrstreifen wurden die linke und die rechte Fahrbahnmarkierung (Punkte ML und MR in Bild 2) relativ zum gewählten globalen Koordinaten-ursprung ( ${}_0x, {}_0y, {}_0z$ ) für die gesamte Fahrstrecke ermittelt.

Dazu wird der Ortsvektor  ${}_0\vec{r}_F$  aus der gemessenen GNSS-Position ermittelt, der die Position des Fahrzeugmittelpunktes ( ${}_fx, {}fy, {} fz$ ) beschreibt. Der Abstand zwischen Fahrzeugmittelpunkt und *Mobileye*-System (Punkt ME) ist bekannt. Der Orientierungswinkel  $\psi$  des Fahrzeugs im globalen Koordinatensystem ( ${}_0x, {}_0y, {}_0z$ ) kommt vom GNSS-System. Die gesuchten Vektoren  ${}_0\vec{r}_{ml}$  und  ${}_0\vec{r}_{mr}$ , welche die Position der Leitlinie ML und der Begrenzungslinie MR beschreiben, können nun berechnet werden.

Die Qualität der Referenzmessung hängt von der Qualität der Daten der beiden Messsysteme ab, darum wurden bei dieser Messung möglichst ideale

Bedingungen hergestellt. Für das Mobileye-System wurde insbesondere das Kreuzen der mittleren Fahrstreifenmarkierung, wie sie bei Überholvorgängen oder dem Schneiden von Kurven entstehen können, vermieden. Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass die Sicht nicht durch große, vorausfahrende Fahrzeuge verdeckt wird, gute Witterungsbedingungen (hohe Sichtweiten) herrschen und enge Kurven mit geringer Fahrgeschwindigkeit durchfahren werden. Einige Abschnitte der Fahrstrecke lagen in dichten Waldstücken, die den Sichtkontakt zu Satelliten verdeckten. In diesen Bereichen, die auch anhand eines internen Stauskanals des GNSS deutlich wurden, wurden keine Probandenversuche durchgeführt.

## 2.2 Rekonstruktion der Trajektorie von verschiedenen Probanden

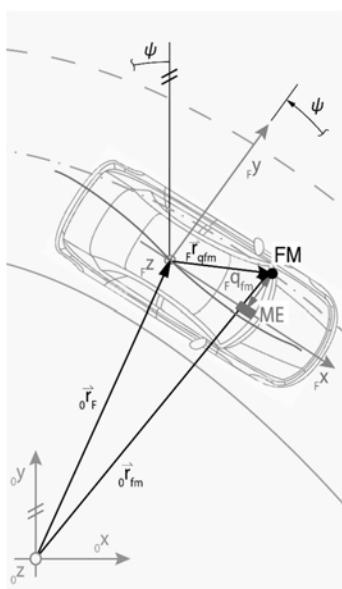


Bild 3: Schematische Darstellung der Vorgangsweise zur Rekonstruktion der gefahrenen Trajektorien

Wenn linke und rechte Fahrstreifenmarkierung erkannt werden, liefert das Mobileye-System bereits den zeitlichen Verlauf des Abstands der Fahrzeugmitte zur linken  $Fy_l$  und rechten  $Fy_r$  Fahrstreifenmarkierung. Für eine einzelne Fahrt ist damit die Querabweichung  $Fq_{fm}$  des Fahrzeugs zur Mitte des eigenen Fahrstreifens (Bild 3, strich-punktierte Linie bzw. Punkt FM) im fahrzeugfesten Koordinatensystem bestimmbare. Anhand der vom Mobileye-System ermittelten Abstände kann bereits eine Aussage über die menschliche Trajektorienwahl gemacht werden. Um Fahrtrajektorien von unterschiedlichen Probanden in einem globalen Koordinatensystem zu vergleichen, werden die fahrzeugfesten Trajektorien wie in Bild 3 dargestellt in das über die Referenzmessung bestimmte, globale Koordinatensystem transformiert. In Anlehnung an die Methodik in (19) wird damit aus jeder Messfahrt eine Trajektorie bezogen auf die gefahrene Trajektorie rekonstruiert.

## 2.3 Übersicht der objektiven Kennwerte und Abschätzung der Genauigkeit

Neben dem Vergleich von gefahrenen Trajektorien unterschiedlicher Testpersonen über bestimmte Streckenabschnitte wurden zusätzlich automatisiert objektive Kennwerte für selektierte Abschnitte erhoben. Die folgenden objektiven Kennwerte wurden je bei Einfahrt und Ausfahrt in ausgewählte Streckenabschnitte identifiziert und bei Kurven auch im Scheitelpunkt, sowie die Minimal-, Maximal- und Mittelwerte im gesamten Streckenabschnitt:

- Längsgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeuges
- Querabstand der linken und der rechten Außenkante des Ego-Fahrzeuges (ohne Spiegel) zur linken/rechten Fahrbahnmarkierung

Im Fall von Gegenverkehr wurden Längs- und Querabstand der linken Spiegelaußenkante zum Gegenverkehr ermittelt, letzteres zum Zeitpunkt bevor der Gegenverkehr den Sensorbereich verlässt.

Zur Genauigkeit des Querabstands des Ego-Fahrzeuges zu einer vorhanden linken und rechten Fahrstreifenmarkierung aus dem *Mobileye*-System konnte keine Herstellerangabe gefunden werden. Bei den Messwerten für den Abstand zum entgegenkommenden Verkehr konnte nicht deutlich reproduziert werden, ob sich dieser auf die Mitte des entgegenkommenden Objekts, einen beliebigen Punkt der sichtbaren Oberfläche bezieht oder auch zwischen verschiedenen Punkten springt. Laut Hersteller korreliert die Genauigkeit des Querabstands zum Gegenverkehr mit dem Messwert für den Längsabstand, welcher mit einer Wahrscheinlichkeit von 85 % unter 10 % oder unter 2 Meter (der größere Wert ist entscheidend) liegt, (20). Für die in weiterer Folge dargestellten Messergebnisse wurde anhand des zeitlichen Verlaufs des Querabstands zum Gegenverkehr die Plausibilität geprüft, eine verlässliche Angabe zur Messunsicherheit kann aber nicht gemacht werden.

## 3. Naturalistic Driving Study

Für die Studie wurde eine Fahrstrecke mit guten Fahrbahnmarkierungen, Kurven unterschiedlicher Radien, dazwischen lange Geraden sowie unterschiedlichen erlaubten Höchstgeschwindigkeiten gesucht. Diese Anforderungen erfüllt die Bundesstraße B73 zwischen den Orten Hausmannstätten und Leibnitz (Steiermark, Österreich), eine Überlandstraße, die durch Ortsgebiete unterbrochen wird. Testpersonen befuhren die Strecke von Hausmannstätten aus bis zu einem definierten Endpunkt, und fuhren dieselbe Strecke wieder zurück. Insgesamt ergab sich eine Fahrstrecke von 72,4 km als Fahrerin oder Fahrer für die Testpersonen.

Für die Studie wurden 12 weibliche und 12 männliche Testpersonen zwischen 29 und 40 Jahren (Mittelwert 33,8 Jahre) ausgewählt, die eine jährliche Fahrerfahrung von mindestens 10.000 km pro Jahr aufwiesen. Die Testpersonen haben über eine Fahraktivität im letzten Jahr zwischen 10.000 und 40.000 km berichtet (Mittelwert 21.229 km). Die Teilnahme am Experiment war freiwillig und konnte jederzeit ohne Angabe von Gründen abgebrochen werden. Die Daten wurden anonymisiert ausgewertet. Die Testpersonen haben eine Einverständniserklärung für die Teilnahme am Experiment unterschrieben und erhielten eine Aufwandsentschädigung nach der Fahrt.

Zu Beginn der Studie begannen die Testpersonen mit einer Eingewöhnungsphase um das Versuchsfahrzeug *Mercedes C 63 S AMG* kennenzulernen. Im Anschluss wurde der Ablauf der subjektiven Bewertung an einem ausgewählten Kurvenstück geübt. Jede Testperson durchfuhr die Fahrstrecke einmal als Fahrerin oder Fahrer, und war einmal als Beifahrerin oder Beifahrer anwesend. Bei jeder Fahrt waren zwei Testleiter auf der Rückbank des Versuchsfahrzeugs und gaben Anweisungen, wann Streckenabschnitte für die Beobachtung begannen, endeten und mit der stillen Bewertung durch die Beifahrerin oder den Beifahrer begonnen werden konnte. Insgesamt hat jede Beifahrerin und jeder Beifahrer sechs S-Kurvenabschnitte, sechs Geraden sowie je drei Links- und Rechtskurven bewertet. Diese Streckenabschnitte wurden vorab so gewählt, dass die Fahrt des Fahrzeuges für die Bewertung nicht unterbrochen werden musste und guter GNSS-Empfang für die Ermittlung der globalen Referenzstrecke gegeben war. Innerhalb der Streckenabschnitte wurde Überholen untersagt.

Im Fragebogen bewerteten die Beifahrerinnen und Beifahrer subjektiv die Trajektorie innerhalb jedes Streckenabschnittes anhand folgender Kriterien durch die vorgegebenen Antwortkategorien „zu klein“ „zu groß“ und „passend“:

- Seitlicher Minimalabstand zum Gegenverkehr (wenn vorhanden)
- Minimalabstand zum linken Fahrstreifenrand
- Minimalabstand zum rechten Fahrstreifenrand
- Geschwindigkeit

Des Weiteren wurden die Teilnehmer aufgefordert das Vertrauen in die Fahrerin oder den Fahrer bei jedem Streckenabschnitt auf einer Skala von eins (sehr niedrig) bis sechs (sehr hoch) zu bewerten. Zusätzlich wurde die Frage gestellt, ob man in der Fahrsituation die Fahrlinie so gewählt hätte wie die Fahrerin oder der Fahrer. Wurde die Frage mit „nein“ beantwortet, wurden die Testpersonen dazu aufgefordert, eine Begründung zu geben. Beson-

dere Vorkommnisse konnten ebenso ergänzt werden, wie z.B. verschmutzte Fahrbahn, beeinträchtigende Sichtverhältnisse oder langsam vorausfahrende Fahrzeuge auf der Fahrbahn.

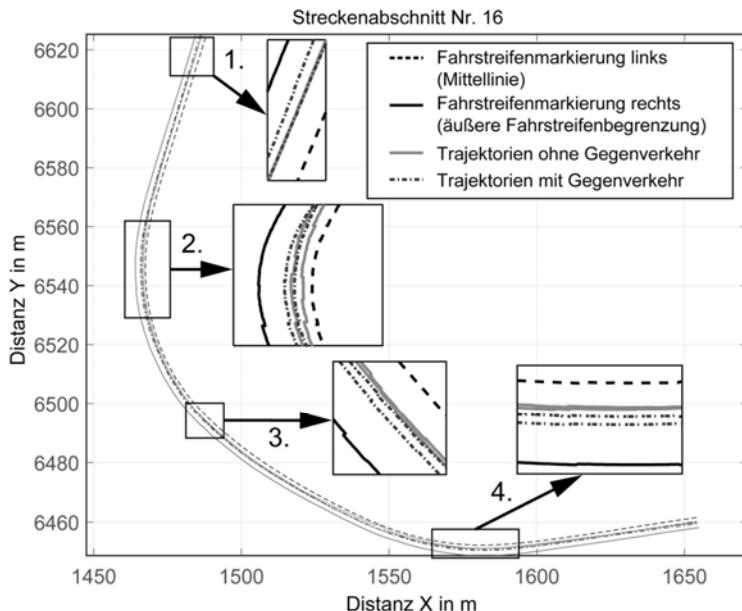


Bild 4: Darstellung von vier ausgewählten Trajektorien für eine Linkskurve aus den Versuchen mit Testpersonen, davon je zwei ohne Gegenverkehr und zwei mit Gegenverkehr

#### 4. Ergebnisse

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse präsentiert, um das Potential der dargestellten Rekonstruktionsmethodik für die Bewertung menschlicher Trajektorienwahl zu zeigen. Aufgrund der eingeschränkten Teilnehmerzahl können im Rahmen der hier dargestellten Studie Tendenzen abgeleitet werden. In Kapitel 5 werden Empfehlungen gegeben, wie eine Probandenstudie erweitert und verbessert werden kann, um zukünftig statistische Signifikanz testen zu können.

Bild 4 zeigt vier ausgewählte Trajektorien, je zwei mit und zwei ohne entgegenkommenden Verkehr im ausgewählten Kurvenstück. Zur besseren Sichtbarkeit wurden vier Ausschnitte

vergrößert dargestellt. Es handelt sich dabei um eine Linkskurve, die zeitlich betrachtet vom Bildausschnitt links oben nach rechts unten durchfahren wird. Die durchgezogene Linie definiert den äußeren Fahrbahnrand, die Gegenspur befindet sich jenseits der Leitlinie (gestrichelte Linie). Bei der Einfahrt in Teilabschnitt 1 sind die Trajektorien der Testpersonen mit und ohne Gegenverkehr vergleichbar. In Teilabschnitt 2 und 3 ist deutlich sichtbar, dass bei Gegenverkehr deutlich größerer Abstand zur Gegenverkehrsspur gehalten wird wie im Fall ohne Gegenverkehr. Dieses Muster zieht sich bis Teilstück 4 durch.

#### 4.1 Subjektive Bewertungen und objektive Kennwerte bei unterschiedlichen Straßenabschnitten

In diesem Abschnitt werden die objektiven Kennwerte deskriptiv dargestellt, die für unterschiedliche Straßenabschnitten als „passend“ bewertet wurden. Bild 5 zeigt die Mittelwerte und die 95% Konfidenzintervalle der Minimalabstände zum linken Fahrstreifenrand, die von den Beifahrerinnen und Beifahrern als „passend“ bewertet wurden.

Sofern vorhanden, befindet sich Gegenverkehr auf der linken Seite des Fahrzeugs. Ohne Gegenverkehr wird es als „passend“ bewertet, wenn eine Linkskurve so durchfahren wird, dass sich das Fahrzeug links der Mitte des eigenen Fahrstreifens befindet. Dies ist durch die negativen Abstandswerte beim Konfidenzintervall in der Linkskurve ohne Gegenverkehr in Bild 5 ersichtlich.

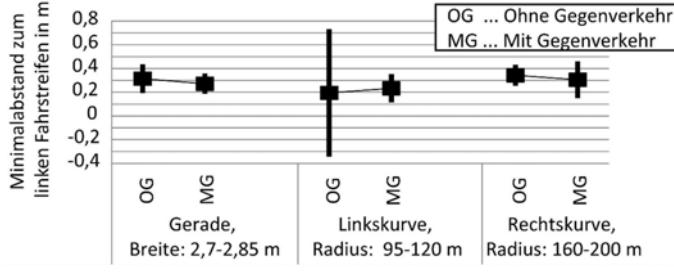


Bild 5: Von Testpersonen als „passend“ bewertete Minimalabstände zum linken Fahrstreifenrand. Für die ausgewählte Gerade liegt die Straßenbreite zwischen 2,7 und 2,85 m. Bei der ausgewählten Linkskurve variieren die Kurvenradien zwischen 95 und 120 m, und bei der ausgewählten Rechtskurve zwischen 160 und 200 m. Mittelwerte sind mit schwarzen Quadrat dargestellt und 95% Konfidenzintervalle als vertikale Balken.

Bild 6 zeigt die Minimalabstände zum rechten Fahrstreifenrand, die von den Beifahrerinnen und Beifahrern als „passend“ bewertet wurden. Bereiche der Abstände und Konfidenzinter-

valle verhalten sich ähnlich wie in Bild 5. Mit Gegenverkehr wird der Abstand zum rechten Fahrstreifen in der Linkskurve nun kleiner, sowie in der Rechtskurve größer.

Bild 7 zeigt die Minimalabstände zwischen Gegenverkehr und der äußeren Kante des Seitenspiegels des Versuchsfahrzeuges, die von den Beifahrerinnen und Beifahrern als „passend“ bewertet wurden, sofern dieser Fall eingetreten ist. Bei der ausgewählten Linkskurve zeigt das kleine Konfidenzintervall, dass von den Probanden ein ähnlicher Abstand als „passend“ bewertet wird. Bei der ausgewählten Rechtskurve ist das Konfidenzintervall deutlich größer.

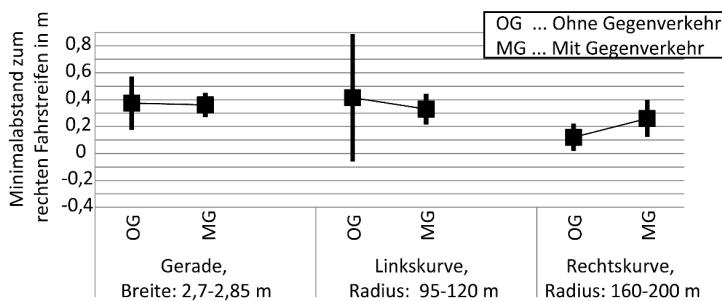


Bild 6: Von Testpersonen als „passend“ bewertete Minimalabstände zum rechten Fahrstreifenrand. Für die ausgewählte Gerade liegt die Straßenbreite zwischen 2,7 und 2,85 m. Bei der ausgewählten Linkskurve variieren die Kurvenradien zwischen 95 und 120 m, und bei der ausgewählten Rechtskurve zwischen 160 und 200 m. Mittelwerte sind mit schwarzen Quadrat dargestellt und 95% Konfidenzintervalle als vertikale Balken.

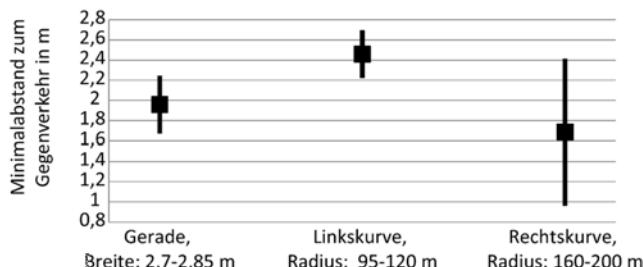


Bild 7: Von Testpersonen als „passend“ bewertete Minimalabstände zum Gegenverkehr für drei Streckenabschnitte. Für die ausgewählte Gerade liegt die Straßenbreite zwischen 2,7 und 2,85 m. Bei der ausgewählten Linkskurve variieren die Kurvenradien zwischen 95 und 120 m, und bei der ausgewählten Rechtskurve zwischen 160 und 200 m. Mittelwerte sind mit schwarzen Quadrat dargestellt und 95% Konfidenzintervalle als vertikale Balken.

Bild 8 zeigt die mittleren Maximalgeschwindigkeiten, die von den Beifahrerinnen und Beifahrern als „passend“ bewertet wurden, sowie die jeweiligen Konfidenzintervalle.

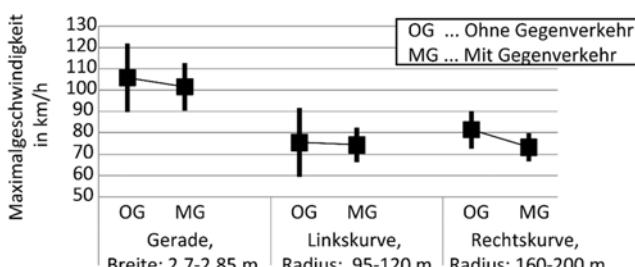


Bild 8: Von Testpersonen als „passend“ bewertete Maximalgeschwindigkeiten. Für die ausgewählte Gerade liegt die Straßenbreite zwischen 2,7 und 2,85 m. Bei der ausgewählten Linkskurve variieren die Kurvenradien zwischen 95 und 120 m, und bei der ausgewählten Rechtskurve zwischen 160 und 200 m. Mittelwerte sind mit schwarzen Quadrat dargestellt und 95% Konfidenzintervalle als vertikale Balken.

#### 4.2. Wahl der Trajektorie bei unterschiedlichen Straßenbreiten

Wie im Bild 9 dargestellt, sind die mittleren Abstände zu beiden Fahrstreifen größer, wenn die Straßenbreite größer ist. Das lässt darauf schließen, dass sich die Fahrerin oder der Fahrer tendenziell in der Mitte des Fahrstreibens einordnet. Diese Tendenz lässt sich sowohl für Situationen mit und ohne Gegenverkehr erkennen.

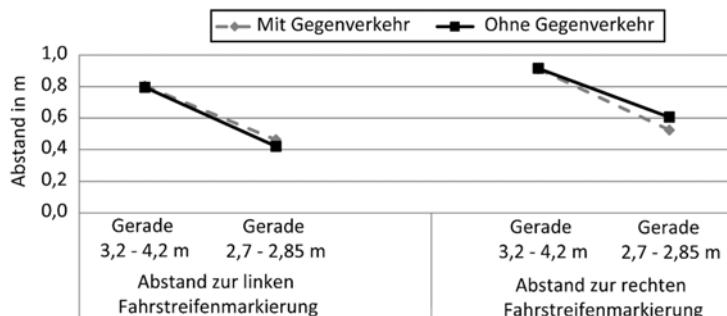


Bild 9: Von Testpersonen als „passend“ bewertete mittlere Abstände zum linken und rechten Fahrstreifenrand für Geraden unterschiedlicher Breite. Fahrsituationen mit Gegenverkehr sind mit gestrichelten Linien dargestellt, die ohne Gegenverkehr mit durchgezogenen Linien.

#### 4.3. Subjektive Bewertung des Vertrauens

Die subjektive Bewertung des Vertrauens von Beifahrerinnen und Beifahrern in Fahrerin und Fahrer in Abhängigkeit von unterschiedlichen Bewertungskategorien wurde für eine Linkskurve (Radius 150 bis 210 m) analysiert. Bild 10 zeigt, dass das Vertrauen sehr groß ist (Medianwert 6), wenn die Testperson am Beifahrerplatz eine ähnliche Trajektorie wie die Fahrerin oder der Fahrer wählen würde und wenn die Abstände und die Geschwindigkeit als „passend“ bewertet wurden. Das Vertrauen ist niedriger (Medianwerte zwischen 4 und 5), wenn die Testperson keine ähnliche Trajektorie wie die Fahrerin oder der Fahrer wählen würde, wenn die Abstände zum Gegenverkehr und zum linken Fahrstreifenrand als „zu klein“, und die Geschwindigkeit als „zu schnell“ bewertet wurden.

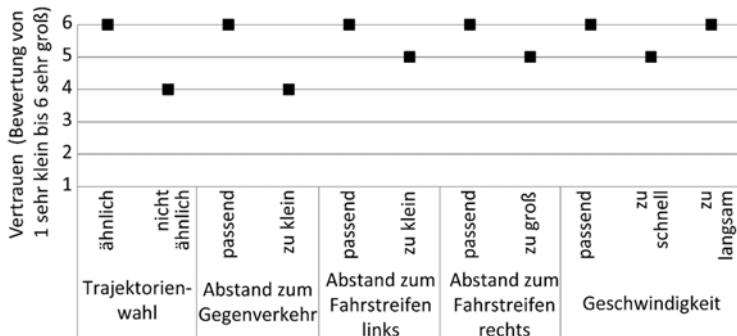


Bild 10: Medianwerte des Vertrauens in Fahrerin oder Fahrer bei unterschiedlichen Kategorien von Ähnlichkeit der Trajektorie, Abstände und Geschwindigkeit.

## 5. Diskussion

Die in Rahmen der Studie erarbeitete Methodik zur Rekonstruktion der gefahrenen Trajektorien hat sich als geeignet herausgestellt. Aus der mit Probandinnen und Probanden dargestellten Studie können Tendenzen abgeleitet werden, zum Beispiel bezüglich der für Insassen als „passend“ empfundenen Trajektorienwahl innerhalb des eigenen Fahrstreifens sowie einer als „passend“ empfundenen Geschwindigkeit. Die Ergebnisse sind deskriptiv beschrieben, da die Datensätze oft weniger als 10 Werte beinhalten. So trat bei den 24 Testpersonen über drei Linkskurven insgesamt nur 10 Mal der Fall ein, dass in einer Linkskurve kein Gegenverkehr vorhanden war. Damit kann keine ausreichende Anzahl an Antworten für Bewertungskategorien wie Abstand „passend“, „zu klein“ oder „zu groß“ erreicht werden. Für weitere Untersuchungen wird empfohlen, die Anzahl der Probanden zu erhöhen sowie zusätzliche Faktoren systematisch zu berücksichtigen, wie z.B. die Fahrbahnbreite und den Kurvenradius. Der Breite der individuellen Abstands- und Geschwindigkeitspräferenzen kann man durch die Verwendung von mehreren Optionen oder Modi, aus denen die Insassen wählen können, Rechnung tragen. Einige Ergebnisse, v.a. im Zusammenhang mit der Bewertung des Einflusses des Gegenverkehrs, sind kontraintuitiv. Dies lässt den Schluss nahe, wenn andere Faktoren außer dem Gegenverkehr eine Rolle gespielt haben, die in künftigen Studien berücksichtigt werden müssen. Die Studie zeigt das Potential der entwickelten Methodik, und wie eine Probandenstudie in zukünftigen Untersuchungen verbessert und erweitert werden kann, um über das Ableiten von Tendenzen hinaus statistisch signifikante Ergebnisse zu erhalten.

## 6. Zusammenfassung

Höher automatisierte Fahrfunktionen ersetzen schrittweise menschliche Fahrerinnen und Fahrer, sämtliche Personen im Fahrzeug werden so zu Insassen. Um zu gewährleisten, dass diese Funktionen auch genutzt werden, müssen hohe Niveaus von Vertrauen und Akzeptanz in automatisierte Fahrfunktionen erreicht werden. In diesem Beitrag wurde dazu eine Methodik vorgestellt, mit der gefahrene Trajektorien von verschiedenen Testpersonen ausschließlich mit Hilfe eines kamerabasierten Systems (*Mobileye*) sowie einem GNSS-basierten Navigationssystem rekonstruiert und verglichen werden können. In einer Studie mit 12 Autofahrerinnen und 12 Autofahrern wurde ein Vergleich von subjektiven und objektiven Daten durchgeführt. Wie die Ergebnisse zeigen, ist das Vertrauen sehr groß, wenn die Testperson eine ähnliche Trajektorie wie die Fahrerin oder der Fahrer wählen würde, und wenn die Abstände und die Geschwindigkeit als „passend“ bewertet wurden. Die hier vorgestellte Methodik ermöglicht es, Fahrtrajektorien objektiv zu erfassen und mit subjektiven Kriterien durch Testpersonen zu vergleichen, um die menschliche Trajektorienwahl sowie die Bewertung von Insassen verstehen zu können.

## Literaturverzeichnis

1. **World Health Organization (WHO).** *Global Status Report on Road Safety*. Geneva, Switzerland : WHO, 2015.
2. **European Commission (EC).** *Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a Competitive and Resource Efficient Transport System*. Brussels, Belgium : Office for Official Publications of the European Commission, 2011. White Paper COM.
3. **SAE International.** *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. s.l. : SAE International, 2016. Standard. J3016\_201609.
4. **Brookhuis, K.A., De Waard, D., & Janssen, W.H.** Behavioural impacts of advanced driver assistance systems – an overview. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 1(3). 2001, S. 245-253.
5. **Van Driel, C., Hoedemaeker, M., & Van Arem, B.** Impacts of a congestion assistant on driving behavior and acceptance using a driving simulator. *Journal of Transportation Research F*, 10,. 2007, S. 139-152.
6. **Xiong, H. & Boyle, L.N.** Drivers' Adaptation to Adaptive Cruise Control: Examination of Automatic and Manual Braking. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3). 2012, S. 1468-1473.
7. **Pivtoraiko, M. N.** *Differentially Constrained Motion Planning with State Lattice Motion Primitives*. Pittsburgh, PA, USA : Carnegie Mellon University, 2012. Dissertation Thesis.
8. **Hudecek J., Klas C.** *A universal trajectory generator for automated vehicles*. San Jose, CA, USA : GPU Technology Conference, 6. 4 2016.

9. **Gu T., Snider J., Dolan J. M., Lee J.-W.** *Focused Trajectory Planning for Autonomous On-Road Driving.* [Hrsg.] IEEE. Gold Coast, QLD, Australia : s.n., 2013. Intelligent Vehicles Symposium (IV).
10. **Koglbauer, I., Eichberger, A., Lex, C., Bliem, N., Sternat, A., Holzinger, J., Schinko, Ch., & Battel, M.** Bewertung von Fahrerassistenzsystemen von nicht professionellen Fahrerinnen und Fahrern im Realversuch. [Buchverf.] C. Chaloupka-Risser. *in motion (5) Humanwissenschaftliche Beiträge zur Sicherheit und Ökologie des Verkehrs.* Salzburg, Austria : INFAR, 2015, S. 59-70.
11. **Koglbauer, I., Holzinger, J., Eichberger, A., Lex, C.** Drivers' Interaction with the Adaptive Cruise Control on Dry and Snowy Roads with Various Tire-Road Grip Potentials. *Journal of Advanced Transportation.* 2017, Article ID 5496837, S. 1-10.
12. **Verberne, F. M. F., Ham, J., & Midden, C. J. H.** Trusting a Virtual Driver That Looks, Acts, and Thinks Like You. *Human Factors,* 57(5). 2012, S. 895-909.
13. **Fard M. R., Mohaymany A. S., Shahri M..** A new methodology for vehicle trajectory reconstruction based on wavelet analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies.* 1 2017, 74, S. 150-167.
14. **Ma X., Andreasson I..** *Dynamic car following data collection and noise cancellation based on the Kalman smoothing.* [Hrsg.] IEEE. Shaan'xi, China : s.n., 2005. International Conference on Vehicular Electronics and Safety.
15. **Sonka A., Krauns F., Henze R., Küçükay F., Katz R., Lages U.** *Dual Approach for Maneuver Classification in Vehicle Environment Data.* [Hrsg.] IEEE. Redondo Beach, CA, USA : s.n., 2017. Intelligent Vehicles Symposium (IV).
16. **Sonka A., Liesner L., Pawellek T., Krauns F., Henze R., Küçükay F.** *Environment Perception and Event Detection for Object Prediction in Traffic.* [Hrsg.] B. Kulcsar, J. Sjöberg J. Fredrikson. Gothenburg, Sweden : s.n., 2015. 3rd International Symposium on Future Active Safety Technology Towards zero traffic accidents (FAST-zero).
17. **Mobileye Inc.** Mobileye 560, 560 EX. [Online] 9 2014. [Zitat vom: 17. 8 2017.] <https://riverparkinc.com/wp-content/uploads/2014/09/Mobileye-5-Series-Product-Sheet.pdf>.
18. **Dewetron Customer Care Center.** CAPS-ACC Technical Reference Guide. [Online] 2017. [Zitat vom: 18. 8 2017.] <https://ccc.dewetron.com/dl/52af1137-c874-4439-8ba0-7770d9c49862>.
19. **Wegscheider, M.** *Modellbasierte Komfortbewertung von Fahrerassistenzsystemen.* Graz, Austria : Technische Universität Graz, 2009. Dissertation thesis.
20. **Mobileye Inc.** *Mobileye Startup Guide.* s.l. : Autonomous Stuff, 2015. Version 1.3 (3/12/15).

# Entwicklung einer kooperativen Bremsstrategie als Reaktion auf Einscherer im dichten Verkehr auf der Autobahn

**Nina Kauffmann, Esther Raeth, Dr. Franz Winkler,  
Prof. Dr. Mark Vollrath**

## Kurzfassung

Die Zukunft der Automobilindustrie liegt im autonomen Fahren. Dieses verspricht vor allem Vorteile im Bereich Verkehrssicherheit, Reduktion von Emissionen und Komfort [1]–[3]. Eine große Herausforderung stellt die Kommunikation bzw. Interaktion zwischen automatisierten Fahrzeugen und manuellen Fahrern im Mischverkehr dar [4]. Ein automatisiertes Fahrzeug muss begreifen, wie Menschen im Straßenverkehr die Intention anderer Verkehrsteilnehmer wahrnehmen und verstehen, wie Sie miteinander kommunizieren, um Missverständnisse in der Kommunikation mit menschlichen Fahrern zu vermeiden. Bei der Modellierung des Folgeverhaltens eines automatisierten Fahrzeuges, stehen vor allem der Komfort und die Sicherheit an oberster Stelle. Um maximalen Komfort zu garantieren, sollten laut Studien [5], [6], die Verzögerungswerte so niedrig wie möglich gehalten werden. Hier stellt sich die Frage, was für ein Bremsverhalten einscherenden Fahrzeugen gegenüber ausreichend ist, um die Bereitschaft zu signalisieren, dass diese einfädeln dürfen. Bisherige Studien fokussieren sich auf die Erhebung des Komfortempfindens des Insassen und lassen dabei die Außenperspektive anderer Verkehrsteilnehmer unberücksichtigt, ab welchen Schwellenwerten Verzögerungen von außen wahrgenommen werden. Ziel dieser Arbeit ist es, basierend auf Probandenstudien im Fahrsimulator, einen Bremsalgorithmus als Reaktion auf Einscherer im dichten Verkehr im Niedriggeschwindigkeitsbereich vorzustellen, der proaktiv agiert und explizit die Außenwahrnehmung der umgebenden Fahrzeuge mitberücksichtigt. Dieser wurde mittels einer weiteren Probandenstudie evaluiert und gegen einen bereits bestehenden Algorithmus basierend auf Wiedemann [7] getestet. Es konnte gezeigt werden, dass der neu entwickelte Bremsalgorithmus gegenüber der Strategie nach Wiedemann [7] als kooperativer empfunden wurde.

## 1. Einleitung

Der steigende Automatisierungsgrad von Fahrzeugen führt zu einer stetigen Änderung des Verkehrsbildes. Neben manuell gesteuerten Fahrzeugen sind zunehmend Fahrzeuge mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden im Straßenverkehr vertreten. Eine große Herausforderung stellt die Kommunikation bzw. Interaktion zwischen automatisierten (SAE Level 5) und

menschlichen Fahrern im Straßenverkehr dar [8]. Ein automatisiertes Fahrzeug muss lernen, wie Menschen im Straßenverkehr die Intention anderer Verkehrsteilnehmer wahrnehmen und verstehen, wie Sie miteinander kommunizieren, um Missverständnisse in der Kommunikation mit menschlichen Fahrern zu vermeiden [4]. Dabei spielt die Bereitschaft zu kooperativem Verhalten eine große Rolle [9]. Mit kooperativem Fahren ist nach Benmimoun ein faires und professionelles [10] Fahrverhalten gemeint. Auf eine Fahrstreifenwechselsituations bezogen definiert Ellinghaus kooperatives Verhalten aus Folgefahrerperspektive, als den anderen Fahrer einfädeln lassen [11]. Die Frage, die sich hier stellt ist aber, welche Erwartungshaltung Menschen an ein autonomes Fahrzeug stellen, wenn Sie mit ihm im Mischverkehr interagieren. Nach Sivak & Schöttle [12] birgt gerade diese Übergangsphase ein hohes Verkehrssicherheitsrisiko. Der Anspruch an ein autonomes Fahrzeug ist, dass es mindestens so zuverlässig und sicher wie ein konventionelles Verkehrsmittel sein muss [13]. Im Folgenden soll eine automatisierte, kooperative Bremsstrategie, am Beispiel einer Reaktion des Folgefahrzeugs auf ein einscherendes Fahrzeug, vorgestellt und in einer Studie evaluiert werden. Diese basiert auf menschlichem Fahrverhalten und berücksichtigt explizit die Außenwahrnehmung. Die Bremsstrategie soll gegen eine bereits im Fahrsimulator integriertes Folgernmodell, basierend auf Wiedemann [15], verglichen werden. Die Forschungsfragen, die hier beantwortet werden sollen sind folgende:

- Haben Menschen, wenn Sie im Mischverkehr fahren dieselbe Erwartungshaltung an ein automatisiertes Fahrzeug wie an einen menschlichen Fahrer, was das Fahrverhalten angeht?
- Wird die Fahrstrategie, die explizit die Außenwirkung miteinbezieht, besser empfunden als die herkömmliche Strategie?

Zunächst soll auf die bestehende Literatur und die Entwicklung des Algorithmus eingegangen werden, der im zweiten Teil in Form einer Probandenstudie evaluiert wird.

## 2. Entwicklung des Algorithmus

### 2.1. Verwandte Literatur

#### 2.1.1. Kommunikation im Straßenverkehr

Kommunikation im Straßenverkehr besteht nicht nur aus formellen Regeln wie der Straßenverkehrsordnung, sondern auch aus informellen Regeln, die durch explizite und implizite Signale umgesetzt werden [16]. Explizite Signale können Gestik und Mimik, aber auch Blickverhalten und Handzeichen darstellen [17]. Was implizite Signale angeht unterscheidet Merten

[18] verschiedene Problemlösehandlungen, die bei der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern und auch bei unklaren Situationen zum Einsatz kommen können. Dazu zählt unter anderem das vorwegnehmende Handeln, was bedeutet, dass der Verkehrsteilnehmer erste Handlungsschritte initiiert, um den anderen seine Intention zu signalisieren, ohne die komplette Handlung auszuführen. Wenn beispielsweise einem anderen Fahrer signalisiert werden soll, dass er einschernen kann, würde sich das in einer leichten Bremsung bzw. Gaswegnahme ausdrücken. Kommunikation beinhaltet zusätzlich noch eine emotionale Komponente [19], d. h. das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer wird interpretiert und attribuiert. In diesem Kontext kommt vor allem der Akteur-Beobachter-Effekt [20] zum Tragen, der u.a. beinhaltet, dass eine Person das Verhalten anderer auf sich selbst bezieht. Dies kann positive als auch negative Emotionen auslösen und infolge dessen ein kooperatives bzw. rücksichtloses Fahrverhalten hervorrufen [10].

### **2.1.2. Bremsstrategien**

Wenn es um den Entwurf von automatisierten Bremsstrategien geht, steht vor allem das Komfortempfinden und das subjektive Sicherheitsgefühl des Fahrzeuginsassen im Mittelpunkt. Dabei wird das Komfort-/Sicherheitsempfinden aus der Perspektive des Fahrers untersucht, um Handlungsempfehlungen für den Entwurf des dynamischen Verhaltens des automatisierten Fahrzeuges zu geben [21]. Wie bereits Lange und Heißing forderten, geht ein maximaler Komfort des Gefahrenen mit möglichst niedrigen Beschleunigungs-/Verzögerungswerten einher [5], [6]. Auch Le Vine zeigte auf, dass Menschen wenn Sie gefahren werden schon bei niedrigeren Beschleunigungen Diskomfort empfinden. [22]. Aktuelle Bremsstrategien beziehen zwar objektive Fahrparameter wie Time to Collision, Differenzgeschwindigkeiten, Blinkersignale usw. [23], [24] mit ein, um auf ein einscherendes Fahrzeug passiv zu reagieren. Die Außenwirkung der eigenen Reaktion bleibt jedoch unberücksichtigt, da nicht untersucht wurde ab welchen Schwellenwerten Verzögerungen von außen wahrgenommen werden [25]. Derartige Untersuchungen sind jedoch erforderlich, um Parameter für die Modellierung des Komfortgefühls zu ermitteln.

### **2.2. Prestudien**

Eine essentielle Grundlage zur Entwicklung eines Verzögerungsmodells basierend auf menschlichem Fahrverhalten, ist es ein Verständnis dafür zu generieren, wie sich der menschliche Fahrer im dichten Verkehr auf der Autobahn im Niedriggeschwindigkeitsbereich in der Interaktion mit den anderen Verkehrsteilnehmern verhält und wie dieser das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer wahrnimmt. Basierend auf zwei Studien im statischen Fahrsimulator

wurde das Fahrverhalten von menschlichen Fahrern (P), sowohl aus der Perspektive des einscherenden Fahrzeugs (E) als auch aus der Sicht des zukünftigen Folgefahrzeugs (F) analysiert, um Rückschlüsse auf kooperatives Verhalten in Spurwechselsituationen zu ziehen [26] (siehe Abbildung 1).

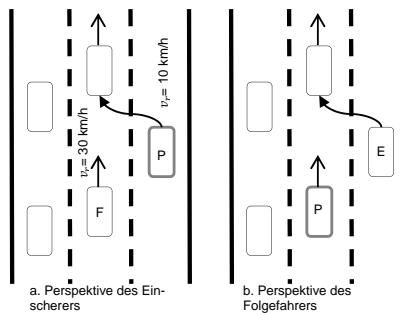


Bild 1: Darstellung der Einscherer und Folgefahrerperspektive.

In der ersten Studie (siehe Abbildung 1a) bewerteten Probanden aus der Außenperspektive bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 2.7m/s das Verzögerungsverhalten eines simulierten Fahrzeugs auf der schnelleren Fahrspur (8.3m/s). Die Bewertung des Verhaltens des anderen Fahrers erfolgte im Fahrsimulator anhand der Dimensionen Kooperationsbereitschaft (15-stufige Skala) und Kritikalität (10-stufige Skala nach Neukum [27]). Das simulierte Fahrzeug reagierte dabei mit einer Kombination aus unterschiedlichen Parametern (Reaktionszeit, Verzögerung, Umfang der Geschwindigkeitsreduktion). Die höchsten Werte bzgl. wahrgenommener Kooperation erhielt die Kombination Reaktionszeit 0 s, Verzögerung 1.5 m/s<sup>2</sup> und ein Umfang der Geschwindigkeitsreduktion von 4 m/s. Diese Kombination aus Parametern soll in den Algorithmus als Bremsreaktion einfließen. Genaue Details können bei Kauffmann [26] entnommen werden. In Studie 2 (siehe Abbildung 1b) wurden die Probanden instruiert auf einen simulierten Einscherer durch Bremsen zu reagieren und dessen Fahrstreifenwechselankündigung zu bewerten. Aus der zweiten Studie wurde der für einen Bremsalgorithmus relevante, objektive Kennwert, die Time Headway (THW), zu verschiedenen Messzeitpunkten extrahiert. Im Folgenden soll näher darauf eingegangen werden.

### 2.3. Algorithmus

Der entwickelte dreistufige Bremsalgorithmus soll nun überblicksartig dargestellt werden (siehe Abbildung 2). Während der ersten Phase (State 1) werden Spurwechselintentionen anderer Fahrzeuge erkannt, in der zweiten Phase (State 2) wird die Entscheidung über Kooperation mit dem anderen Fahrzeug getroffen. In der dritten Phase (State 3) wird ggf. die kooperative Fahrreaktion ausgeführt. Im Folgenden werden die drei Phasen näher erläutert.

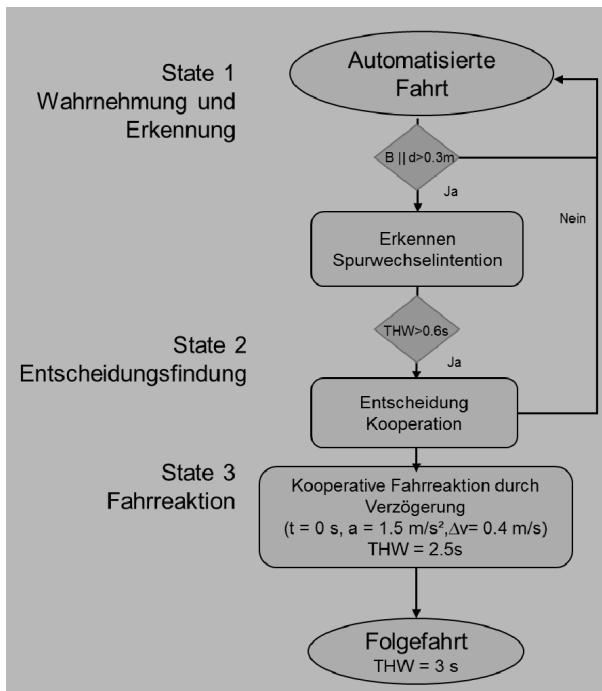


Bild 2: Schematische Darstellung des entwickelten Bremsalgorithmus.

#### State 1: Wahrnehmung und Erkennung

Im ersten Zustand werden umliegende Verkehrsteilnehmer beobachtet. Dabei evaluiert das Fahrzeug kontinuierlich die Relevanz der anderen Verkehrsteilnehmer auf der Nebenspur. Nach Olsen [23] werden Spurwechselvorgänge im dichten Verkehr im Niedriggeschwindigkeitsbereich zu 64% durch Blinken (B) angekündigt. Deshalb wird das Setzen des Blinkers als ein Indikator für eine Spurwechselintention genutzt. Als weiteres Merkmal wurde der laterale

Querversatz d als Wahrnehmungskriterium zum Erkennen des Spurwechselwunsches des Nebenfahrzeuges genutzt [28], [29]. Dabei startet die Erkennung der Intention bei einem Abstandswert von  $d > 0.3\text{m}$  relativ zur Fahrbahnmarkierung , der bei der Analyse von European Field Operational Test (EuroFOT) ermittelt werden konnte [30].

### **State 2: Entscheidung**

Nachdem eine Spurwechselintention erkannt wurde, wird ein Entscheidungsprozess unter Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten durchlaufen. Dazu wird im Moment der Fahrerintentionswahrnehmung der absolute Abstand zum einscherenden Fahrzeug ermittelt und daraus der THW zwischen beiden Fahrzeugen berechnet. Nach der Einteilung von Zeitabstandswerten nach Ohta [21] gilt der Bereich bis 0.6s als Gefahrenzone. Innerhalb dieses Zeitabstandssektors erfährt der Fahrer normalerweise ein Gefühl der Angst vor einer Kollision mit dem Vorderfahrzeug. Wird dieser Schwellwert zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem Fahrzeug auf der Nebenspur unterschritten, erfolgt keine Fahrreaktion in Form von Verzögerung. Würde unterhalb dieses Wertes für den Einscherer verzögert werden, kann davon ausgegangen werden, dass die Verzögerung entweder so groß ausfallen müsste und dies vom Egofahrer als unangenehm in Bezug auf den Komfort eingestuft werden würde oder der gesetzlich vorgegebene Sicherheitsabstand nicht mehr eingehalten werden könnte.

### **State 3: Fahrreaktion**

Ist ein ausreichender Sicherheitsabstand ( $\text{THW} > 0.6 \text{ s}$ ) vorhanden, wird der letzte State erreicht. Dieser beschreibt das eigentliche kooperative Fahrverhalten als Reaktion auf den Fahrstreifenwechselwunsch des Einscherers. Die Fahrreaktion lässt sich wiederum in 4 Phasen unterteilen (siehe Abbildung 2).

1. Latenzzeit: Für den Parameter wird ein Zeitwert von 0s verwendet (siehe Kauffmann, 2017 [26]. Folglich beginnt das Egofahrzeug direkt nach der Wahrnehmung des Spurwechselwunsches mit einer Fahrreaktion.
2. Verzögerung: Anschließend erfolgt die Fahrreaktion auf den Einscherer in Form einer Verzögerung. Diese Phase wird maßgebend von den zwei Fahrparametern Umfang der Geschwindigkeitsreduktion und dem eigentlichen Maß der Verzögerung bestimmt. Wenn die Geschwindigkeitsreduktion erreicht ist wechselt der Algorithmus in den nächsten Schritt. Für den Algorithmus wurde als Wert der Verzögerung  $1.5 \text{ m/s}^2$  und als Umfang der Geschwindigkeitsreduktion  $4 \text{ m/s}$  verwendet [26].
3. Folgefahrt: Nachdem das Egofahrzeug durch Verzögerung auf den Spurwechselwunsch des Einscherers eingegangen ist und dieser das Fahrverhalten wahrgenom-

men hat, beginnt das einscherende Fahrzeug zumeist mit dem Start des Spurwechselvorgangs. Innerhalb des Algorithmus wird der Beginn eines Spurwechselmanövers durch das Berühren der Spurmarkierung durch das einscherende Fahrzeug definiert. Ab diesem Zeitpunkt befindet sich das einscherende Fahrzeug auf der Spur des Egofahrzeugs und ist somit direkt als Vorderfahrzeug relevant. In diesem Bereich regelt das Egofahrzeug sein Fahrverhalten direkt in Abhängigkeit des Einscherers in Form einer Folgefahrt. Dazu wird, durch die Übergabe des Maximums aus einem Zeitabstandswertes und einem minimalen Abstand eine Wunschbeschleunigung berechnet und dem Egofahrzeug zur Umsetzung übergeben. Auf Grundlage der Analyse aus der zweiten Studie [31] ermittelten Fahrdaten wurde ein Zeitabstandswert eines Fahrers während des Spurwechselvorgang von durchschnittliche 2.5s ermittelt. Um im Algorithmus das menschliche Fahrverhalten bei der Reaktion auf Einscherer widerzuspiegeln wurde dieser Zeitabstandswert während des Spurwechselvorgangs eingeregelt.

4. Folgefahrt nach Spurwechsel: Sobald der Einscherer die Zielspur mit dem Fahrzeugschwerpunkt erreicht hat und somit der Spurwechselvorgang beendet wurde, beginnt die letzte Phase der kooperativen Fahrreaktion. Die reguläre Folgefahrt wird entsprechend dem Ergebnis aus der zweiten Studie mit einem Zeitabstand von 3.0 s eingeregt.

### 3. Evaluation des Algorithmus

In einer dritten Studie soll die im Teil A beschriebene Strategie evaluiert werden. Die Studie vergleicht die entwickelte Fahrstrategie mit dem ursprünglichen Modell basierend auf dem Folgemodell von Wiedemann [15] hinsichtlich wahrgenommener Kooperationsbereitschaft und Kritikalität.

#### 3.1. Methode

##### 3.1.1. Simulator

Die Projektion des Sichtsystems erfolgt über drei DLP-Projektoren. Über die drei Kanäle wird ein frontales und seitliches Sichtfeld entsprechend einem Bildausschnitt von 90° dargeboten. Die Auflösung beträgt jeweils 1400 x 1050 Bildpunkte. Als Außen- und Innenspiegel dienen LCD-Displays. Insgesamt besteht das System aus neun Rechnern. Der Datenaustausch zwischen den Rechnern erfolgt über Ethernet. Als Fahrsimulations-Software wurde PELOPS [32], verwendet (siehe Abbildung 4). Während der Entwicklung wurde als Simulationsumgebung PELOPS (Programm zur Entwicklung längsdynamischer, mikroskopischer Prozesse in systemrelevanter Umgebung), welches ein mikroskopisches, fahrzeugorientiertes Verkehrssimulationsprogramm darstellt, verwendet [33].



Bild 3: Außenansicht Fahrsimulator.

### 3.1.2. Studiendesign

Im Fahrversuch erlebten die Studententeilnehmer zwei Fahrstrategien: Der neu entwickelte Bremsalgorithmus A und die Fahrstrategie B (basierend auf Wiedeman [15]) als auch eine Kontrollsituation. Um Lern-Ankereffekte auszuschließen wurden die Situationen in randomisierter Reihenfolge dargeboten.

#### Unabhängige Variable

Zur Auswertung der Unterschiede zwischen der ursprünglichen und der neu entwickelten Strategie wurde ein t-Test für abhängige Stichproben eingesetzt. Die entwickelte Fahrstrategie wird im Folgenden mit Fahrstrategie A bezeichnet, während die bestehende Strategie basierend auf Wiedemann mit Fahrstrategie B gekennzeichnet ist. Dabei stellte sich folgende Forschungsfrage: Welche Fahrstrategie wird hinsichtlich Kooperation und Kritikalität als abhängige Variable besser bewertet. Die Fragestellung wird in Abbildung 4 angeführt

## Abhängige Variablen

**AV1. One-Item Skala, um die wahrgenommene Kooperationsbereitschaft zu bewerten.**

Wie sehr hat das Fahrzeug auf der Nebenspur kooperiert?

gar nicht	sehr wenig	wenig	mittel	viel	sehr viel
0	1	2	3	4	5

15-Punkte Skala von Heller [34]

**AV2. One-Item Skala zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen.**

Wie kritisch würden Sie die Situation einschätzen? [35]



Bild 4: Fragestellungen bezüglich Kooperationsbereitschaft und Kritikalität.

### 3.4. Versuchsablauf und Instruktion

Die Versuchsumgebung stellt eine zweispurige Autobahn mit dichtem Verkehr dar. Der Proband folgte während des Versuches auf der rechten Fahrspur einem Vorderfahrzeug mit einer

geringen Geschwindigkeit von 2,78 m/s und wurde angewiesen seine Geschwindigkeit und den Abstand konstant zu halten. Auf der linken Nebenspur fuhren Kolonnen von Fahrzeugen mit einer höheren Geschwindigkeit von 8,33 m/s. Der Proband erhielt die Information, dass es sich dabei um autonome Fahrzeuge handle. Nach einer bestimmten Zeit wurde der Proband instruiert den Blinker zu setzen, um seine Spurwechselintention anzuzeigen. Anschließend sollte der Proband in Abhängigkeit der Reaktion des zukünftigen Folgefahrzeuges auf der Nebenspur in die sich ergebende Lücke einscheren. Ihm wurde freigestellt, keinen Spurwechsel durchzuführen, wenn er die Situation als zu kritisch einschätzte.

### **3.5. Stichprobe**

Die Probandenrekrutierung erfolgt über interne BMW Verteiler. An dieser Studie nahmen N=31 Probanden teil. Die Teilnehmerzahl setzte sich aus 23 Männern und 8 Frauen zusammen. Das mittlere Alter betrug 27 Jahre ( $M = 27.7$ ,  $SD = 4.45$ ). Die durchschnittliche Fahrleistung lag bei 5-10.000km/Jahr.

### **4. Ergebnisse**

Zur Analyse der ermittelten Daten wurde ein t-Test für abhängige Stichproben verwendet. Es zeigt sich, dass Fahrstrategie A ( $M = 01.06$ ;  $SD = .99$ ) als signifikant unkritischer bewertet wurde als Fahrstrategie B ( $M = 5.65$ ;  $SD = 2.06$ ) mit  $t(30) = -10.54$ ,  $p < .001$ ,  $r = .89$ . Zudem wurde die Fahrstrategie A ( $M = 13.06$ ;  $SD = 2.06$ ) als kooperativer wahrgenommen als die Fahrstrategie B ( $M = 4.35$ ;  $SD = 3.08$ ) mit ( $t(30) = 11.89$ ,  $p < .001$ ,  $r = .91$ )

### **5. Diskussion**

In der Studie wurde basierend auf Beobachtungen zum menschlichen Fahrverhalten eine kooperative Bremsstrategie entwickelt. Ziel war es herauszufinden, wie diese Fahrweise auf den umgebenden Verkehr wirkt, wenn die anderen Fahrer wissen, dass es sich um ein automatisiertes Fahrzeug handelt und wie diese im Vergleich zur bereits implementierten Strategie abschneidet. Die Ergebnisse zeigen, dass die neu entwickelte Strategie besser als die ursprüngliche bewertet wurde. Beim Vergleich des Ergebnisses mit den Ergebnissen der Studie zur Bewertung der Bremsstrategie menschlicher Fahrer wurde die Bremsstrategie in diesem Versuch leicht besser bewertet. Dies gibt einen Hinweis darauf, dass Fahrer im Mischverkehr erwarten, dass ein automatisiertes Fahrzeug sich an die informelle Kommunikation des Menschen anpasst. Die entwickelte Bremsstrategie erweitert die bestehende Literatur, indem sie aufzeigt, dass bereits geringe Verzögerungswerte ausreichend sind, um noch außen vom umgebenden Verkehr wahrgenommen zu werden. Somit wird das Komfortempfinden der Fahrzeuginsassen wenig beeinträchtigt. Das Ergebnis gibt einen ersten Anhaltspunkt wie zukünftige Fahrstrategien gestaltet werden können, dennoch sind zur Generalisierung auf weitere

Verkehrssituationen zusätzliche Studien erforderlich, um das menschliche Fahrverhalten auch in anderen Situationen des Straßenverkehrs analysieren zu können. Dies müsste mit einer Erweiterung des Algorithmus einhergehen. Eine weitere Limitation stellt die künstliche Verkehrsumgebung dar. Da sowohl die Studien während der Explorationsphase zur Bestimmung der implementierten Fahrparameter, als auch die Evaluationsstudie im Fahrsimulator durchgeführt wurden, muss betont werden, dass dort nie eine komplette Nachbildung realer Verkehrssituationen möglich ist. Zudem gestalten sich reale Verkehrssituationen als viel komplexer, was die Reizdarbietung anbelangt. Eine Untersuchung im Realverkehr ist daher unerlässlich. Eine weitere Limitation stellt der Ausgangspunkt des Algorithmus dar. Dieser durchläuft zwar auf Grundlage von Sicherheitsaspekten einen Entscheidungsprozess, welcher bestimmt, ob eine Fahrreaktion auf Einscherer erfolgt, geht jedoch von einer bereits getroffenen Entscheidung aus. Hier sollte zu Beginn des Algorithmus ein weiterer Entscheidungsprozess auf Grundlage einer Kosten-Nutzen-Funktion getroffen werden, der andere Faktoren wie Dringlichkeit, Umgebungs faktoren, Risiko zu kollidieren [36], [37] o.ä. miteinbezieht. Durch weitere Studien in diesem Bereich und einer Ausweitung der Verzögerungsstrategie könnte der Algorithmus dahingehend angepasst werden, dass dieser die gesamte Fahrstrategie von autonomen Fahrzeugen im Bereich der Reaktion auf Einscherer anreichert. Dies würde zu einer positiveren Außenwirkung von autonomen Fahrzeugen beitragen und damit deren Akzeptanz erhöhen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass dieser Ansatz erste Hinweise liefert, wenn es um die Modellierung einer Bremsstrategie für ein automatisiertes Fahrzeug im Mischverkehr geht, jedoch noch weitere Studien erforderlich sind, um diesen auf andere Situationen ausweiten zu können.

## 5. Literaturverzeichnis

- [1] K. A. Brookhuis and D. Waard de, "Consequences of Automation for Driver Behaviour and Acceptance," *iea* 2006, no. November, p. 8, 2006.
- [2] C. Rödel, S. Stadler, A. Meschtscherjakov, and M. Tscheligi, "Towards Autonomous Cars: The Effect of Autonomy Levels on Acceptance and User Experience."
- [3] B. Schoettle and M. Sivak, "A survey of public opinion about autonomous and self-driving vehicles in the U.S., the U.K., and Australia," 2014.
- [4] B. Färber, "Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern," in *Autonomes Fahren*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, pp. 127–146.
- [5] B. Heißing and M. Ersøy, *Fahrwerkhandbuch*. Imprint: Springer Vieweg, 2013.

- [6] A. Lange, M. Albert, K.-H. Siedersberger, and K. Bengler, "Ergonomic Design of the Vehicle Motion in an Automated Driving Car," *Procedia Manuf.*, vol. 3, no. Ahfe, pp. 2761–2768, 2015.
- [7] Wiedemann, *Simulation des Straßenverkehrsflusses*, Heft 8 der. Karlsruhe, 1974.
- [8] S. Schmidt and B. Färber, "Pedestrians at the kerb - Recognising the action intentions of humans," *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 12, no. 4, pp. 300–310, 2009.
- [9] R. Axelrod and W. D. Hamilton, "The Evolution of Cooperation.,," *Science*, vol. 211, no. 4489. New York, pp. 1390–6, 1981.
- [10] A. Benmimoun, D. Neunzig, and C. Maag, "Effizienzsteigerung durch professionelles/partnerschaftliches Verhalten im Strassenverkehr," in *FAT-Schriftenreihe*, 2004, no. 181.
- [11] D. Ellinghaus, *Rücksichtslosigkeit und Partnerschaft. Eine sozialpsychologische Untersuchung über den Umgang unter Kraftfahrern im Straßenverkehr.*, Uniroyal V. Köln: IFAPLAN, 1986.
- [12] M. Sivak and B. Schoettle, "Road Safety With Self-Driving Vehicles: General Limitations and road sharing with conventional vehicles," University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 2015.
- [13] W. Wachenfeld *et al.*, "Use-Cases des autonomen Fahrens," in *Autonomes Fahren*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, pp. 9–37.
- [14] T. M. Gasser *et al.*, "Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung," 2012.
- [15] R. Wiedmann, "Simulation des Straßenverkehrsflusse," Universität Karlsruhe, 1974.
- [16] R. Risser, *Handbuch zur Erhebung von Verkehrskonflikten mit Anleitungen zur Beobachterschulung*, 1. Aufl. Wien: Literas Universitätsverlag, 1991.
- [17] R. Risser, *Kommunikation und Kultur des Straßenverkehrs*. Literas Ges.m.b.H., Universitäts-, Buch- und Zeitschriftenverlag, 1987.
- [18] Merten, "Kommunikationsprozesse im Straßenverkehr," in *Symposium Unfallforschung und Verkehrssicherheit 1977=Schriftenreihe Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr*, 14th ed., Bundesminister für Verkehr, 1977, pp. 115–126.
- [19] P. Watzlawick *et al.*, *Menschliche Kommunikation : Formen, Störungen, Paradoxien*. H. Huber, 2007.
- [20] E. E. Jones and R. E. Nisbett, "The actor and the observer: Divergent perceptions of the causes of behavior.,," *Attribution: Perceiving the causes of behavior.* pp. 79–94, 1972.

- [21] H. Ohta, "Individual differences in driving distance headway," in *Vision in Vehicles*, S. Gale, A.G.; Brown, I.D.; Haslegrave, C.M.; Moorhead, I.; Taylor, Ed. Elsevier Science, 1993, pp. 91–100.
- [22] S. Le Vine, A. Zolfaghari, and J. Polak, "The tension between autonomous cars ' impacts on intersection level-of-service and their occupants ' use of travel time for leisurely or economically-productive activities," *Present. 94th Annu. Meet. Transp. Res. Board, January 2015*, pp. 1–27, 2015.
- [23] E. C. B. Olsen, "Modeling slow lead vehicle lane changing," 2003.
- [24] K. I. Ahmed, "Modeling Drivers Acceleration and Lane Changing Behavior," Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [25] S. Scherer *et al.*, "How the driver wants to be driven - Modelling driving styles in highly automated driving," in *Tagungsband 7. Tagung Fahrerassistenz*. 25, 2015.
- [26] N. Kauffmann, F. Naujoks, F. Winkler, and W. Kunde, "Learning the 'Language' of Road Users-How Shall a Self-driving Car Convey Its Intention to Cooperate to Other Human Drivers?," in *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, 2017, pp. 53–63.
- [27] F. Naujoks, C. Purucker, A. Neukum, S. Wolter, and R. Steiger, "Controllability of Partially Automated Driving functions - Does it matter whether drivers are allowed to take their hands off the steering wheel?," *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 35, pp. 185–198, 2015.
- [28] T. Rehder, W. Muenst, L. Louis, and D. Schramm, "Learning Lane Change Intentions through Lane Contentedness Estimation from Demonstrated Driving," in *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 2016, pp. 893–898.
- [29] Sukhan Lee, Woong Kwon, and Jae-Won Lee, "A vision based lane departure warning system," *Proc. 1999 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. Hum. Environ. Friendly Robot. with High Intell. Emot. Quotients (Cat. No.99CH36289)*, vol. 1, pp. 160–165, 1999.
- [30] V. Schnell, "Verhaltensmodellierung für antizipatorische Fahrerreaktion auf Einscherer Behavior," Technische Hochschule Deggendorf, 2015.
- [31] N. Kauffmann and M. Vollrath, "Making a good impression- An attempt to objectify the outward image of the driver while lane changing in dense traffic.," Braunschweig, 2017.
- [32] F. Christen and Q. Huang, "Das Fahrermodell im Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS – Modellierung und Applikationsmöglichkeiten."

- [33] F. Jourdan and H. Matschi, "Automatisiertes Fahren. Wie weit kann die Technik den Fahrer ersetzen? Entwickler oder Gesetzgeber, wer gibt die Richtung vor?," Verlag C.H. Beck oHG, 2015.
- [34] O. Heller, "Hörfeldaudiometrie mit dem Verfahren der Kategorienunterteilung (KU).," *Psychol. Beiträge*, vol. 27, p. 478–493., 1985.
- [35] J. S. A. Neukum, T. Lübbeke, H.-P. Krüger, C. Mayser, "ACC Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen," in *ACC Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen*, 2008, pp. 141–150.
- [36] H. Kita, "A merging–giveaway interaction model of cars in a merging section: a game theoretic analysis," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 33, no. 3–4, pp. 305–312, 1999.
- [37] A. Talebpour, H. S. Mahmassani, and S. H. Hamdar, "Modeling lane-changing behavior in a connected environment: A game theory approach," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 59, pp. 216–232, 2015.

# Der Motorradfahrer als Anforderungsgeber für Fahrerassistenzsysteme

Dipl.-Ing. **Markus Köbe**, Dr.-Ing. **Marcus Mai**,  
Prof. Dr.-Ing. **Günther Prokop**,  
Technische Universität Dresden, Dresden;  
Dipl.-Ing. **Henrik Liers**,  
Verkehrsunfallforschung der TU Dresden, Dresden

## Schlüsselwörter:

Fahrerassistenzsysteme, Motorräder, Unfallanalyse, Fahrverhalten, Fahrermotivation, Fahrtypen, Nutzerakzeptanz, Kaufanreize

## Kurzfassung

Maßnahmen der aktiven und passiven Sicherheit bei Kraftfahrzeugen sorgen seit Jahren für einen Rückgang der Verletzten und Getöteten im Straßenverkehr. Dem entgegen steht der zunehmende Anteil verletzter und getöteter Aufsassen motorisierter Zweiräder. Hier zeigt sich, dass Handlungsbedarf für weitere Sicherheitsmaßnahmen im Zweirad-Bereich besteht. Genaue aktive Sicherheitssysteme wie Fahrerassistenzsysteme können einen entscheidenden Beitrag zur Steigerung der Sicherheit motorisierter Zweiräder leisten. Das Ziel ist es, Fahrerassistenzsysteme zu entwickeln, die einerseits im Unfallgeschehen maximal wirksam sind, andererseits aber auch durch den Fahrer akzeptiert sind und genutzt werden sowie seine Motivation und Fahrverhalten einbeziehen.

Auf Basis der Analyse von Daten der German In-Depth Accident Study (GIDAS) wurden Unfallsachen sowie Fahrfehler analysiert. Ebenso wurden die Fahrerreaktionen von Personenkraftwagen (PKW) und Motorradfahrern bei Unfällen ausgewertet und analysiert, an welcher Stelle der Wahrnehmungskette der Fehler zu verorten ist. Hieraus können Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme, sowohl für PKW als auch für motorisierte Zweiräder, abgeleitet werden.

Innerhalb einer Reviewstudie wurden die Fahrermotivation sowie Verhaltensdeterminanten von Motorradfahrem untersucht. Dies mündet in die Einteilung der Fahrer in Fahrtypen sowie deren Nutzerakzeptanz und mögliche Kaufanreize in Hinblick auf neuartige Fahrerassistenzsysteme für motorisierte Zweiräder.

Im Zuge der Entwicklung und Einführung von intelligenten Verkehrssystemen (engl. Cooperative Intelligent Transport Systems, kurz C-ITS) haben die Nutzerakzeptanz sowie das Fahrerverhalten einen großen Einfluss. Im Rahmen des Connected Motorcycle Consortiums (CMC)<sup>1</sup>, in dem sich die TU Dresden sowie die Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden als wissenschaftlicher Partner engagieren, werden Standards für derartige Systeme identifiziert und kommuniziert.

Im Ergebnis können durch die Betrachtung der motorisierten Zweiräder Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme und C-ITS für PKW und Motorräder gestellt werden.

## 1. Einleitung und Motivation

Die Begriffe Motorrad und Motorradfahren sind mit Fahrspaß und Freiheit untrennbar verbunden. Maßgeblich sind die besonderen Eigenschaften des Motorrads als einspuriges Kraftfahrzeug für die Faszination Motorradfahren verantwortlich. Diese Faszination beruht im Wesentlichen auf der Unmittelbarkeit des Fahrerlebnisses, der Dynamik und der Intensität der Sinnesbeanspruchung. Diese Emotionalität und die Vielfalt des Erlebens sind wesentliche Gründe dafür, dass Motorradfahren fasziniert und sich Motorräder zunehmender Beliebtheit erfreuen. So stieg der Anteil zulassungspflichtiger Krafträder von 1992 (1.678.701 Fahrzeuge<sup>2</sup>) bis 2016 (4.314.493 Fahrzeugen<sup>34</sup>) um das Zweieinhalbfaache an. [1]

Trotz insgesamt steigendem Fahrzeugbestand und damit ansteigender Fahrleistung ist die Anzahl getöteter Menschen im Straßenverkehr tendenziell rückläufig. Die Gründe für diesen Rückgang sind vielschichtig und wirken durch ineinander greifen von Einzelmaßnahmen. Hier seien eingeführte gesetzliche Regelungen, Fahrerausbildung, Maßnahmen im Straßenbau und Gestaltung des Verkehrsraums, in der Verkehrsregelung, in der Verkehrserziehung und -aufklärung, in der präklinischen und klinischen Versorgung sowie selbstverständlich Entwicklungen der passiven, aktiven und integralen Sicherheit. Bild 1 zeigt den Verlauf der getöteten Insassen von PKW (grau) sowie Aufsassen von Krafträder mit amtlichem Kennzeichen (rot) – im Folgenden Motorrad genannt – von 1992 bis 2016. Aus diesem geht die Rückläufige Tendenz von getöteten PKW-Insassen hervor. Ebenso wird ersichtlich, dass auch die Anzahl getöteter Motorradaufzettler im Trend rückläufig ist und offenbar auch Motorradfahren sicherer wird.

---

<sup>1</sup> <http://www.cmc-info.net/>

<sup>2</sup> mit vorrübergehend stillgelegten Fahrzeugen

<sup>3</sup> einschließlich drei- und vierrädrigen Krafträder wie Trikes oder Quads

<sup>4</sup> ohne vorrübergehend stillgelegte Fahrzeuge

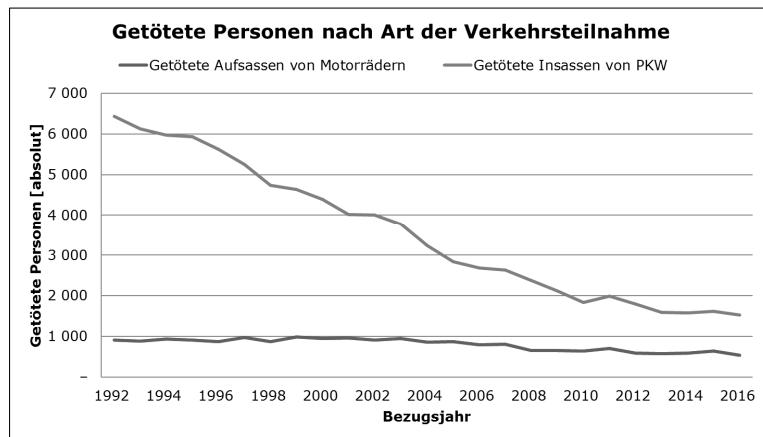


Bild 1: Anzahl getöteter Insassen von PKW und Aufsassen von Motorrädern von 1992 bis 2016 [1]

Es wird jedoch auch deutlich, dass der Anteil getöteter Nutzer von Motorrädern kontinuierlich ansteigt. Im Jahr 1992 (10.631 Getötete) waren 11 % der Getöteten Aufsassen motorisierter Zweiräder. Dieser Anteil stieg zum Jahr 2016 (3.206 Getötete) auf knapp 20 % an. Aus diesen Gründen steigt hier der Handlungsbedarf kontinuierlich an. [1]

Gerade aktive Sicherheitssysteme wie Fahrerassistenzsysteme, die Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen sowie die zunehmenden Vernetzung des Verkehrs können einen entscheidenden Beitrag zur Steigerung der Sicherheit motorisierter Zweiräder leisten. Das Ziel muss es sein, Fahrerassistenzsysteme zu entwickeln, die einerseits im Unfallgeschehen maximal wirksam sind, andererseits aber auch durch den Fahrer akzeptiert sind und genutzt werden sowie seine Motivation und Fahrverhalten einbeziehen.

## 2. Fahrverhalten

Aus der Fahrerverhaltensmodellierung sind eine Vielzahl an Ansätzen zur Modellierung bekannt. [6, 7, 8, 9, 10] Grundsätzlich wird hierbei der Fahrer in der Wahrnehmung seiner Fahraufgabe beschrieben. Ein fünfteiliger Ansatz mit Ergänzung des Wahrnehmungsfilters ist in **Bild 2** dargestellt und beinhaltet:

1. Die **Informationsaufnahme** in Form der Sinneswahrnehmung. Diese besteht für die Wahrnehmung der Fahraufgabe im Wesentlichen aus visuellen, vestibulären, auditiven, taktilen, propriozeptiven und haptischen Reizen.
2. Die **Wahrnehmung** ist die Modellierung eines Filters für die aufgenommenen Reize.

3. Die **Beurteilung** umfasst die Einschätzung der Fahrersituation, den Abgleich mit bereits erlebten Situationen sowie Abschließend der Beurteilung der Situation.
4. Die **Handlungsableitung** beinhaltet die Entscheidung über eine Verhaltensadaption und führt zur Handlungsstrategie innerhalb der wahrgenommenen Fahrsituation.
5. Die **Handlungsumsetzung** beinhaltet dann die tatsächliche Fahrzeugbedienung.

In der Verkehrsorschung wird die Zeit von Informationsaufnahme bis Handlungsumsetzung als Messbare Reaktionszeit mit beobachtbarem Ausgang angesehen. Die Abläufe und Modellierung sämtlicher Blöcke ist Gegenstand aktueller Forschung. [13] Aus diesem Grund sind Ansatzpunkte in **Bild 2** für die Fahrzeugsicherheit mit Verläufen angegeben.

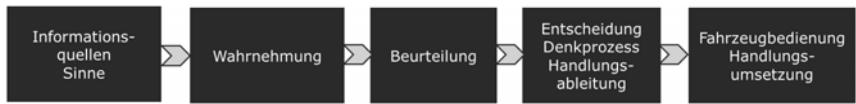


Bild 2: Darstellung der Fahraufgabe im Blockdiagramm und Potentiale für Sicherheitssysteme

### 3. Unfallgeschehen von motorisierten Zweirädern

Auf Basis von Analysen der German In-Depth Accident Study (GIDAS) wurden Unfälle mit 2.394 beteiligten Motorradfahrern ausgewertet. **Bild 3** zeigt die Verteilung der verunglückten Motorradfahrer über die Unfalltypen nach amtlicher Verletzungsschwere<sup>5</sup>.

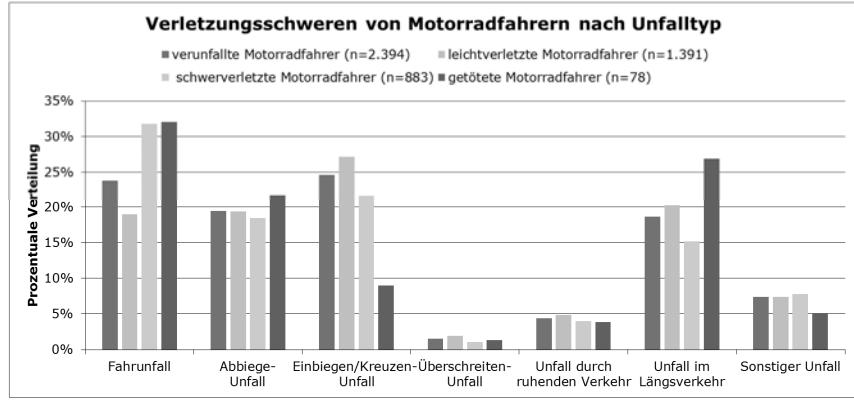


Bild 3: Verteilung der verunglückten Motorradfahrer nach Unfalltyp und Verletzungsschwere

<sup>5</sup> Diese Abbildung ermöglicht eine Darstellung auf Fahrzeugebene

Hieraus gehen vier Hauptunfalltypen für Motorradfahrer hervor, welche in nochmals mit Beispielen veranschaulicht werden.

Der **Fahrunfall**, welcher aufgrund eines Kontrollverlusts des Fahrers über sein Fahrzeug resultiert. Während ungefähr 22 % aller Motorradfahrer in dieser Konfliktsituation verunglücken, entfallen 32 % der getöteten Fahrer auf diesen Unfalltyp. Aus Befragungen ging hervor, dass Zweidrittel der Motorradfahrer die Unfallauslösung anhand der eigenen Fahrzeugdynamik erkannten. Der Anteil an Fahrunfällen sinkt mit steigender Bekanntheit der Unfallstelle.

Der **Abbiegeunfall**, welcher aus einem Konflikt mit einem abbiegenden Fahrzeug entsteht, welches entgegen kommt oder voraus fährt. Der Hauptverursacher ist hier zu 68 % der Unfallgegner des Motorradfahrers, der als Abbieger entgegen kommt. Ist der Gegner der Hauptverursacher, so wird in 35 % der Fälle dem Motorradfahrer eine Teilschuld aufgrund nicht angepasster Geschwindigkeit oder Überholen trotz unklarer Verkehrslage vorgeworfen. Der Motorradfahrer ist zu 32 % der Hauptverursacher, oft in der Situation mit einem vorrausfahrendem Abbieger in Verbindung mit einem Fehler beim Überholen bei unklarer Verkehrslage oder nicht angepasster Geschwindigkeit.

Der **Einbiegen/Kreuzen-Unfall**, der aus einem Konflikt mit einem Fahrzeug entsteht, das von einer Straße aus auf eine höherrangige Straße einbiegen will oder diese kreuzt. Hier finden sich Unfälle zwischen dem Motorradfahrer und einem wartepflichtigen Fahrzeug, welches zu 84 % der Hauptverursacher ist. Die Hauptunfallursache ist dann in 73 % der Fälle das Nichtbeachten der die Vorfahrt regelnden Verkehrszeichen. Bei der Reaktion lässt sich beim Motorradfahrer das Ausweichen in Richtung der Bewegungsrichtung des Gegners beobachten.

Der **Längsverkehrsunfall** beinhaltet Fälle, in denen Fahrzeuge mit gleicher Fahrtrichtung in eine Konfliktsituation kommen. Dies sind einerseits Konflikte zwischen einem Motorrad und einem Fahrstreifenwechsler voraus oder einem Fahrzeug, das vor dem Motorrad fährt/anhält/steht/wartepflichtig ist oder wendet. In diesen Fällen geben 55 % der Motorradfahrer an, anhand der Handlung des Gegners die Unfallauslösung erkannt zu haben.

Diese Hauptunfalltypen bilden die Szenarien für die weitere Betrachtung der Fahrer im Unfallgeschehen und der Verortung des Fahrerfehlers im Prozess der Fahrzeugführung.

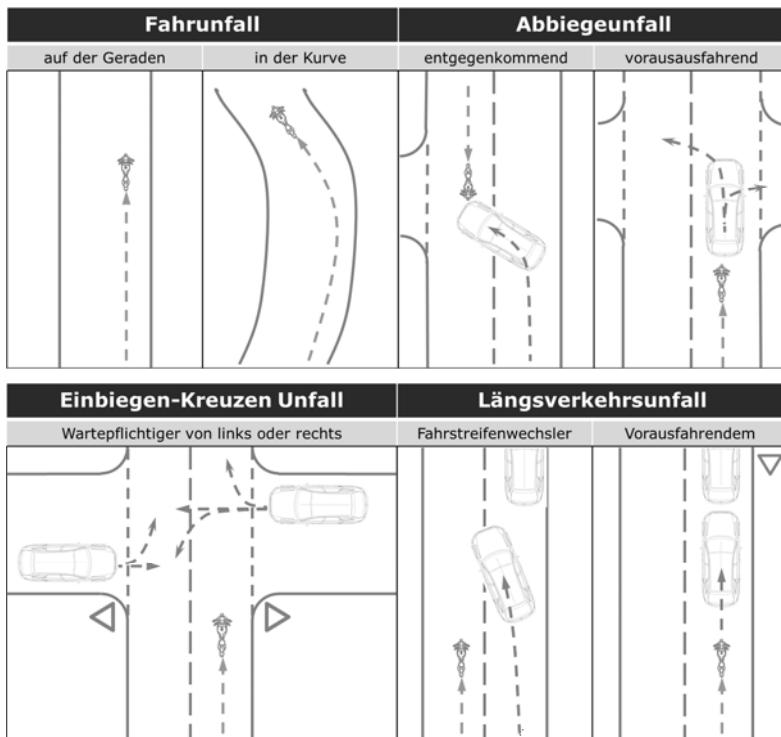


Bild 4: Beispiele für die Hauptunfalltypen von Motorradfahrer

Unter Nutzung der Modellvorstellung aus Abschnitt 2 kann auf Basis der Befragung der beteiligten Fahrer der Fehler in der Fahraufgabe verortet werden. Diese können exemplarisch folgende Ursachen haben:

- *Störung der Informationsaufnahme* durch Seh- oder Hörschwierigkeiten, Sichthindernissen oder Witterung/Nebel
- *Störung der Wahrnehmung* durch Ablenkung, Zeitdruck und Stress, Müdigkeit, Medikamente/Drogeneinfluss, Überforderung mit der Situation, Reizüberflutung oder einen falschen Fokus/fehlerhafte Konzentration
- *Störung der Beurteilung* durch falsche Erwartung bezüglich der Entwicklung der Fahrsituation, falsche Einschätzung der anderen Verkehrsteilnehmer oder falsche Einschätzung des eigenen Fahrzeugs

- *Störung der Handlungsableitung* durch falsch geplante Handlung oder geplant regelwidriges Verhalten
- *Störung der Handlungsumsetzung* durch Schwierigkeiten in der Fahrzeugbedienung oder einer falschen/zu langsam Reaktion

Der Ansatz in dieser Auswertung geht im Verkehr von einem latenten Risiko und damit einer latenten Kritikalität aus. Diese Kritikalität kann durch eine Störung, bspw. einen einbiegenden PKW sprunghaft ansteigen. Ab jetzt muss einer der beiden Beteiligten sein Fahrverhalten an die Situation adaptieren, da andernfalls die Kritikalität immer weiter ansteigt und letztlich zum Unfall führen kann. Dazu muss die komplette Kette der Fahraufgabe durchlaufen werden. Es wird daher innerhalb der Fahraufgabe nur ein Fehler verortet und an dieser Stelle die Kette als gestört angenommen. Wenn bspw. Motorradfahrer und PKW-Fahrer durch ein Sichthindernis keinen Sichtkontakt haben, so kann die Kette nicht weiter durchlaufen werden und das Verhalten letztlich nicht entsprechend adaptiert werden.

In 338 Motorradbefragungen ist die Wahrnehmungskette auswertbar, davon wurde diese in 206 Fällen gestört. **Tabelle 1** zeigt die Verortung der Fahrfehler bei allen Motorradfahrern. Mehr als jeder Dritte schätzt demnach die Fahrsituation falsch ein, weitere 40 % haben die Situation nicht aufnehmen können oder diese nicht wahrgenommen.

Tabelle 1 Verortung des Fehlers für alle Motorradfahrer

n=206

Sinnes-wahrnehmung?	Wahr-genommen?	Falsch eingeschätzt?	Falsche Handlung abgeleitet?	Fehler bei der Umsetzung?

22,8 %      19,9 %      35 %      16,5 %      5,8 %

**Bild 5** zeigt die Verortung des Fahrfehlers über die Unfalltypen beim Motorradfahrer. Hier werden die Blöcke Informationsaufnahme/Wahrnehmung/Beurteilung sowie Handlungsableitung/Handlungsumsetzung gruppiert. Hier fallen Fahrfehler auf, die hauptsächlich in der Informationsaufnahme und Beurteilung verortet sind. Einzig die Verortung des Fehlers für den Abbiegeunfall mit einem entgegenkommenden PKW ist nahezu gleichverteilt.

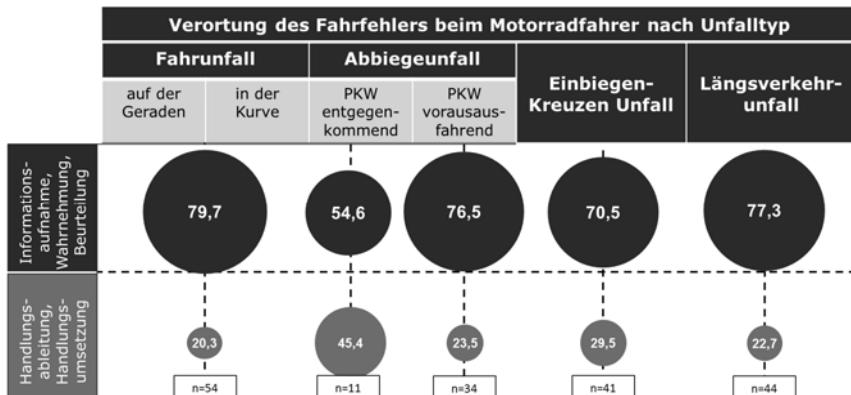


Bild 5: Verortung des Fahrfehlers beim Motorradfahrer

Die Betrachtung der Reaktion des Motorradfahrers auf die Fahrsituation ist in **Bild 6** dargestellt und zeigt, wie oft eine Reaktion durch Bremsen bzw. durch Ausweichen gezeigt wurde. Diese Angaben stammen aus der Einschätzung des jeweiligen Rekonstrukteurs und ausdrücklich nicht aus der Befragung. Es zeigt sich, dass ein Drittel bis drei Viertel der Fahrer mit Bremsen und ca. 25 – 50 % mit Lenken.

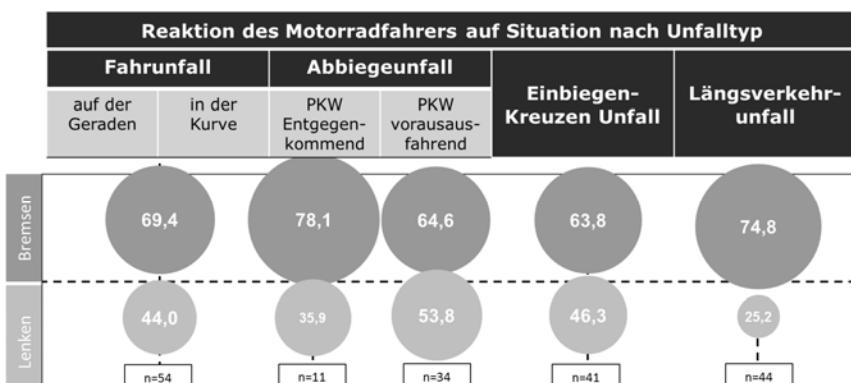


Bild 6: Reaktion des Motorradfahrers auf die Situation

Dem Gegenüber ist in **Bild 7** die Verteilung der Verortung des Fahrfehlers für den PKW-Fahrer angegeben. Hier sind etwas mehr als 88 % der Fehler auf die Informationsaufnahme bzw. deren Wahrnehmung verortet.

n=146

Sinneswahrnehmung?	Wahr-genommen?	Falsch eingeschätzt?	Falsche Handlung abgeleitet?	Fehler bei der Umsetzung?
43,8 %	44,5 %	8,9 %	2,1 %	0,7 %

Bild 7: Verortung des Fehlers beim PKW-Fahrer

Die Darstellung der Verortung des Fahrfehlers nach Unfalltypen in **Bild 8** zeigt die maßgebliche Verortung des Fahrfehlers im Bereich der Informationsaufnahme, Wahrnehmung und Beurteilung der Situation. Da Unfallgegner bei Fahrunfällen von Motorrädern nicht ursächlich sein können, wurden diese Fälle nicht betrachtet. Ebenso ist die Verortung des Fehlers eines vorausfahrenden PKW vor einem Motorrad lediglich zur Vollständigkeit angegeben.

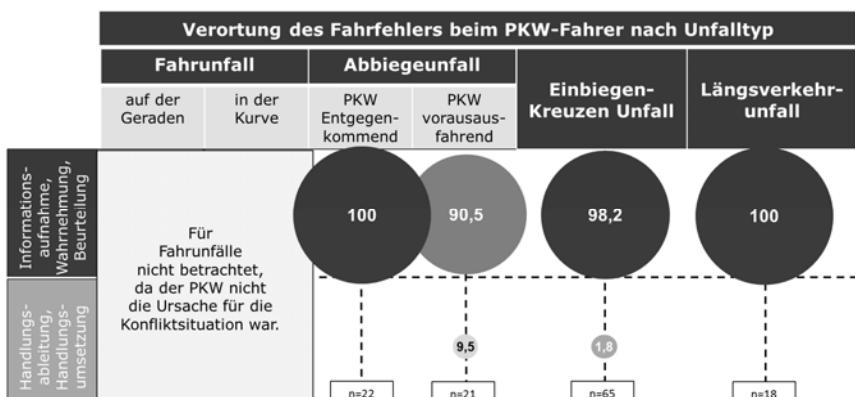


Bild 8: Verortung des Fahrfehlers nach Unfalltyp

#### 4. Fahrermotivation und Nutzerakzeptanz aus der Literatur

Die Motive zum Fahren von Fahrzeugen ähneln und unterscheiden sich bei Motorradfahrern sowie PKW-Fahrern je nach Fahrtzweck. Grundsätzlich verleiben sich Menschen das Fahrzeug in ihr eigenes Körperschema und Sinnessystem ein. Dazu kann das Fahren auch als Selbstzweck verstanden werden, wobei hier der Erlebnismehrwert der Fahrt an sich im Vordergrund steht. Hinzukommen können Motive wie Selbstkonzepte und sozialer Vergleich, Freizeitmotivation und Regeneration sowie Unabhängigkeit. [4, 15]

Der PKW ist oft ein Verkehrsmittel für die Fahrt von A nach B und somit ein Mittel zum Zweck mit einem relativ unsinnlichen Bewegungserlebnis. Die Anonymität im Fahrzeug zeigt sich oft in Egozentrik und im schlimmsten Fall in Asozialität. Zudem hat der PKW nach wie vor eine hohe Signalwirkung als Statussymbol. [4, 15]

Das Motorrad hingegen erfüllt oft eher eine Freizeitfunktion. Es dient vielen Fahrern für unterschiedliche Motive [4, 15]

- „Thrill“-Erleben als eine Wechselwirkung zwischen Angst und Lust
- „Flow“-Erleben als gesteigerte Gegenwart mit Spaß und Freude, in der Subjekt und Umwelt verschmelzen
- Sinnliche Aspekte wie die Fahrdynamik, haptische und kinästhetische Wahrnehmung von Geschwindigkeit und Beschleunigung
- Suche nach „Arousal“

Oft wird Motorradfahren mit Freiheit verbunden und gibt das Gefühl von Unabhängigkeit, auch in Bezug auf eine größere Beweglichkeit im Straßenverkehr wie das Durchschlängeln im Stau oder die oft ausbleibende Parkplatzsuche. Oft haben Fahrer ein „persönliches“ Verhältnis zum Motorrad, Wartung und Reparatur werden selbst übernommen und das Motorrad ist mit Stolz verbunden. Die Schutzlosigkeit in der Eigenschaft als schwächerer Verkehrsteilnehmer verbunden mit oben genannten Motiven führen zu einem Gruppenerlebnis als überindividuelle Identität, die sich beispielsweise im Grüßen der Fahrer untereinander äußert. [4, 15]

Die Risikowahrnehmung von Motorradfahrern wurde in einer kalifornischen Fragebogenstudie untersucht. Hierbei gaben 80 % der Befragten an, schneller als erlaubt zu fahren. Über 40 % glaubten weiterhin, dass schnelles Fahren ein besserer Indikator eines „guten Fahrers“ ist, als vorschriftsmäßiges Fahren/Richten nach Verkehrsregeln. Motorradfahrer können das Risiko dabei verhältnismäßig gut einschätzen. Fahrer im Alter bis 25 Jahre sich in die „medium“ oder „high-risk-category“ ein und gaben an, ihr Bewusstsein dafür aus Trainingsmaßnahmen zu entnehmen. Fahrer über 40 Jahre ordneten sich in die „low-risk-category“ ein und gaben an, diese Selbstwahrnehmung aus ihrer Erfahrung zu entnehmen. *Im Ergebnis wurden Alter, Geschlecht sowie Grad der Erfahrung als Variablen für riskantes Verhalten herausgearbeitet.* [11]

Die Europäische Fragebogenstudie Social Attitudes to Road Traffic Risk in Europe (kurz: SATRE4) untersuchte Meinungen und Verhaltensweisen, welche hinsichtlich Risiko und Sicherheit im Straßenverkehr bestehen. Dabei gab jeder fünfte Motorradfahrer an, riskantes Verhalten oft bis sehr oft oder immer auszuüben, darunter waren häufig männliche Fahrer unter 35 Jahren mit entsprechend hoher Fahrleistung. Für Motive für das Fahren von Motorrädern gaben die Fahrer vor allem Spaß, Gefühl der Freiheit sowie Unkompliziertkeit bspw. hinsichtlich Parken an. Es wurden hier vier Fahrertypen identifiziert: Commuters, Sport-Riders, Ramblers und Travellers. *Im Ergebnis sind Maßnahmen für mehr Verkehrssicherheit in Hinblick auf Motorradfahrer nicht pauschal für alle Motorradfahrer gleichermaßen anzusetzen, sondern Zielgruppen- und Länderspezifisch einzusetzen.* [14]

Eine Studie aus Norwegen untersuchte, welche Motorradfahrer besonders gefährdet sind. Darunter sind Motorradfahrer, welche Sportler oder Supersportler fahren und ein geringes Alter haben. Die Studie stellt heraus, dass vor allem Fahrer von Sportmotorrädern der Sicherheit eine geringe Bedeutung beimessen und dies im Fahrverhalten zeigen. Das Fahren mit einem Sozius wird von den befragten Fahrern als Risikofaktor wahrgenommen. *Im Ergebnis misst die Studie informierenden und warnenden Systemen ein hohes Potential für mehr Sicherheit bei.* [3]

Aus einer quantitativen Gruppendiskussion aus Australien wurden soziale Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten analysiert. Dabei stellte sich das „in-group“ Verhalten als entscheidende Einflussvariable heraus. Die Identität als Motorradfahrer geht mit zahlreichen Überzeugungen, Erwartungen und Verhaltensweisen einher, die als „normativ“ angesehen werden. Diese Identität geht in das Selbstkonzept des Motorradfahrers über und beeinflusst entsprechend das Verhalten. *Im Ergebnis ergibt sich die Möglichkeit, durch Medienkampagnen wie Werbung dieses Selbstbild zu beeinflussen und ergänzend mit Fahrertrainings die Sicherheit zu erhöhen.* [16]

Bezüglich der Nutzerakzeptanz erarbeitete eine Survey Studie die Fragestellung, welche Fahrerassistenzsysteme für Motorradfahrer die größte Akzeptanz erreicht. Die höchste Akzeptanz gab es hierbei allgemein für informierende Systeme, konkret ein Nachtsichtassistent. Die geringste Akzeptanz hatten Kurvengeschwindigkeitswarner, intelligente Geschwindigkeitsbegrenzer, Fahrstreifenhalteassistenten sowie Abstandsregeltempomat. Grundsätzlich akzeptierten jüngere Fahrer Fahrerassistenzsysteme eher als ältere Fahrer. Die größten Befürchtungen bei der Einführung solcher Systeme bestehen in der Wahrnehmung, dass diese zu Faulheit und Unachtsamkeit führen. Es zeigte sich vor allem die Angst, dass Fahrer ihr Fahrzeug nicht mehr richtig „kennen“ und technische Prinzipien nicht mehr verstehen. Die Einstellung zu selbst agierenden Systemen wird als Kontroll- und Verantwortungsverlust empfunden.

Motorradfahren sei eine freie Entscheidung, weshalb diese nicht abgegeben werden solle. Hierbei müsse ein Grad der Einflussnahme sowie die Möglichkeit vorhanden sein, Systeme abschalten zu können. Multiple Fahrerassistenzsysteme werden als verwirrend, nervig und ablenkend beschrieben. Im Ergebnis besteht eine höhere Akzeptanz für informierende statt für eingreifende Systeme. Gerade automatische Notrufsysteme haben eine hohe Akzeptanz. Im Gegensatz dazu sind eingreifende Systeme, vor allem jene, die die Freiheit in der Fahrzeugführung einschränken, weniger akzeptiert. Die Gründe dafür liegen in fehlenden Erfahrungen mit solchen Systemen und die Vorteile dieser Systeme den Fahrern nicht bekannt sind. [2]

Der Fragestellung nach Einflussfaktoren für die Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen geht eine Simulatorstudie nach. Die Modellvorstellung hierbei beschreibt die soziale Norm, die Bewertung des Designs sowie die wahrgenommene Sicherheit als Determinanten für die Nutzerintention („usage intention“), welche über „willingness to have system installed“ und „willingness to pay for system“ analysiert wurde. *Dabei wurde für die soziale Norm identifiziert, dass Systeme, die Freunde von Motorradfahrern mögen bzw. nutzen die Wahrscheinlichkeit der eigenen Nutzung erhöht. Eine bessere Bewertung der Informationsdarstellung geht mit einer höheren Nutzerintention einher und hat darauf einen signifikanten Einfluss.* [5]

## 5. Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenz und Ausblick

Im Unfallgeschehen verunglücken Motorradfahrer oft durch einen Kontrollverlust ohne Konflikt mit einem anderen Beteiligten. Hier ist es wichtig, dem Fahrer entsprechende Informationen bereitzustellen, um diese Situationen zu vermeiden. Weiterhin haben Fahrdynamikregelsysteme sowie aktive und proaktive Fahrerassistenzsysteme ein großes Potential. Sie müssen den Fahrer in der Stabilisierung des Fahrzeug sowie einer sicheren Bahnplanung mit Adaption von geplanter Trajektorie und zugehöriger Geschwindigkeit unterstützen.

Bei einem Konflikt mit einem anderen Beteiligten reagiert die Mehrzahl der Motorradfahrer auf diese Situation. Hier findet sich ebenfalls ein großes Potential für Fahrdynamikregelsysteme sowie proaktive Systeme. Diese müssen kritische Situationen frühzeitig erkennen und kritische Fahrzustände während der Reaktion des Motorradfahrers vermeiden. Dies kann einerseits durch Fahrdynamikregelung, andererseits aber auch durch die Vermeidung der kritischen Situation mittels aktiver oder proaktiver Systeme erreicht werden.

Das fahren eines Motorrads geht mit einer Vielzahl von Motiven einher. Diese umfassen das Freiheitsgefühl, Spaß und Fahrfreude, Thrill/Flow/Arousal sowie Sensation Seekung, der Identifikation mit dem Motorrad und starkem Interesse an der Technik, das Verständnis von Motorradfahren als Gruppenerlebnis und der überindividuellen Identität, der Unmittelbarkeit des

Fahrerlebnisses sowie der direkten Kopplung mit dem Fahrzeug und dem Erleben der Fahr-dynamik. Diese Motive dürfen in Hinblick auf eine hohe Nutzerakzeptanz nicht gestört werden. Fahrerassistenzsysteme sollten neben dem Sicherheitsmehrwert auch einen Kaufanreiz bieten, den der Fahrer außerhalb kritischer Fahrsituationen erleben kann. Dieser Mehrwert muss zielgruppenspezifisch und länderspezifisch implementiert sein. Hohe Akzeptanzwerte konnten bisher informierende Systeme erzielen. Für die Einführung von aktiven bzw. intervenierenden Systemen muss der Vorteil kommuniziert und idealer Weise während der Fahrt - bspw. in Trainings - direkt aufgezeigt werden.

Ist in einer Konfliktsituation mit einem Motorradfahrer ein weiteres Fahrzeug involviert, so wird der Motorrad entweder gar nicht gesehen/wahrgenommen oder seine Entfernung bzw. Geschwindigkeit wird falsch eingeschätzt. Gerade hier bietet sich ein großes Potential von informierenden und auch warnenden Systemen. Diese müssen den PKW Fahrer auf das Motorrad aufmerksam machen bzw. proaktiv eine kritische Situation vermeiden. Gerade bei der Einführung von neuen assistierenden Funktionen sowie immer weiter automatisierten Fahrzeugen muss das Motorrad als ungeschützter Verkehrsteilnehmer Berücksichtigung finden.

Im Zuge der Entwicklung und Einführung von intelligenten Verkehrssystemen (engl. Cooperative Intelligent Transport Systems, kurz C-ITS) haben die Nutzerakzeptanz sowie das Fahrer-verhalten einen großen Einfluss. Im Rahmen des Connected Motorcycle Consortiums (CMC)<sup>6</sup>, in dem sich die TU Dresden sowie die Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden als wissenschaftlicher Partner engagieren, werden Standards für derartige Systeme identifiziert und kommuniziert.

Im Ergebnis können durch die Betrachtung der motorisierten Zweiräder Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme und C-ITS für PKW und Motorräder gestellt werden.

---

<sup>6</sup> <http://www.cmc-info.net/>

## Literaturverzeichnis

- [1] Bundesamt, Statistisches: Fachserie 8 Reihe 7, Verkehr – Verkehrsunfälle 2016. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2017
- [2] Beanland, V., Lenné, M. G., Fu-essl, E., Oberlader, M., Joshi, S., Bellet, T. & Yan-nis, G. (2013). Acceptability of rider assistive sys-tems for powered two-wheelers. Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 19, 63-76
- [3] Bjørnskau, T., Nævestad, T. O., & Akhtar, J. (2012). Traffic safety among motorcy-clists in Norway: A study of subgroups and risk factors. Accident Analysis & Pre-vention, 49, 50-57.
- [4] Dick, M. (2002). Auf den Spuren der Motive, Auto zu fahren.
- [5] Huth, V., & Gelau, C. (2013). Pre-dicting the acceptance of advanced rider assis-tance systems. Accident Analysis & Prevention, 50, 51-58.
- [6] Mai M., Tüschen T., Prokop G.: „A physiological based Driver Model for longitu-dinal Vehicle Guidance and its Challenges in Validation“ – 3rd International Sympo-sium on Future Active Safety Technology Towards zero traffic accidents (FAST-zero), Göteborg, 09.-11. September 2015.
- [7] Mai M., Wang L., Helmer T., Prokop G.: „Numerical driver behaviour model for sto-chastic traffic simulation for the evaluation of driver assistance systems and auto-mated driving functions“ – 7. Tagung Fahrerassistenz, München, 25.-26. Novem-ber 2015.
- [8] Mai M., Wang L., Prokop G.: „Advancement of the car following model of Wiedemann on lower velocity ranges for urban traffic simulation“ – The Driving Simulation Conference 2016 VR, Paris, 07.-09. September 2016.
- [9] Mai M.: „Simulation der sensorischen Wahrnehmung des Fahrers als Teil eines Fahrerverhaltensmodells zur Entwicklung und Bewertung warnender Fahrerassis-tenzsysteme“ – 9. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit, Berlin, 20.-21. November 2013.
- [10] Mai, Marcus: Fahrerverhaltensmodellierung für die prospektive, stochastische Wirksamkeitsbewertung von Fahrerassistenzsystemen der Aktiven Fahrzeugsicherheit, Dissertation, Schriftenreihe des Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik der TU Dresden (Band 4), Dresden, 2017
- [11] Mannering, F. L., & Grodsky, L. L. (1995). Statistical analysis of mo-torcyclists' per-ceived accident risk. Accident Analysis & Prevention, 27(1), 21-31

- [12] Prokop G., Mai M., Schlag B., Weller G., Gruber C., Tomasch E., Wimmer P.: "Effektivitätsbewertung warnender Fahrerassistenzsysteme durch Fahrerverhaltensmodelle" – 28. VDI/VW-Gemeinschaftstagung "Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit", Wolfsburg, 10.-11. Oktober 2012
- [13] Ring, P.; Wang, L.; Fahrenkrog, F.; Jung, O.; Prokop, G.: "Modelling Cognitive Driver Behavior In The Context Of Prospective Safety Assessment " - 26. Aachener Kolloquium, Aachen, 10.10.2017.
- [14] SARTRE4 (Social Attitudes to Road Traffic Risk in Europe). (2012). European road users' risk perception and mobility – The SARTRE 4 survey
- [15] Schönhammer, R. (1991). In Bewegung: zur Psychologie der Fortbewegung. Quintessenz-Verlag.
- [16] Tunnicliff, D., Watson, B., White, K. M., Lewis, I., & Wishart, D. (2011). The social context of motorcycle riding and the key determinants influencing rider behavior: a qualitative investigation. *Traffic injury prevention*, 12(4), 363-376

