

32. VDI / VW-Gemeinschaftstagung

Fahrerassistenz und
automatisiertes Fahren

VDI-Berichte 2288

VDI-BERICHTE

Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH

32. VDI / VW-Gemeinschaftstagung

Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren

Wolfsburg, 08. und 09. November 2016



VDI-Berichte 2288

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 2016

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 978-3-18-092288-1

Inhalt

	Seite
Vorwort	1
 Plenarvorträge	
<i>H. Winner, W. Wachenfeld, P. Junietz</i>	Neue Anforderungen an Testverfahren und Integrations- tools für automatisiertes Fahren 3
<i>K. Lemmer</i>	Automatisiertes Fahren 2030 – welche Chancen bieten Automation und Vernetzung? 25
<i>J. Jungwirth</i>	Die Disruption der Automobilindustrie – Von der Evolution zur Revolution beim automatisierten Fahren? 35
 Posterbeiträge	
<i>S. Molzahn, H. Rehborn, M. Koller</i>	Zeitlich-räumliche Erkennung von Stauenden für die assistierte Verzögerung von Fahrzeugen 45
<i>J. Ferdinand, B. Yi</i>	Trajektorienplanung zur Kollisionsvermeidung im urbanen Raum 53
<i>A. Noll, C. Ament</i>	Konzeption und Entwicklung eines Preview-Systems zur Verbesserung der Komforteigenschaften und der Reich- weiteneffizienz eines Fahrzeugs mit geregelten Vertikal- dynamiksystemen auf Basis von Backend-Daten 63
<i>H. Oschlies, F. Saust, S. Schmidt</i>	Methodik zur Objektivierung einer Querverführungsassistenz 71
<i>M. Schratter, T. Schaller, D. Watzenig</i>	Maschinelles Lernen Aktiver Sicherheitssysteme am Beispiel Fußgängerschutz 83

<i>M. Martin, F. Diederichs, K. Li, M. Voit, V. Melcher, H. Widloither, R. Stiefelhagen</i>	Klassifikation von Fahrzuständen und Nebentätigkeiten über Körperposen bei automatisierter Fahrt	93
<i>M. Dziennus, J. Kelsch, A. Schieben</i>	Ambient Light – An integrative, LED based interaction concept for different levels of automation	103
<i>S. Grünzel, B. Färber</i>	Die Pre-Crash Phase als Auslegekriterium für zukünftige Fahrerassistenzsysteme	111
<i>M. Festner, H. Baumann, D. Schramm</i>	Der Einfluss fahrfremder Tätigkeiten und Manöverlängs- dynamik auf die Komfort- und Sicherheitswahrnehmung beim hochautomatisierten Fahren – Ein Argument für die Adaptivität automatisierter Fahrfunktionen	121
<i>B. Rogic, S. Samiee, A. Eichberger, S. Bernsteiner, C. Payerl</i>	Konzeptionelle virtuelle Absicherung von automatisierten Fahrfunktionen anhand eines SAE Level 3 Fahrstreifen- wechselassistenten	131

Sensorik

<i>M. Schulmeister, K. Rink, J. Herzfeld, S. Zecha, D. Westhofen, O. Tessier</i>	Ein neuartiger Systemansatz zum Schutz von schwächeren Verkehrsteilnehmern – Technologie und Konzeptansatz	141
<i>B. Brück, S. Wieland, M. Lang, K. Bengler</i>	Sensorfusion zum Verständnis des Innenraumkontexts – Ein wichtiger Schritt zum intelligenten Fahrzeug	157

<i>M. Kunert,</i> <i>F. Meinl,</i> <i>M. Stolz</i>	Herausforderungen, Migrationspfade und Zukunfts- technologien auf dem Weg hin zum vollautomatisierten Fahren – Perspektiven und Sichtweisen aus dem Blickwinkel eines Automobilradars	169
--	--	-----

Umweltwahrnehmung

<i>S. Lapoehn,</i> <i>P. Pekezou Fouopi,</i> <i>C. Löper,</i> <i>S. Knake-Langhorst,</i> <i>T. Hesse</i>	Semantische Netze als Wissensbasis automatisierter Fahrzeuge	185
<i>A. Haar,</i> <i>A. Kleen,</i> <i>L. Albrecht,</i> <i>M. Schmettow,</i> <i>W. B. Verwey</i>	Intentionen wahrnehmen und Umfeld verstehen: kognitive Prozesse in der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern	201
<i>A. Mueller,</i> <i>C. Seeger,</i> <i>L. Schwarz,</i> <i>M. Manz</i>	Tiefe neuronale Netze für die Szeneninterpretation anhand von Belegungskarten	219

Von der Assistenz zur Automation

<i>C. Marberger,</i> <i>H. Mielenz,</i> <i>F. Naujoks</i>	Die Rolle des Fahrers beim teilautomatisierten Fahren im urbanen Raum	231
<i>F. Naujoks,</i> <i>D. Befelein,</i> <i>A. Neukum</i>	Welche Aspekte fahrfremder Tätigkeiten schränken die Übernahmefähigkeit beim hochautomatisierten Fahren ein?	245
<i>M. Kühn,</i> <i>T. Vogelpohl,</i> <i>M. Vollrath</i>	Was heißt sichere Übergabe? Bewertung der Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung mittels Simulatorstudie	263

<i>L. Dörr,</i> <i>M. Heigl,</i> <i>A. Grzempa,</i> <i>C. Boiger</i>	IT-Security-Architektur für Next-Generation Kommunikationssysteme im Automobil	283
<i>S. Scherer,</i> <i>D. Schubert,</i> <i>A. Dettmann,</i> <i>F. Hartwich,</i> <i>A. C. Bullinger</i>	Wie will der „Fahrer“ automatisiert gefahren werden? Überprüfung verschiedener Fahrstile hinsichtlich des Komforterlebens	299
<i>A. Kraus</i>	Sicherheitsanforderungen an Systeme hochautomatisiert fahrender Fahrzeuge	311

Planung

<i>C. Witzlack,</i> <i>M. Beggiato,</i> <i>J. Krems</i>	Interaktionssequenzen zwischen Fahrzeugen und Fußgängern im Parkplatzszenario als Grundlage für kooperativ interagierende Automatisierung	323
<i>A. Rupp,</i> <i>M. Stolz</i>	Eine erweiterte Bewertungsfunktion für umfassende Trajektorienplanung auf Autobahnen	337

Absicherung

<i>D. Wittmann,</i> <i>C. Wang,</i> <i>F. Diermeyer</i>	Methodische Definition von sicherem Verhalten hoch- automatisierter Fahrzeuge – Ganzheitliche Bewertung von Verhaltensspezifikationen auf Basis von abstrakten Szenarien	357
<i>H. Windpassinger,</i> <i>F. Kraemer,</i> <i>U. Voigt</i>	Modernes Videodaten Management für effizienteres Testen von ADAS/AD Systemen: Was wir von der Medienindustrie lernen können	373
<i>M. Beine,</i> <i>A. Geburzi</i>	Absicherung sicherheitskritischer Assistenzsysteme – Durchgängig und nachvollziehbar	387

Weiterentwicklung heutiger Fahrerassistenzsysteme

<i>C. Müller,</i> <i>K.-H. Siedersberger,</i> <i>B. Färber,</i> <i>M. Popp</i>	Aktive Aufbauneigung als Rückmeldekanal bei Quer- führungsassistenz über entkoppelte Lenkaktoriik	395
<i>M. Salfeld,</i> <i>M. Arnon</i>	Integration des nutzerzentrierten Entwicklungsansatzes in die Serienentwicklung einer Baustellenassistenz	411

Umweltwahrnehmung

<i>S. Gehrig,</i> <i>S. Ramos,</i> <i>P. Pinggera,</i> <i>U. Franke</i>	Detecting Small Road Hazards – A Must for Self-Driving Vehicles	425
<i>J. Imbsweiler,</i> <i>M. Ruesch,</i> <i>R. Palyafári,</i> <i>B. Deml,</i> <i>F. Puente León</i>	Entwicklung einer Beobachtungsmethode von Verhaltens- strömen in kooperativen Situationen im innerstädtischen Verkehr	439
<i>M. Berk,</i> <i>H.-M. Kroll,</i> <i>O. Schubert,</i> <i>B. Buschardt,</i> <i>D. Straub</i>	Zuverlässigkeitsanalyse umfelderfassender Sensorik – Eine stochastische Methodik zur Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen am Beispiel von LiDAR Sensoren	455

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,

Fahrerassistenzsysteme und insbesondere automatisiertes Fahren definieren die Mobilität der Zukunft in erheblichem Maße. Zahlreiche Systeme zur Abstandsregelung oder Spurführung auf der Autobahn und in urbanen Gebieten sind heute fest im Markt etabliert. Studien belegen, dass durch die Einführung der Systeme nicht nur der Fahrkomfort, sondern vor allem die Sicherheit des Fahrers und seiner Umgebung deutlich gesteigert wird.

Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren – quo vadis? Der Automatisierungsgrad nimmt in nahezu allen Fahrzeugklassen stetig zu. Systeme zur Längs- und Querregelung werden verstärkt kombiniert, um eine maximale Fahrerentlastung bei permanenter Verfügbarkeit zu gewährleisten. Dafür werden im Rahmen von aktuellen Entwicklungstrends sowohl existierende Fahrerassistenzsysteme weiterentwickelt als auch automatische Fahrfunktionen erforscht. Dabei ist die Kundenakzeptanz ein zentraler Schlüssel für den Erfolg solcher Systeme. Die daraus resultierenden Aufgaben sind von zahlreichen Herausforderungen geprägt. Insbesondere sind dabei zu nennen:

- Wie geht es weiter in den Bereichen Sensortechnologie, Umfeldwahrnehmung sowie Situationsinterpretation als auch Trajektorienplanung?
- Welche Kundenfunktionen und Geschäftsfelder ergeben sich aus der Weiterentwicklung heutiger Assistenzsysteme?
- Wie können zukünftige Systeme abgesichert werden – und wie sicher müssen sie sein? Wie kann der Übergang zum automatisierten Fahren beherrschbar gestaltet werden?

Wir laden herzlich ein, auf der traditionsreichen VDI/VW-Gemeinschaftstagung 2016 mit Ihnen über Ihre aktuellen Themen und Trends für Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren zu diskutieren. Ebenfalls wird die Tagung erneut durch den „Jahrmarkt der Innovationen“ von jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus der Forschung und Industrie ergänzt.

Wir freuen uns auf den Austausch und ein Wiedersehen mit Ihnen in Wolfsburg.

Im Namen des Programmausschusses

Prof. Dr.-Ing. Thomas Form

Vorsitzender des Programmausschusses

Neue Anforderungen an Testverfahren und Integrationstools für automatisiertes Fahren

Prof. Dr. **Hermann Winner**, Dipl.-Ing. **Walther Wachenfeld**,
Philip Junietz, M.Sc.,
Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Kurzfassung

Mit automatisiertem Fahren ohne Überwachung betritt die Automobilindustrie nicht nur funktional Neuland, sondern in besonderem Maße bei der Absicherung. Selbst die ausgiebigsten Fahrerproben können keinen statistischen Nachweis der Sicherheit erbringen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, alternative Validierungstechniken einzusetzen. Diese sind im Grundsatz schon bekannt, allerdings fehlen für die Anwendung der Konzepte noch viele Grundlagen und vor allem Daten aus dem Feld. Damit gewinnen Verfahren, die diese Daten aus Fahrerproben und Feldeinsatz gewinnen, eine hohe Bedeutung für die zukünftige Sicherheitszertifizierung als Grundlage für die Freigabe.

1. Problemstellung Absicherung von automatisiertem Fahren

Automatisiertes Fahren ohne Überwachung, also Stufe drei oder höher auf den Definitionsskalen der BASt [1], des VDA [2], der NHTSA [3] und der SAE [4], stellt neue Herausforderungen an die Absicherung. Zwar kann dafür auf einige Grundlagen aus der Absicherung der Fahrfunktionen zu den Automatisierungsstufen 1 und 2 zurückgegriffen werden. Allerdings besitzen diese zu dem zukünftigen höher automatisierten Fahrfunktionen erhebliche Unterschiede.

Zu der Klasse der kontinuierlich unterstützenden Systeme der Längsführung (z.B. Adaptive Cruise Control), der Querführung (z.B. Lane Keeping Assist) oder deren Kombination besteht der Hauptunterschied, dass deren Funktionsauslegung auf „harte“ und abrupte Eingriffe verzichtet. Durch die Vorhersehbarkeit und geringe Intensität der Reaktion oder auch Nicht-Reaktion bleibt der Fahrer jederzeit in der Lage, das System zu übersteuern. Ergänzt wird dies durch Übernahmeaufforderungen bei Erreichen von Systemgrenzen, so dass mit Übernahmezeiten im Bereich einer Sekunde durch Systemgrenzen bedingte gefährliche Zustände vermieden werden können. In der Klasse der eingreifenden Systeme, hier vor allem die automatischen Notbremssysteme in ihren verschiedenen Ausführungen, ist der Systemeingriff zwar „hart“, wenn die letzte Reaktionsstufe erreicht wird. Dieser letzten Stufe sind allerdings deutliche Vorwarn- und Vorreaktionsstufen vorgeschaltet, so dass der Einsatz der harten

Stufe sehr selten erfolgt und der Fahrer zumeist von sich aus auf die Vorstufen reagiert hat, bspw. durch Ausweichen oder Bremsbetätigung. Neben der Vorbedingung des Durchlaufens der Reaktionsvorstufen muss eine sehr hohe Konfidenz der Signalverarbeitung dahingegen erreicht sein, dass die Situation tatsächlich gefährlich ist. Im Zweifel wird auf die Auslösung der harten Reaktion verzichtet. Die primäre Sicherheitsauslegung der Systeme beider Klassen ist auf deren Kontrollierbarkeit ausgelegt, auch wenn diese Ausrichtung zu einer Reduktion der Funktionalität und des Nutzens führt. Entsprechung steht für die Absicherung der Nachweis der Kontrollierbarkeit im Vordergrund. Die Absicherung der Funktionsqualität dient „nur“ der Einhaltung des möglichst großen Nutzens für den Endkunden und bei eingreifenden Systemen noch zusätzlich der Einhaltung von Funktionstests für Verbraucherorganisationen (z.B. EURO-NCAP) und bei Lkw der Zulassungsvorschriften. Zur Auslegung von Schwellwerten für eingreifende Systeme erfolgen allerdings auch ausgedehnte Fahrerproben mit Datenaufzeichnungen [5, 6]. Anhand dieser Daten können die Auslösealgorithmen optimiert und insbesondere die Zahl der Falschauslösungen minimiert werden, ohne dabei eine Vielzahl an ausbleibenden Reaktionen zu verursachen. Aber letztlich gilt eine Nichtauslösung für eingreifende Systeme als sicherer Zustand, da gegenüber dem bisherigen Funktionsniveau keine Verschlechterung erfolgt. Diese Option steht nichtüberwachtem automatisierten Fahren nicht zur Verfügung, genau so wenig wie die Option nur bis zu einer bestimmten Komfortgrenze zu agieren. Automatisiertes Fahren ohne Fahrerüberwachung verlangt zu jedem Zeitpunkt eine Entscheidung, die bei Bedarf die Grenzen der Fahrphysik auszuschöpfen hat. Zwar bleiben Fragen der Kontrollierbarkeit von Übergaben an und Übernahmen vom „automatischen Fahrer“ weiterhin aktuell und Gegenstand der Absicherung. Aber die Absicherungsfrage verschiebt sich dahin, dass eine Sicherheit des automatischen Fahrens nachzuweisen ist, die im Vergleich zum heutigen Zustand akzeptiert wird.

2. Referenzen der Sicherheit

Als sicher wird ein Zustand angesehen, wenn das Risiko unterhalb des akzeptierten Risikos liegt. Risiko fasst die Auftretenshäufigkeit und den auftretenden Schaden zusammen. Lässt sich dieser auch über verschiedene Schadensklassen hinweg beziffern, wird das Risiko üblicherweise mit dem Produkt aus relativer Häufigkeit und Schaden definiert. Wo dies nicht möglich ist, lässt sich nur die (relative) Häufigkeit des Auftretens von Fällen der jeweiligen Schadensklasse angeben. Zwar gibt es aus der Versicherungswirtschaft monetäre Schadenswerte für unterschiedliche Schadenskategorien, die auch zur volkswirtschaftlichen Betrachtung von Unfallschäden herangezogen werden [1], aber wegen der besonderen Bedeutung des Schutzes des Lebens und der körperlichen Unversehrtheit (vgl. das Artikel 2 (2)

Grundgesetz) sind Verrechnungen mit Sachkosten gesellschaftlich nicht konsensfähig. Für das absolute Risiko eines Todesfalls wurde 1980 die Einheit Mikromort (μM) vorgeschlagen, die eine Todesfallwahrscheinlichkeit von 1 zu einer Million beschreibt.

Neben der Unterscheidung in Schadensklassen ist der Bezug für die relative Häufigkeit zu differenzieren. Zum einen kann eine zeitliche Betrachtung erfolgen, also mit dem Zeitraum, in dem sich eine Person im Straßenverkehr aufhält (exposure time). Ein solches Risiko lässt sich mit anderen zeitbezogenen Maßen vergleichen, wie bspw. der minimalen endogenen Mortalität, die nach der Norm EN50126 auf $200 \mu\text{M/a}$ festgelegt wurde. Auf heutige Sterbetafeln umgerechnet läge der Wert auf etwa einem Drittel davon. Auf die Stunde umgerechnet ergeben sich daraus Werte von $2,3 \cdot 10^{-2} \mu\text{M/h}$ bzw. $0,8 \cdot 10^{-2} \mu\text{M/h}$. Aus der mittleren Sterblichkeit und der Lebenserwartung berechnen sich Werte von $1,1 \mu\text{M/h}$ bzw. $1,3 \mu\text{M/h}$.

Allerdings ist die Aufenthaltszeit im Verkehrsraum weder bekannt noch ist es der Zweck, Zeit dort zu verbringen. Daher liegt es nahe, einen Transportbezug herzustellen. Dieser kann die Personenverkehrsarbeit sein, gemessen in der Einheit Personenkilometer (pkm).

Tabelle 1: Übersicht Personenkilometer pro Todesfall für verschiedene Verkehrsträger [2]

Verkehrsträger	Personenkilometer pro Todesfall
Motorrad	30 pkm/ μM
Pkw	500 pkm/ μM
ÖPNV	6 pkm/ μM
Luftfahrt	300 pkm/ μM

Tabelle 1 zeigt die Werte für verschiedene Verkehrsträger an, die zwischen 30 (Motorrad) und 300.000 pkm/ μM (Luftfahrt) liegen. Für Pkw-Insassen ergibt sich ein Wert von 500 pkm/ μM . Da aber Pkw-Insassen besser geschützt sind als bspw. auch vom Unfall betroffene Fußgänger oder Radfahrer, wird damit nur ein Teil des Risikos adressiert. Als nächste Größe könnte die Zahl der Opfer pro Fahrstrecke des Verkehrsmittels als Risikovergleichsmaß dienen. Hier finden sich in der Unfallstatistik zu 2013 für Deutschland für Kraftfahrzeuge ein Wert von 4,6 M/Mrd. km (und auf Autobahnen von 1,9 M/Mrd. km, s. Tabelle 2) [3]. Dieser Bezug erscheint als Vergleichsmaß gut geeignet, wenn die automatisiert fahrenden Fahrzeuge in gleicher Weise eingesetzt werden wie die von Menschen gefahrenen. Ein Autobahn-Chauffeur, der ausschließlich auf Autobahnen genutzt werden kann, hat sich daher mit der Messlatte der Unfallopfer pro Autobahnfahrstrecke messen zu lassen. Schwieriger ist die

Betrachtung bei Fahrzeugen, die automatisiert fahrend neue Mobilitätsdienstleistungen erbringen, weil bei ihnen keine Vorgängerrisiken als Referenz vorliegen. Sucht man für die Absicherung Sicherheitszielwerte, so erscheint die Zahl der Opfer korrekt, die durch Einsatz der neuen Technik verursacht werden. Trotzdem aber sollte man für die Sicherheitsleistung nicht diesen Kennwert heranziehen, sondern die Zahl der Unfälle pro Fahrstrecke (für die jeweilige Unfallfolgenkategorie), da die Zahl der Opfer der Unfälle von vielen Umständen abhängt, die technisch nicht relevant sind, wie bspw. die Zahl der Insassen. Außerdem gibt es zunächst keine bessere Annahme, als die heutigen Vergleichswerte von Opfern pro Unfall als konstant anzusehen. Liegen neue Werte dafür vor, so lassen sich diese über einen Umrechnungsfaktor für eine Neudefinition der Referenzstrecke pro Unfall berücksichtigen. Festzuhalten bleiben Werte für die Referenzstrecken zwischen zwei Unfällen mit Todesfolge zwischen 10^8 und 10^9 km. Unfälle mit Personenschäden ereignen sich etwa 50 Mal häufiger.

Tabelle 2 Unfallkenngrößen 2013 [3]

Kategorie	Anzahl Verunglückte	Anzahl Getötete
bei Verkehrsunfällen	377481	3339
je 1000 Kfz	6,9	0,1
je 1 Mrd. Kfz-Kilometer	520	4,6
davon auf Autobahnen	132	1,9
je 1000 Unfälle mit Personenschaden	1297	11,5
auf Autobahnen	1606	23,2
je 1 Mil. Einwohner	4681	41
Benutzer von Pkw		1588
Benutzer von Güterkraftfahrzeugen		148
Benutzer von Motorräder		568
Benutzer von Fahrrädern		3554
Fußgänger		557

3. Statistischer Nachweis von Sicherheit

Mit den im vorherigen Abschnitt abgeleiteten Referenzwerten für die Strecke zwischen zwei Unfällen einer bestimmten Kategorie lässt sich unter bestimmten Annahmen errechnen, wie groß die Strecke für einen statistischen Nachweis sein müsste. Auf die Herleitung der Ergebnisse sei auf [4] und [5] verwiesen. Unter den Annahmen, dass die Strecke automatisierter Fahrzeuge repräsentativ für den Einsatz gewählt ist und die Unfälle mit einem konstantem Erwartungswert unabhängig voneinander geschehen (\Rightarrow Poisson-Verteilung), so lässt sich ein etwa zwanzigfacher Wert für die Nachweisstrecke bestimmen, wenn das System nur halb so hohem Risiko wie die Referenz besitzt. Somit wachsen die für eine statistische Absicherung erforderlichen Strecken auf Werte von über 10^8 km (bei Unfällen mit Verletzten) und 10^{10} km für Unfälle auf Autobahnen mit Todesfolge. Heute benötigen für die letztgenannte Strecke 2 Millionen Pkw ein Jahr (bei 5000 km Autobahn pro Jahr und Pkw), eine Zahl, die etwa der Hälfte der in Deutschland pro Jahr neu zugelassenen Pkw entspricht!

Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass ein statistischer Nachweis der Sicherheit nicht vor einer Markteinführung erfolgen kann, wohl aber bei einer laufenden Beobachtung einer hinreichend großen Anzahl von im Straßenverkehr genutzten Fahrzeugen im Nachhinein.

Aber warum scheint denn überhaupt dieser statistische Nachweis erforderlich? Schließlich wurden in der Vergangenheit erfolgreich Innovationen in den Verkehr gebracht, ohne diese über solche Vergleichsstrecken zu testen. Und in der Luftfahrt sind noch viel größere Referenzstrecken üblich, ohne dass die Idee diskutiert wird, diese vorab solange zu testen. Warum sollte sich beim automatisierten Fahren hieran etwas ändern?

4. Die Wissenslücke des automatisierten Fahrens

In der kombinierten Darstellung des Drei-Ebenen-Modells für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen nach Rasmussen [6] und der Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges [7] in Bild 1 entspricht diese Absicherung den grün/dunkel hinterlegten Elementen. Getestet werden das Fahrzeug und dessen Verhalten in Längs- und Querrichtung; dabei werden nicht das Verhalten oder die Fähigkeiten des zukünftigen Fahrers getestet, sondern ausschließlich die Möglichkeiten für den Testfahrer, mit Lenk- und Beschleunigungseingriffen das Fahrzeug in den Testfällen zu kontrollieren. Deshalb schneidet die grüne/dunkle Box nur geringfügig den Bereich, der für den Fahrer steht.

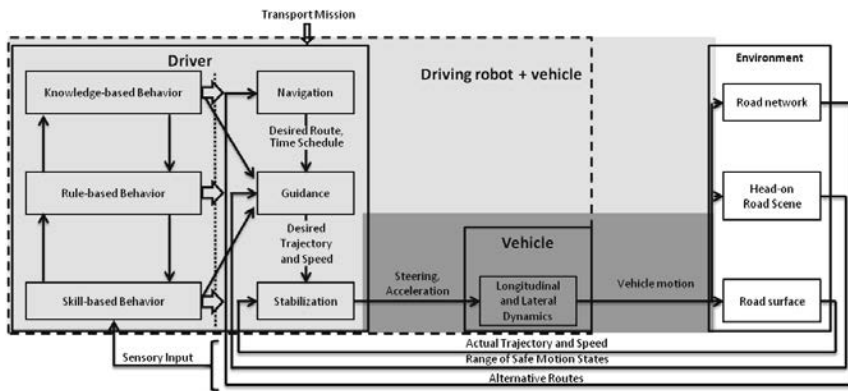


Bild 1: Drei-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen nach Rasmussen und Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges basierend auf [6, 7]

Für die Automatisierung ohne Fahrerüberwachung fallen nun die Fähigkeiten des Fahrers weg, er fungiert auch nicht mehr als Rückfallebene. Die Fahraufgabe, also das Navigieren, Bahnführen und Stabilisieren/Regeln, wird vom Fahrroboter übernommen. Das bedeutet, für das automatisierte Fahren gibt es keinen Test der Kontrollierbarkeit, sondern ausschließlich den Test der Funktionalität eines technischen Systems. Auf der einen Seite erleichtert es den Test, denn die Unsicherheiten und individuellen Unterschiede des Menschen sind nicht mehr durch den Test abzudecken. Auf der anderen Seite entfällt die Möglichkeit, von heute eingesetzten Testfällen und Testfahrern auf weitere Anwendungsfälle zu schließen. Für das System entfällt der Mensch, der im Allgemeinen fertigkeitstestbasiert, regelbasiert sowie wissensbasiert handelt. Bei der Absicherung des autonomen Systems ergibt sich die Sicherheit nun ausschließlich aus dem technischen System Fahrroboter und Fahrzeug (gelbes/helles Feld von Bild 1), die es nachzuweisen gilt.

Aus Bild 1 wird ersichtlich, dass dafür zum einen die Aufgabenquantität steigt, die es abzusichern gilt: Der Fahrroboter wird für die unterschiedlichsten Einsatzgebiete wie Navigieren, Bahnführen und Stabilisieren/Regeln benötigt. Diese Aufgabenquantität wird besonders im öffentlichen Raum ohne Zugangsbeschränkung eine Herausforderung. Auf der anderen Seite ändert sich die Aufgabenqualität des technischen Systems. Aktuelle Systeme sind lediglich ausführend bzw. ständig durch den Menschen überwacht, für das autonom agierende System muss die Ausführung einer Aufgabe jedoch den Ansprüchen an die zu Beginn diskutierte Sicherheit genügen.

Was ist außer den qualitativen Modellen über die Fahraufgabe bekannt? Quantitative Modelle über Standardszenarien wie Folgen im gebundenen Straßenverkehr, Kreuzungsüberquerungen oder Fahrstreifenwechsel liegen vor. [8, 9] Aber diese adressieren nicht die seltenen Unfälle, zumal diese zumeist von lokalen oder temporären Umständen abhängen, die wiederum nicht einer verallgemeinerbaren Statistik zugutekommen. Auch die Zuverlässigkeitsmodelle (z.B. [10]) erlauben quantitative Aussagen nur mit großer Unsicherheit und besitzen eher deskriptive statt prädiktive Anwendbarkeit. Es bleiben dann noch die Aufzeichnungen über die geschehenen Unfälle, sei es als Aufzeichnungen der Polizei oder als In-Depth-Analyse in speziellen Projektvorhaben wie die GIDAS in Deutschland.

5. Modell für die Sicherheitsvorhersage

Für mechanische oder elektrische Komponenten finden sich aus Erfahrung oder speziellen Laborversuchen heraus Versagensmodelle, woraus dann eine Vorhersage getroffen wird, wie lange und unter welchen Voraussetzungen diese Komponenten den Anforderungen gerecht werden können. Aber für Aufgaben, die bisher nur der Mensch durchgeführt hat, wie das Autofahren, fehlen diese Modelle. Letztendlich wird nur das unerwünschte Ergebnis des Versagens dokumentiert, die Unfälle selbst. In dem folgenden Ansatz soll dieses Versagen auf eine stark vereinfachte Weise modelliert werden.

Ein Schlüsselement für dieses Modell ist das *kritische Szenario*, das hier wie folgt definiert wird:

Ein in Zeitdauer oder Strecke begrenzter Abschnitt, für den die Begleitumstände wie das Verkehrsumfeld, die Absichten und die Trajektorien der für die Kritikalität relevanten Akteure bekannt sind. Die Kritikalität wird über eine zunächst beliebige, aber für die Instanziierung des Modells notwendige Metrik ermittelt und überschreitet bei kritischen Szenarien einen Schwellwert.

Die Zahl der durch menschliche Fahrer (Index hd) verursachten Unfälle $n_{ac,hd}$ wird als Produkt aus der Zahl der kritischen Szenarien $n_{crit,hd}$, die der Fahrer erlebt, und der Übergangswahrscheinlichkeit $\rho_{tr,hd}$ zu einem Unfall modelliert:

$$n_{ac,hd} = n_{crit,hd} \cdot \rho_{tr,hd} \quad (1)$$

Auf die Zahl der kritischen Szenarien kann sowohl ein Fahrer (Index hd, ego) mit seinem Fahrverhalten $B_{hd,ego}$ selbst einwirken als auch das Auftreten von ihm nicht beeinflussbarer Begleitumstände (E_{te} , exposure of circumstances for potential hazards in traffic environment) kann ursächlich sein: $n_{crit,hd} = f_{crit}(B_{hd,ego}, E_{te})$. Die Übergangswahrscheinlichkeit $\rho_{tr,hd}$

hängt ebenfalls partiell vom momentanen Können $P_{hd,ego}$ des Fahrers ab und den Fähigkeiten anderer Verkehrsteilnehmer (Index tp): $\rho_{tr,hd} = f_{tr}(P_{hd,ego}, P_{tp})$.

Die Verknüpfung sowohl zur Entstehung von kritischen Szenarien als auch zum Übergang in den tatsächlichen Unfall ist zumeist eine multikausale Verkettung von Umständen, die auch mit dem Schweizer-Käse-Modell [11] beschrieben wird, s. Bild 2. Zwar besitzt jede Scheibe eine Zahl von Löchern, die die Entwicklung eines Schadensfalls ermöglichen. Aber nur wenn alle Scheiben an der gleichen Stelle ein Loch besitzen und dieses dann tatsächlich „gefunden“ wird, kommt es zum Unfall. In allen anderen Fällen bleibt es ungeschehen bei einem Beinaheunfall. Anders als im Straßenverkehr werden kritischen Szenarien in der Luftfahrt sowie im Gesundheitswesen nahezu lückenlos aufgezeichnet (Critical Incident Reporting System (CIRS)), woraus sich immer wieder Verbesserungen der Sicherheit ableiten. Im Straßenverkehr bilden die kritischen Szenarien ohne Unfallfolge eine „dunkle Materie“, wie in Bild 3 skizziert. Würde man diese kennen, so könnte man schon viel früher prüfen, in wie weit das automatisierte Fahren ebenfalls in diese kritischen Szenarien geraten würde und weiterhin ließe sich aus der dann für menschliche Fahrer ermittelbaren Übergangswahrscheinlichkeit das notwendige Maß der Kontrollierbarkeit in kritischen Situationen als Testbenchmark definieren. Im Bild des Schweizer-Käse-Modells würde das bedeuten, dass sich damit die für die Fahrzeugführung bestimmenden Scheiben einzeln festlegen lassen würden.

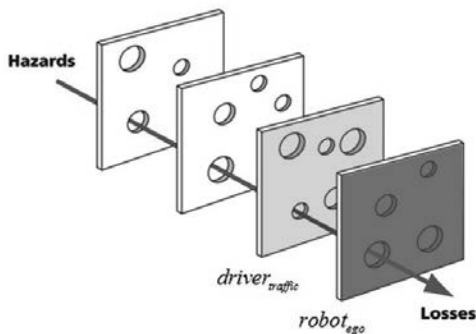


Bild 2: Schweizer-Käse-Modell [11]

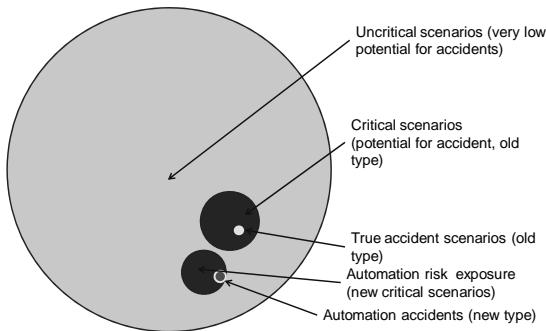


Bild 3: „Dunkle Materie“ Problem [12]

Dieses Unfallvorhersage-Modell könnte für automatisiertes Fahren (Index ad statt hd) übernommen werden, wenn die automatisierten Fahrzeuge die von Menschen geführten Fahrzeuge direkt ersetzen würden, ohne erkennbare Änderung des Verhaltens. Dies ist allerdings nicht zu erwarten. Zum einen wird durch ein defensiveres und die Verkehrsregeln einhalten-des Fahren mehr Sicherheit erwartet, so dass allein deshalb eine Veränderung anzunehmen ist. Von den meisten Entwicklern wird dabei angenommen, dass die Zahl der kritischen Szenarien alten Typs (Index oT) $n_{crit,ad,oT}$ mit der Automatisierung stark abnimmt wie bspw. zu dichtes Auffahren. Zum anderen verändern sich die Grundlagen für das Fahren. Die maschinelle Wahrnehmung baut auf andere Prinzipien auf, die Verhaltensgenerierung entspricht nicht den menschlichen Regeln und das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer wird sich gegenüber den automatisierten Fahrzeugen verändern, wie schon von den Feldversuchen von Google bekannt [13]. Daher ist mit kritischen Szenarien neuen Typs $n_{crit,ad,nT}$ zu rechnen, die ihrerseits auch zu $n_{ac,ad,nT}$ Unfällen des neuen Typs führen.

Daraus ergeben sich dann die folgenden Zusammenhänge:

$$n_{ac,ad} = n_{crit,ad,oT} + n_{crit,ad,nT} \quad (2)$$

$$n_{ac,ad,oT} = n_{crit,ad,oT} \cdot \rho_{tr,ad,oT}; n_{crit,ad,oT} = f_{crit}(B_{ad,ego}, E_{te,oT}); \rho_{tr,ad} = f_{tr}(P_{ad,ego,oT}, P_{te,oT}) \quad (3)$$

$$n_{ac,ad,nT} = n_{crit,ad,nT} \cdot \rho_{tr,ad,nT}; n_{crit,ad,nT} = f_{crit}(B_{ad,ego}, E_{te,nT}); \rho_{tr,ad} = f_{tr}(P_{ad,ego,nT}, P_{te,nT}) \quad (4)$$

Für das Bild des Schweizer-Käse-Modells bedeutet dies, dass nun einzelne Scheiben auszu-tauschen sind, für die neu die „Durchlasswahrscheinlichkeit“ bestimmt werden müsste. Bezogen auf das Bild der dunklen Materie ergibt sich die Erwartung, dass sich die Menge der kritischen Szenarien (dunkle Materie) alten Typs verringern wird und hoffentlich durch nicht diese Reduktion kompensierende Übergangswahrscheinlichkeiten damit auch die Zahl der Unfälle alten Typs. Jedoch kommen die kritischen Szenarien neuen Typs hinzu, die ihrerseits

mit endlichen Übergangswahrscheinlichkeiten neue Risiken bergen, die so genannten Automatisierungsrisiken.

Das heißt, es reicht nicht, die Fehler des menschlichen Fahrers möglichst weit zu eliminieren, sondern es ist auch eine Abschätzung für neue Fehler zu finden. Für die Absicherungsstrategie des automatisierten Fahrens können die Gleichungen eine Richtung vorgeben:

Es sind die relevanten kritischen Szenarien zu finden und dann dafür die Übergangswahrscheinlichkeit, oder anders ausgedrückt, die Kontrollierbarkeit $C = 1 - \rho_{tr}$ zu bestimmen. Offensichtlich trifft die Annahme von einem kritischen Szenario und nur einer Übergangswahrscheinlichkeit für die vielfältigen Unfallvarianten nicht zu. Somit ist dieser Ansatz auf alle Unfall- und Szenariotypen einzeln auszudehnen und vermutlich auch noch eine Übergangswahrscheinlichkeit in abhängig der erreichten Kritikalität eines kritischen Szenarios in Bezug auf die zu unterscheidenden Unfallschwereklassen zu modellieren. Vereinfacht ausgedrückt reduziert sich der Nachweis der Sicherheit auf den Beweis, dass $n_{ac,ad} \leq n_{ac,hd}$ ist. Aber dazu muss zur Problemlösung die bisher dunklen Materie „erhellt“ werden, das heißt, dass als Testfälle möglichst alle kritischen Szenarien gefunden werden, die dann überprüft werden, inwieweit das automatisierten Fahren diesen Szenarien exponiert ist und wie gut es diese zu kontrollieren vermag.

6. Abgeleitete Einführungsstrategien

Wie sich aus dem obigen Unfallvorhersagemodell intuitiv ablesen lässt, führt eine Vereinfachung der Fahraufgabe sowohl zu einem Absinken der Zahl kritischer Szenarien als auch zu einer höheren Kontrollierbarkeit durch den Fahrroboter. Die Fahraufgabe wird vereinfacht durch

- Reduktion von notwendigen Handlungsalternativen,
- Verringerung der Fahrgeschwindigkeit,
- Ausübung auf einfach strukturierte Verkehrsbereiche wie bspw. Autobahnen,
- Ausübung nur in einem aufwändig vorher getestetem Gebiet und ausgedünntem Straßennetz.

Durch die Kombination einiger dieser Maßnahmen für das Systemdesign lässt sich der Testaufwand schon erheblich verkleinern. Ob dann die Sicherheitsziele tatsächlich erreicht werden, lässt sich erst dann sagen, wenn die Testfälle und die Testaussagen von der Praxis belegt werden.

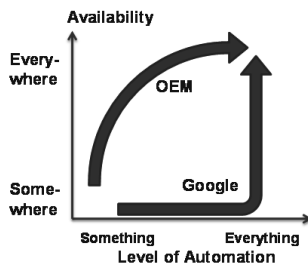


Bild 4: Entwicklungspfade zum automatisierten Fahren [12]

In Bild 4 finden sich die beiden heute dominierenden Entwicklungspfade wieder. Während die meisten der europäischen Fahrzeughersteller den Automatisierungsgrad evolutionär steigern und dabei eine möglichst große Nutzungsbreite anstreben, fängt Google gleich mit fahrerlosem Fahren an, dieses aber nur in ausgewählten Gebieten. In beiden Ansätzen wird das Wissen, das für die zukünftigen autonomen Fahrzeuge für die Überall-Nutzung benötigt wird, evolutionär aufgebaut. Welcher Weg der erfolgreichere sein wird, wird die Zukunft zeigen, wobei auch eine parallele Evolution sinnvoll erscheint, wenn insbesondere unterschiedliche Geschäfts- und Mobilitätsmodelle verfolgt werden.

7. Potenzielle Validierungskonzepte

Da eine statistische Validierung vor der Markteinführung als unmöglich anzusehen ist, müssen alternative Konzepte für die Validierung gefunden werden. Im Folgenden werden aus [14] folgende mögliche Vorgehensweisen zitiert:

Wiederverwenden freigegebener Funktionen

Die erste und einfachste Möglichkeit für die Validierung ist das Wiederverwenden von bereits freigegebenen Funktionen. Ein erweiterter Funktionsumfang ist jedoch neu abzusichern; je kleiner dabei der neue Bereich ist, desto geringer wird der Aufwand. Die im vorherigen Abschnitt genannte Evolution bietet dafür sehr gute Grundlagen

Beschleunigung der Validierung

Trotz des evolutionären Ansatzes sind dennoch neue Funktionen abzusichern. Um dies zu beschleunigen, sind prinzipiell zwei Stellschrauben vorhanden: Erstens kann das Was und zweitens das Wie verändert werden. Welche Testfälle sind notwendigerweise zu überprüfen und womit werden diese Tests durchgeführt?

Die Ansätze von Glauner [15] und Eckstein [16] beschreiben dafür das Identifizieren von relevanten bzw. kritischen Situationen im öffentlichen Straßenverkehr: Basierend auf zuvor definierten Ereignisklassen werden während der Testfahrten oder groß angelegten Feldstudien potenziell kritische Situationen identifiziert. Diese kritischen Situationen fließen in die Testfallgenerierung ein, sodass Situationen geringer Kritikalität gestrichen werden können. Dieser Raffung liegt die Annahme zugrunde, dass Situationen, die weniger kritisch sind, durch kritische Situationen abgedeckt werden. Dabei bleibt aktuell als ungelöste Aufgabe die Suche nach einem validen Risikomaß, das im ersten Schritt eine Bewertung und im zweiten Schritt die Auswahl von kritischen Situationen ermöglicht. Dieser Ansatz folgt genau dem Bild des „Erhellens“ der dunklen Materie.

Ein anderes Vorgehen zur Raffung von Testfällen bieten Schuldt et al. [17]: Vorgeschlagen wird eine generische Testfallgenerierung, bei der Verfahren des Black-Box-Testings und der Kombinatorik eingesetzt werden, um die Einflussfaktoren auf die vom System ausgehende Sicherheit möglichst ausreichend abzudecken und gleichzeitig redundanzarm und effizient zu sein. Dieser Ansatz basiert auf statistischen Betrachtungen ohne Wissen und Erfahrung über das Testobjekt, aber hat dennoch das Potenzial, die notwendigen Testfälle zu reduzieren.

Der Ansatz beschrieben von Tatar und Mauss [18] ist ebenfalls für Black-Box-Testing geeignet: zur Generierung von Testfällen wird eine Optimierung eingesetzt. Dabei werden die Eingangsgrößen einer XiL-Simulation so variiert, dass die zu definierende Bewertungsfunktion des Tests optimiert wird. Trotz der Herausforderung der validen XiL-Simulation sowie der benötigten Bewertungsfunktion liefert dieser Ansatz die Möglichkeit, die Testfälle auf die als relevant bewerteten zu fokussieren.

Ein vierter theoretischer Ansatz ist der Einsatz und der Test eines Sicherheitskonzepts mithilfe von formalen Methoden [19]. Ähnlich wie für den Menschen als Überwacher und Teil des Sicherheitskonzepts von aktuellen Fahrzeugen angenommen, könnte ein nachgewiesen sicheres Sicherheitskonzept den Test der Gesamtfunktionalität des Fahrzeugs in der vollständigen Repräsentativität überflüssig machen. Somit wäre eine Raffung der Testfälle möglich. Neben der Möglichkeit während der Testfallgenerierung die Testfälle zu raffen, besitzt die Testdurchführung ebenfalls Potenzial, die Freigabe zu beschleunigen. Wird jedoch von der Realfahrt abgewichen und ein anderes Testwerkzeug für die Testdurchführung gewählt, geht damit immer eine Vereinfachung einher. Dies wird anhand von Bild 5 genauer beschrieben.

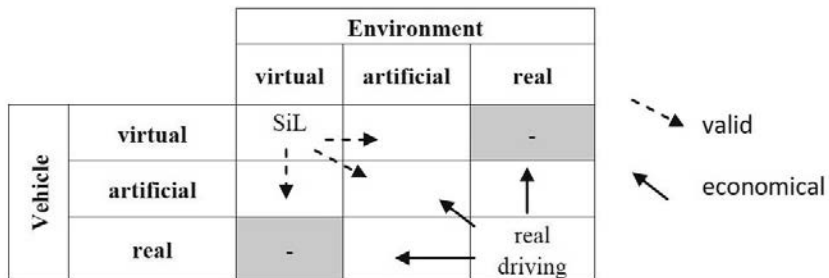


Bild 5: Einteilung von Testwerkzeugen für den Test von autonomen Fahrzeugen [5]

Bild 5 unterteilt die Testwerkzeuge in neun Klassen, die sich danach unterscheiden, wie das Fahrzeug bzw. das Umfeld dargestellt werden. Der Insasse wird bei dieser Darstellung dem Fahrzeug zugeordnet, da er sich im Fahrzeug befindet und nicht aktiv in die autonome Fahrt eingreift.

Die Realfahrt bildet sowohl das Umfeld als auch das Fahrzeug real ab. Dementsprechend besteht während dieser Tests die Gefahr von realen Unfällen und deren Auswirkungen. Das Umfeld ist nicht kontrolliert, sodass Testsituationen basierend auf dem Zufall der Realität entstehen; dementsprechend ist die Reproduzierbarkeit für komplexe Situationen mit anderen Verkehrsteilnehmern nicht gegeben. Dieses Testwerkzeug kann frühestens mit ersten straßentauglichen Prototypen eingesetzt werden und erfolgt somit am Ende des Entwicklungsprozesses.

Eine Alternative ist, reale Fahrzeuge in einem künstlichen Umfeld zu testen: Dies entspricht der Fahrt auf einem Testfeld, denn dort sind zum einen Situationen künstlich hergestellt und zum anderen besitzen die „Verkehrsteilnehmer“ das Bewusstsein, sich in einem Test zu befinden. Zugunsten der Sicherheit, Variierbarkeit, Beobachtbarkeit sowie der Reproduzierbarkeit wird die Realität vereinfacht. Aus ökonomischen Gesichtspunkten werden zwar Testfälle gezielt getestet und müssen nicht wie in Realfahrten per Zufall erfahren werden, jedoch kostet der Aufbau des Testfelds zusätzlichen zeitlichen wie finanziellen Aufwand.

Des Weiteren könnte sich ein künstliches Fahrzeug in realem Umfeld bewegen; künstlich bezieht sich in diesem Fall beispielsweise auf die Ausstattung des autonomen Fahrzeugs mit einem Überwacher, der die Möglichkeit hat, in die Fahraufgabe einzugreifen. Dies kann zum einen ein Testfahrer mit Lenkrad und Pedalerie sein oder aber ein technisches System, das aufgrund von leistungsfähigerer (Zusatz-)Sensorik dem Seriensystem überlegen ist. Werden

Komponenten künstlich dargestellt, leidet darunter die Realitätsnähe, jedoch wird an Sicherheit, Reproduzierbarkeit sowie Beobachtbarkeit gewonnen.

Neben der Möglichkeit, Umfeld und Fahrzeug künstlich zu gestalten, existieren Werkzeuge, die sich einer virtuellen Repräsentation in Form von Computersimulationen bedienen. Dabei sind die zwei Felder, die real und virtuell kombinieren, grau hinterlegt, da diese strenggenommen nicht existieren, denn Sensoren und Steller haben genau die Aufgabe der Wandlung zwischen virtuellen und realen Signalen. Ein realer Radarsensor kann kein virtuelles Umfeld sensieren und ein virtueller Wechselrichter kann keine reale Spannung erzeugen.

Was jedoch möglich ist, sind Kombinationen aus künstlichem und virtuellem Umfeld bzw. Fahrzeug: Als Beispiel dafür existieren unterschiedliche Konzepte von Vehicle-in-the-Loop (ViL). Um den Kreis aus Aktionen und Reaktionen von Umfeld und Fahrzeug zu schließen, werden reale Komponenten in der Simulation in Form von Modellen abgebildet. Dabei werden entweder die angesprochenen Sensoren bzw. Steller stimuliert, also künstlich angeregt; Beispiele hierfür sind simulationsbasierte Videos als Stimulanz für Kamerasysteme oder Rollenprüfstände als Stimulanz für Antriebssteller – oder die Testwerkzeuge simulieren direkt die Leistungssignale, wie zum Beispiel die elektromagnetische Welle und versuchen reale Effekte von Sensoren und Stellern in der Simulation mithilfe von Modellen darzustellen. Für weitere Informationen dazu siehe Bock [20] oder Hendricks [21]. Der beschriebene Einsatz von Modellen stellt die Aussagekraft dieser Testwerkzeuge in Frage. Um valide Aussagen mithilfe solcher Modelle zu erhalten, ist der Nachweis zu erbringen, dass diese Modelle keine unzulässigen Vereinfachungen beinhalten; unzulässig ist hier im Kontext der Funktion zu sehen und bedeutet, dass Abweichungen von der Realität nur unterhalb der Toleranzen der Funktion zulässig sind. Wenn jedoch diese Validität nachgewiesen wurde, erlaubt das Testwerkzeug eine größere Sicherheit bei der Testdurchführung, da sich Teile des Umfelds und das Fahrzeug nur noch in der virtuellen Welt begegnen. Aufgrund der virtuellen Komponenten sind diese Testwerkzeuge von einer größeren Variierbarkeit, Beobachtbarkeit und Reproduzierbarkeit gekennzeichnet. Aus ökonomischer Sicht besitzt dieses Testwerkzeug den Vorteil, das virtuelle Umfeld einfach zu variieren oder aber das Fahrzeug in unterschiedlichsten Varianten darzustellen. Von ökonomischem Nachteil könnte sich die Validierung der Modelle erweisen (siehe nachfolgend). Ein Vorteil dieses Testwerkzeugs ist die Möglichkeit, basierend auf dem simulierten Fahrzeug, bereits frühzeitig in der Entwicklung Tests durchzuführen.

Die letzte Stufe der Abstraktion repräsentiert die Kombination eines virtuellen Fahrzeugs und des virtuellen Umfelds: Das mit Software-in-the-Loop bezeichnete Testwerkzeug stellt dabei den geschlossenen Regelkreis durch die Modellierung relevanter Komponenten in der Simu-

lation dar. Anders als bei den Testwerkzeugen zuvor, ist die gesamte Testwelt virtuell. Die Tests sind sicher, variierbar, beobachtbar und reproduzierbar; außerdem besteht die Möglichkeit, dieses Werkzeug bereits frühzeitig in der Entwicklung einzusetzen. Den ökonomischen Vorteil bildet die Hardware-Unabhängigkeit, denn somit ist keine Verknüpfung an die Echtzeit mehr vorhanden. Die Ausführung der Tests wird rein durch Rechenleistung begrenzt; Simulationen können Tag und Nacht sowie massiv parallel erfolgen. Demgegenüber steht die geringere Realitätsnähe der virtuellen Testwelt und somit jedes einzelnen Modells: Nur wenn die Validität der eingesetzten Modelle nachgewiesen wurde, besitzen virtuelle Tests die Aussagekraft für eine Freigabe. Dementsprechend muss für die ökonomische Betrachtung von simulationsbasierten Verfahren vor allem die Validierung der Modelle betrachtet werden. Gerade dabei gibt es noch große Lücken, wie im nachfolgenden Abschnitt gezeigt wird.

Die gleiche Herausforderung existiert für den Einsatz von formalen Methoden. Mitsch [19] schreibt diesbezüglich: „We do (...) prove that collisions can never occur (as long as the robot system fits to the model).“ Das bedeutet, auch für formale Methoden bedingt der Realitätsgrad der eingesetzten Modelle die Aussagekraft der Ergebnisse. Eine besondere Herausforderung und somit im Fokus der Forschung steht beispielsweise die Formalisierung der Unsicherheiten von Sensoren oder der Eigenschaft von weiteren Verkehrsteilnehmern.

Die Diskussion der Testwerkzeuge zeigt das Potenzial, die Freigabe zu beschleunigen: Mit Hilfe von künstlich erzeugtem Umfeld und Fahrzeug können Testfälle gezielt aufgebaut und angefahren werden. Zusätzlich ermöglicht der virtuelle Ansatz, die Tests abhängig von der eingesetzten Rechenleistung zu beschleunigen und zu parallelisieren.

Die Diskussion zeigt aber auch, dass die Validität und somit die Aussagekraft der Tests mit Einführung von künstlichen und virtuellen Komponenten zur Herausforderung wird.

8. Die Validitätsherausforderung

Auch wenn im vorherigen Abschnitt die Möglichkeiten für eine Validierung automatisierten Fahrens vorgestellt wurden, müssen diese Instrumente ihre Validität nachweisen. Diese betrifft einerseits die Validität des Testkatalogs und andererseits die der verwendeten Modelle für XiL-Validierungen. Entsprechend dieser Einteilung werden die Validierungsherausforderungen getrennt diskutiert.

Validität des Testkatalogs

Einem Testkatalog wird die Validität verwehrt bleiben, wenn die dort enthaltenen Testfälle nicht die für im späteren Einsatz repräsentativen, kritischen Fälle abdecken oder die Beste-

henskriterien für die Tests nicht für den zukünftigen Einsatz gelten. Das Grundproblem für die Abdeckung ist die mannigfaltige Dimension des Szenarienraums. Neben einer Vielzahl von Straßeninfrastrukturbedingungen (Fahrbahngeometrie, -zustand, Bebauung am Straßenrand, Verkehrszeichentyp und -ort, Signalanlagen und deren Zustände) kommen vielfältige Wetterbedingungen (Sonnenstand, Niederschlag, Temperatur, Sichtweite) und unzählige Konstellationen der für ein Szenario relevanten Verkehrspartner (mit variablen Abständen, Geschwindigkeiten, Ausrichtungen, Absichten, Verhaltensweisen, bewegungsdynamischen Möglichkeiten) hinzu. Schon bei vorsichtigen Versuchen, die wichtigsten Einflussparameter vollfaktoriell für ausgewählte Szenarien zu variieren, erhält man die Erkenntnis, dass die Zahl jede Testmethodik überfordern wird, auch Software-in-the-Loop-Tests. Das heißt, man kommt nicht umhin, die Einflussparameter auf alternative Weise zu kombinieren. Monte-Carlo-Methoden können eine stochastisch erzeugte Testparameter-Untermenge generieren und dabei die Häufigkeiten der Parameter im Feld über eine dazu passende Verteilung repräsentieren. Hier besteht die Herausforderung, dass die Parameter nicht unabhängig voneinander sind, weshalb dann vorab sinnhafte Verknüpfungen erfolgen müssen. Grundsätzlich spricht nichts gegen ein solches Vorgehen, außer dass es bei einer „dichten“ Testfallgenerierung ebenfalls zu aufwändig werden wird wie das vollfaktorielle Vorgehen, bei einer „dünnen“ hingegen wichtige Fälle auslassen könnte.

Ein anderer Ansatz besteht in der Dekomposition der Tests auf die für einen Unfall möglichen Versagensursachen. Der Ansatz verbindet zum einen das Bild des Schweizer-Käse-Modells mit einer retrospektiven Beschreibung des Versagens bei einem Unfall nach Graab [22]. Dort wurden fünf Ebenen vorgestellt, die die verantwortliche Ursache für die Nichtverhinderung des Unfalls kategorisiert. (s. Bild 6) Diese können als Basis für eine Testfalldekomposition gesehen werden, so dass gezielt nur für die jeweiligen Ebenen relevanten Testfälle herausgesucht werden. Das Ergebnis ist nun nicht mehr ein binäres (Unfall vs. Nicht-Unfall), sondern es muss den Versagensfall in jeder Ebene nach getrennten Kriterien suchen, wobei nicht ausgeschlossen ist, mehrere Ebenen für einen Testfall zusammenzufassen. In der Wahl der Bestehenskriterien besteht die Gefahr, dass diese zu kritisch oder zu wenig kritisch ausgelegt werden. Tendenziell sollte aus Sicht der Autoren der kritische Fall vorgezogen werden und bei Nichtbestehen eine weitere Betrachtung der potenziellen Gefahren anhand von repräsentativen Gesamtszenarien erfolgen.

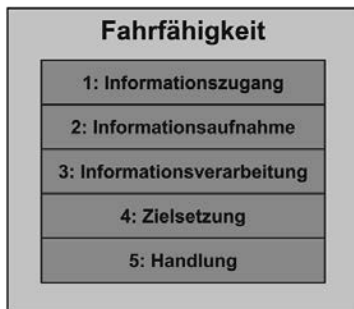


Bild 6: Dekompositionsebenen für die Testfallgenerierung

Trotz aller theoretischen Ansätze wird immer Zweifel darüber herrschen, ob der Testkatalog für eine Sicherheitszertifizierung vollständig und valide ist. Im Sinne einer Reifegradbestimmung des Testkatalogs könnten vergleichende Fahrerproben herangezogen werden. Als Maß für die Reife könnte die Anzahl der Überraschungen pro Erprobungsstrecke dienen. Als *Überraschung* ist ein Ereignis dann identifiziert, wenn das automatisierte Fahren einen nicht gewünschten Zustand erreicht hat, sei ein Zustand außerhalb der Spezifikation oder ein ungewünschter Zustand, der in den Spezifikationen bisher unberücksichtigt geblieben ist, und dieser im Testkatalog nicht vorgesehen ist. Das Vorgehen ähnelt der Verpflichtung, die in Kalifornien in der Regulierung der Testphase von automatisiertem Fahren vorgesehen ist. Dort muss über jede Übernahme der Fahrfunktion durch den Testfahrer öffentlich [23] berichtet werden. In den meisten Fällen sind die Übernahmen nicht abgedeckten Testfällen (und ggf. nicht abgedeckten Spezifikationen) zuzuordnen und somit nach der Definition Überraschungen, unabhängig davon, ob eine Gefahr davon ausging oder nicht. Die Aufnahme der Szenarien zu jeder Überraschung in den Testkatalog, sei es als Ganzes oder dekomponiert in Bestandteile, führt zu einer stetigen Verbesserung des Katalogs, wodurch die Zahl der Überraschungen pro Strecke in folgenden Fahrerproben abnehmen wird, wie in Bild 7 illustriert und von GoogleX in ähnlicher Weise auch so dokumentiert ist. Aus dem Verlauf der Fortschrittsreihe kann auf die Reife des Testkatalogs geschlossen werden und unter bestimmten, durchaus kritisch zu diskutierenden Annahmen auch auf das verbleibenden Risiko, wenn den Überraschungen aus den letzten Erprobungsabschnitten ein Risikowert zugeordnet werden kann. Neben den Fahrerproben mit der Zielfunktionalität kann das im Abschnitt 9 beschriebene VAAFO-Konzept auch aus Fahrten mit Vorgängerfunktionen Überraschungen herausfinden und den Testkatalog verbessern.

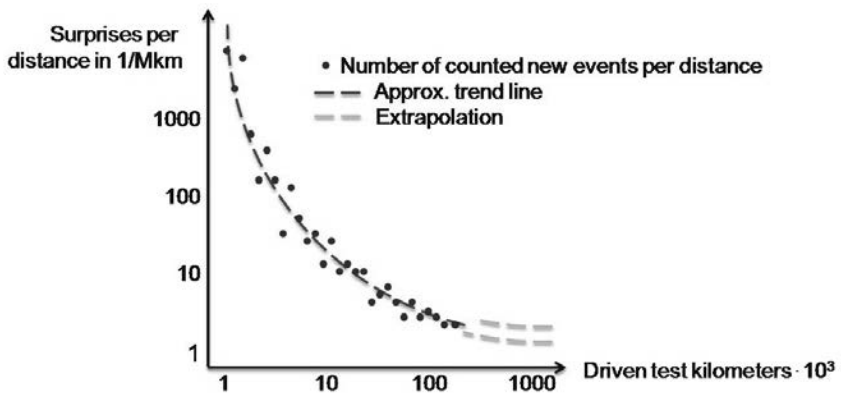


Bild 7: Überraschungen pro Fahrstrecke über gefahrene Testkilometer

Validität der Modelle

Neben dem in Abschnitt 7 aufgezeigten grundsätzlichen Konflikt zwischen Aufwand und Validität soll hier kurz auf den Stand heutiger Modelle und deren Validität eingegangen werden. Einen hohen Stand der Modellgüte kann der Simulation der Fahrdynamik bescheinigt werden, denn diese wird auch zur Homologation von ESC in Fahrzeugvarianten eingesetzt, wofür in besonderem Maße die Fahrphysik korrekt abzubilden ist. Auch die fahrdynamikerfassenden Sensoren werden darüber in ausreichender Qualität simuliert. Für die umfeld-erfassenden Sensoren sieht es dahingegen sehr viel schlechter aus. Zum einen stellt die Echtzeitfähigkeit bei White-Box-Modellen, bei denen die analogen Schaltkreise simuliert werden müssen, eine große Herausforderung dar. Aber selbst wenn dies gelöst wäre, bleibt das Hauptproblem die Simulation der für den Sensor relevanten Umgebung. Auch wenn moderne Raytracing-Algorithmen auf Grafik-Hardware einen hohen Grad an Realismus erreichen, wie die Gaming-Anwendungen immer wieder verblüffend zeigen, so kommen sie bei der Umsetzung für die Modellierung der Umfeldsensoren an die Grenzen. Noch bleibt es schwierig, die vielen optischen Effekte für ein realistisches Kamerabild realitätsgetreu auf ein simuliertes Kamerabild umzurechnen. Noch schwieriger gestaltet sich die Abbildung für Radarsensoren. Das empfangene Radarecho setzt sich aus einer Vielzahl an reflektierten Teilstrahlen zusammen, die aufgrund von Reflektion an Fahrbahnoberflächen, Wänden und anderen Fahrzeugen, über mehrere Pfade an dem Empfänger kommen und dann phasenkorrekt zusammengesetzt werden müssen. Für eine dem Rohsignal korrekt nachempfundene Simulation müsste die Umfeld in Flächenelemente zerlegt werden, die von der Größen-

ordnung der Wellenlänge sind (bei 77 GHz Radar 4 mm) und diese mit Oberflächennormale und Reflektionskoeffizient attribuiert werden. Neben der schieren Zahl der Elemente, die sich daraus ergeben würde, müsste diese für jeden Zeitschritt verfügbar sein. Dies belegt die Unmöglichkeit einer Radarempfangssignalsimulation. Als Ansatz wird von Cao [24] eine Greybox-Simulation vorgeschlagen, die zumindest die wichtigsten physikalischen Einflüsse auf die Abbildung der Umwelt auf die Sensorergebnisse enthält. Aber hier ist noch ein weiterer Weg zu gehen, bis die Umfeldsensormodellierung den Stempel „valide“ erhält, zumal dafür allein etablierte Kriterien noch fehlen.

Für die Verhaltensmodellierung mag schon ein stark vereinfachtes Modell der Umfeldsensierung reichen. Problematischer ist die Modellierung des Verhaltens der Verkehrsumwelt. Zum einen sind die Modelle für das Verhalten von Verkehrsteilnehmern im heutigen Verkehr nicht besonders aussagekräftig für die Szenarienmodellierung, zum anderen sind Verhaltensänderungen zu erwarten, wenn die Menschen mit autonomen Fahrzeugen konfrontiert werden, allein schon deshalb, weil automatisierte Fahrzeuge voraussichtlich viel vorsichtiger fahren als das menschliche Fahrerkollektiv. Ein anderer Weg als über die Fahrerprobung das Wissen über das Verhalten zu ermitteln, erscheint nicht möglich.

9. Felddatenermittlung

Aus den vorherigen Beschreibungen geht eindeutig hervor, dass es eine große Wissenslücke gibt, die nur durch Daten aus Felderprobung geschlossen werden kann. Für die Gewinnung dieses Wissens bieten sich grundsätzlich drei Verfahren an:

- Datenaufzeichnung im Fahrzeug von Zeitscheiben, die durch Testfahrer getriggert werden.
- Over-the-Air-Aufzeichnung mit Labeling und Auswertung im Labor
- Mitlaufende virtuelle Bewertung der Automation und automatisierte Triggerung von Aufzeichnungen, die ihrerseits over-the-air oder auf anderem Wege zum Entwickler übermittelt werden. Dieses Konzept [25] wird VAAFO (Virtual Assessment of Automation in Field Operation) genannt.

Grundsätzlich ist unerheblich, ob die Messdaten bei aktiver oder emulierter Zielfunktion, einer Vorgängerautomation oder manuellem Fahren erhoben werden, wobei die Aussagekraft in der Reihenfolge abfällt.

Die erste Alternative der Felddatengewinnung wird schon seit langem in kundennahen Fahrerprobungen eingesetzt, hat aber Grenzen beim Einsatz in „echter“ Kundenhand. Der finanzielle Aufwand für die Bereitstellung sowie manuelle Auswertung ist bereits aktuell eine Her-

ausforderung. Das zweite Konzept ist technisch das leistungsfähigste, ist aber bzgl. des Schutzes der Privatsphäre zweifelhaft.

VAAFO ist ein Auto-Labeling-Tool, das auf Basis einer ständig neu gestarteten Vorwärtssimulation des Verhaltens eine retrospektive Vergleichsmöglichkeit mit der Realfahrt ermöglicht. Zeigen sich dabei signifikante Unterschiede, so führen diese zu einem Trigger für die Aufzeichnung der in einem Ringspeicher liegenden Werte. In der Vorwärtssimulation können auch neue Funktionselemente verwendet werden, die nicht „scharf“ geschaltet sind. Somit können potentielle Problempunkte ohne Gefahr ermittelt werden, die dann wie oben beschrieben dem Testkatalog hinzugefügt werden. Weitere Details zum Verfahren finden sich in [26].

10. Fazit

Für die Absicherung des automatisierten Fahrens ohne Fahrerüberwachung wurden verschiedene Bausteine vorgestellt, die geeignet erscheinen, eine Validierung der Sicherheit (im Sinne von Safety) zu gewährleisten. Zur Nutzung steht das Instrumentarium zu einem großen Teil noch nicht zur Verfügung. Dies betrifft sowohl das „Was“ als das „Wie“ der Validierung. Dieser Einsicht zufolge haben sich auch Forschungsprojekte konstituiert, die beide Validierungsaufgaben adressieren. Auf die Frage nach dem „Was“ ist das Projekt PEGASUS (Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen, 01/2016 - 06/2019) ausgerichtet, während die Methoden zur Validierung im EU-Projekt ENABLE-S3 (European Initiative to Enable Validation for Highly Automated Safe and Secure Systems, 05/2016 - 04/2019) aus der Reihe ECSEL Joint Undertaking im Vordergrund stehen. Letzteres adressiert auch das Thema Security, ein auch für die Sicherheit (Safety) besonders dringliches Thema, denn die Schreckenspotentiale, die die Cyberkriminalität über gehackte autonome Fahrzeuge besitzt, sind in den Zeiten des erlebten Terrorismus mehr als beunruhigend.

Die Markteinführung des nichtüberwachten automatisierten Fahrens kann auch bei bestmöglichen Vorarbeiten zur Validierung nicht auf Basis eines Sicherheitsnachweises erfolgen, der sich an den im Anfang des Artikels genannten Sicherheitszielen messen kann. Die Prognose aus der Absicherung mit den genannten Methoden kann sich nur im Einsatz bewähren. Trotzdem sollte die Prognose es erlauben, eine angemessene Zahl an Fahrzeugen zuzulassen. Diese Zahl kann sich aus einer konservativen Risikoprognose bestimmen lassen. Ist dieses Risiko für die anderen Verkehrsteilnehmer ohne Bedeutung, bspw. unterhalb der Jahresschwankungen der Unfallzahlen, so lassen sich Fahrstrecken realisieren, die zunächst die

Prognose verbessern helfen bis zum Zeitpunkt, an dem ein Nachweis über mehr oder weniger Sicherheit auf statistischer Basis gelingt. Veröffentlichte [26] und noch nicht veröffentlichte Modellrechnungen zeigen, dass die Einführung unter diesem Vorbehalt die Innovationsgeschwindigkeit nicht verringert, sondern im Gegenteil eine sehr schnelle Marktdurchdringung ermöglichen könnte, falls die Voraussetzungen der erwarteten Sicherheit und der Marktnachfrage vorliegen.

Literaturangaben

- [1] Gasser, T. M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, S. u. Vogt, W.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Gemeinsamer Schlussbericht der BAST-Projektgruppe "Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung" Dokumentteil 1. Wirtschaftsverlag NW (2012) Heft F 83
- [2] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Verkehr in Zahlen 2014/2015 43.
- [3] Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle - Fachserie 8 Reihe 7 - 2013 (2013)
- [4] Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F. u. Singer, C. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015
- [5] Maurer, M., Gerdes, J., Lenz, B. u. Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015
- [6] Rasmussen, J.: Skills, Rules and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. IEEE Transactions On Systems, Man, and Cybernetics, vol.smc-13 MAY/~1983 No. 3
- [7] Donges, E.: Fahrerverhaltensmodelle. In: Winner, Hakuli et al. (Hg.) 2011 – Handbuch Fahrerassistenzsysteme
- [8] Schnieder, E. u. Schnieder, L.: Verkehrssicherheit. Maße und Modelle, Methoden und Maßnahmen für den Straßen- und Schienenverkehr. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2013
- [9] Reichart, G.: Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen. VDI-Verlag 2001
- [10] Reichart, G.: Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen. Fortschritt-Berichte Nr. 7, VDI-Verlag, Technische Universität München Diss. Düsseldorf 2001 2001
- [11] Gründl, M.: Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. 2005

- [12] Winner, H., Wachenfeld, W. u. Junietz, P. (Hrsg.): (How) Can Safety of Automated Driving be Validated? 2016
- [13] Urmson, C.: Google Self-Driving Car Project. SXSW Interactive 2016. 2016
- [14] Wachenfeld, W. u. Winner H.: Die Freigabe des autonomen Fahrens. In: Maurer, M., Gerdes, J., Lenz, B. u. Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015, S. 439–464
- [15] Glauner, P., Blumenstock, A. u. Haueis, A. (Hrsg.): Effiziente Felderprobung von Fahrerassistenzsystemen, UNI DAS e.V. 2012
- [16] Eckstein, L. u. Zlocki, A.: Safety Potential of ADAS - Combined Methods for an Effective Evaluation. ESV 2013
- [17] Schuldt, F., Saust, F., Lichte, B., Maurer, M. u. Scholz, S.: Effiziente systematische Testgenerierung für Fahrerassistenzsysteme in virtuellen Umgebungen. AAET 2013
- [18] Tatar, M. u. Mauss, J.: Systematic Test and Validation of Complex Embedded Systems. ERTS 2014. Toulouse 2014
- [19] Mitsch, S., Ghorbal, K. u. Platzer, A.: On Provably Safe Obstacle Avoidance for Autonomous Robotic Ground Vehicles. Robotics Science and Systems (RSS) 2013, abgerufen am: 27.06.2014
- [20] Bock, T.: Bewertung von Fahrerassistenzsystemen mittels der Vehicle in the Loop-Simulation. In: Winner, Hakuli et al. (Hg.) 2012 – Handbuch Fahrerassistenzsysteme, S. 76–83
- [21] Hendriks, F., Tideman, M., Pelders, R., Bours, R. u. Liu, X.: Development tools for active safety systems: Prescan and VeHIL. Vehicular Electronics and Safety (ICVES). 2010
- [22] Graab, B., Donner, E., Chiellino, U. u. Hoppe, M.: Analyse von Verkehrsunfällen hinsichtlich unterschiedlicher Fahrerpopulationen und daraus ableitbare Ergebnisse für die Entwicklung adaptiver Fahrerassistenzsysteme. Audi Accident Research Unit (AARU) (2008)
- [23] State of California, Department of Motor Vehicles: Autonomous vehicles testing regulations
- [24] Cao, C.T., Kronenberg, K. u. Poljansek, M.: Adaptive transmission control. Google Patents. 1999. <http://www.google.com/patents/US5954777>
- [25] Wachenfeld, W. u. Winner, H. (Hrsg.): Virtual Assessment of Automation in Field Operation. A New Runtime Validation Method. 2015
- [26] Horn, M. u. Watzenig, D.: Automated Driving: Safer and More Efficient Future Driving. Springer International Publishing 2016 (In Veröffentlichung)

Automatisiertes Fahren 2030 – welche Chancen bieten Automation und Vernetzung?

Prof. Dr.-Ing. **Karsten Lemmer**, Institut für Verkehrssystemtechnik,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Braunschweig

Kurzfassung

Hochautomatisiertes Fahren wird in naher Zukunft Realität. Nach einem halben Jahrhundert neuer Entwicklungen, Technologien und Ansätze ist Automation heute ein anerkannter Baustein für eine sichere, effiziente, umweltfreundliche und menschenzentrierte Mobilität der Zukunft. Dies manifestiert sich in den Zielbildern, Roadmaps und Strategien, wie sie das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur mit dem Runden Tisch oder der nationalen Strategie Automatisiertes Fahren bis 2020 und das acatech-Projekt Neue autoMobilität bis 2030 skizzieren. Im BMWi-Projekt PEGASUS wird mit Kriterien, Werkzeugen und Methoden für Test und Freigabe automatisierter Fahrfunktionen die Brücke gebaut, um bereits vorliegende Ergebnisse und Prototypen zeitnah in Produkte überführen zu können. Auch die Schaffung von Testfeldern, wie sie aktuell auf Bundes- und Landesebene in Vorbereitung sind, unterstützt die Realisierung von Automation im Straßenverkehr. Mit Blick auf das Gesamtverkehrssystem wird Automation in ihren verschiedenen Ausprägungen sich nicht zuletzt auch auf das Mobilitätsverhalten der Menschen auswirken.

Abstract (engl.)

Highly Automated Driving is set to become a reality in the near future. After half a century of new developments, technologies and approaches, automation is today recognised as a building block for a safe, efficient, environmentally friendly and person-centred transportation solution of the future. This manifests itself in the targets, roadmaps and strategies outlined by the Federal Ministry of Transportation and Digital Infrastructure with the Round Table or the national strategy on automated driving to 2020 and the acatech project New autoMobility to 2030. As part of the BMWi project PEGASUS, criteria, tools and methods for testing and approving automated driving functions are set to bridge the gap enabling already existing results and prototypes to be translated into products in the near future. The creation of test beds currently being prepared at state and federal level also supports the realisation of the automation of road transport. Looking at the transport system as a whole, automation in its various guises will have an impact not least on the travel behaviour of individuals.

1. Herausforderungen und Potentiale für den Straßenverkehr

Mobilität ist ein wichtiger Motor unserer Wirtschaft und Gesellschaft. Mobilität sicherzustellen, ist daher von zentraler Bedeutung. Unser Verkehrssystem sieht sich jedoch mit Staus, Umweltbelastungen und Unfällen vielfach Herausforderungen gegenüber, die seine Leistungsfähigkeit und Akzeptanz einschränken. Automation und Vernetzung eröffnen ein großes Spektrum an Möglichkeiten, um diesen Herausforderungen entgegenzutreten. Wo Automation Aufgaben des Menschen übernimmt, treten Fehler und Eigenarten des Menschen in den Hintergrund, die vielfach Ursache für Unfälle oder Staus sind. Und wo Vernetzung die Grenzen des eigenen Fahrzeugs überwindet, profitiert das Verkehrssystem mit all seinen Teilnehmern von einem intensiveren Miteinander. Fahrerlose Fahrzeuge ermöglichen schließlich sogar ganz neue Mobilitätsangebote, die nicht nur mehr Zeit für Freizeit und Arbeit freigeben, sondern zum Beispiel auch die gesellschaftliche Teilhabe für Personen mit bisher eingeschränkter Mobilität (z.B. Ältere, Geh-, Sehbehinderte) verbessern.

2. Zielbild, Nutzungsszenarien und Handlungsfelder für den automatisierten Straßenverkehr 2030

Heute stehen wir an der Schwelle zur Übergabe der Verantwortung vom Menschen auf die Technik. Automation hat schon schrittweise Einzug in unsere Verkehrsrealität gehalten in Form von Fahrerassistenzsystemen und Teilautomationen (z.B. ACC Adaptive Cruise Control), bei denen der Fahrer jedoch gemäß Wiener Straßenverkehrskonvention nach wie vor die Kontrolle und Verantwortung für die Fahraufgabe übernimmt. Im nächsten Schritt wird die Verantwortung schrittweise der Automation übertragen. Das setzt ein hohes Maß an Vertrauen voraus, das Technik durch Reife und gewissenhafte Tests verdienen muss und das durch gesetzliche Regelungen flankiert werden muss.

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur hat der Runde Tisch Automatisiertes Fahren strategische Eckpunkte und realistische Einsatzszenarien mit einer Perspektive bis 2020 definiert [1]. Unter Beteiligung von Bundesministerien und -behörden, Bundesländern, Industrieverbänden, Technischen Überwachungsvereinen, Nutzerverbänden, Versicherungswirtschaft und Forschungseinrichtungen ist dabei eine nationale Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren entstanden. Der Fokus liegt hier zunächst auf dem hochautomatisierten Fahren. Zwei Einsatzszenarien wurden als realistisch für 2020 identifiziert: hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen als strukturiertes, weniger komplexes Verkehrsumfeld und vollautomatisiertes Fahren in Parkhäusern als strukturiertes, kom-

plexes Verkehrsumfeld bei niedrigen Geschwindigkeiten. Zur Erreichung der Ziele, Deutschland als Leitanbieter zu erhalten, zum Leitmarkt zu machen und im Straßenverkehr von der Automation zu profitieren, wurden Maßnahmen für die Handlungsfelder Infrastruktur, Recht, Innovation, Vernetzung sowie IT-Sicherheit und Datenschutz festgelegt.

Etwas weiter in die Zukunft blickt das acatech-Projekt Neue autoMobilität und entwirft ein Zielbild für 2030+. Im Mittelpunkt stehen hierbei die Bedürfnisse der Nutzer. Der Fokus ist auf das vollautomatisierte und fahrerlose Fahren gerichtet.



Bild 1: Zielbild 2030 für den automatisierten und vernetzten Straßenverkehr im Jahr 2030 des acatech-Projektes Neue autoMobilität (Quelle: acatech)

In sieben Handlungsempfehlungen formuliert die acatech dafür notwendige Rahmenbedingungen [2]:

1. Automatisierung, Vernetzung und Infrastruktur müssen zusammen gedacht werden.
2. Dem Aufbruch in die vernetzte Mobilität sollte ein stufenweiser Entwicklungsplan zugrunde liegen.

3. Der automatisierte Straßenverkehr sollte in Testzentren (Living Labs) entwickelt, erprobt und evaluiert werden.
4. Wissenschaft und Wirtschaft sollten im Schulterschluss einheitliche Prinzipien der Mensch-Maschine-Interaktion entwickeln.
5. Die Nutzung von Straßenverkehrsdaten muss mit dem Schutz der Privatsphäre in Einklang gebracht werden.
6. Der bestehende Rechtsrahmen sollte national und international weiterentwickelt werden, damit auch im Verkehr der Zukunft Rechtssicherheit besteht.
7. Ein von der Bundesregierung koordiniertes Innovationsprogramm sollte den Aufbruch in die neue autoMobilität koordinieren und fördern.

Im nächsten Schritt wird die Arbeitsgruppe ihre Empfehlungen ausarbeiten und bis Ende 2016 eine detaillierte Roadmap für den Weg zum vollautomatisierten Verkehr im Jahre 2030 entwickeln.

3. Kriterien, Werkzeuge und Infrastruktur für Test und Freigabe automatisierter Fahrfunktionen

Wenn der Mensch das Fahrzeug zukünftig nicht mehr steuert, werden für die Zulassung und Freigabe von Produkten allgemeine Kriterien, Maße und Werkzeuge zur Bestimmung der Güte und Qualität benötigt. Nur dann können automatisierte Fahrzeuge bei Gewährleistung hoher Qualitätsstandards marktfähig gemacht werden. Zentrale Fragen sind in diesem Zusammenhang: Was muss ein automatisiertes Fahrzeug leisten? Wie kann nachgewiesen werden, dass es seine Aufgaben auch zuverlässig erfüllt? Hiermit beschäftigen sich derzeit 17 Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft im Projekt PEGASUS (Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen). Ziel ist dabei, ein in der Breite akzeptiertes, etabliertes und einheitliches Vorgehen zum Testen sowie zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen (HAF) zu entwickeln.

Mit dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundprojekt PEGASUS werden bis Mitte 2019 wesentliche Lücken im Bereich des Testens bis hin zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen geschlossen. Forschungsbedarf besteht insbesondere zu zwei Kernfragestellungen des Projekts: „Welche Leistungsanforderungen müssen automatisierte Fahrzeuge erfüllen?“, „Wie wird die Sicherheit der Systeme nachgewiesen?“. Die Einführung des automatisierten Fahrens soll hierbei wissenschaftlich fundiert

sowie hinsichtlich der Testmethoden transparent und mit allen Beteiligten abgestimmt schneller im Praxisalltag möglich werden.

Bisher übliche Verfahren sind für die Zulassung hochautomatisierter Fahrzeuge ungeeignet bzw. zeit- und kostenintensiv und vor allem herstellerspezifisch. PEGASUS definiert neue Kriterien, Maße und Güteniveaus zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen. Kurz: PEGASUS schließt die bestehenden Lücken in den Bereichen Testen und Freigabe hochautomatisierter Fahrzeuge, sodass die Resultate verschiedener Forschungs- und Entwicklungsprojekte sowie bereits existierende Fahrzeugprototypen effizient in marktfähige Produkte überführt werden können.

Als Ergebnis von PEGASUS erwarten die Projektpartner, dass das Testen hochautomatisierter Fahrzeuge bzw. einzelner Fahrzeugkomponenten simulations- und labor- bzw. prüfstand-basiert im engen Zusammenspiel mit Erprobungen auf Prüfgeländen und im Feld durchgeführt werden kann. Insbesondere die simulations- bzw. labor-/prüfstand-basierten Tests stehen im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten, um umfassende Tests zukünftig bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt in Entwicklungsprozesse zu integrieren und den Aufwand auf Testgeländen und im Feld möglichst gering zu halten. Neben Testkatalogen, Methoden und IT-Werkzeugketten zur Absicherung und Freigabe, stehen hierbei auch die Leistungsfähigkeiten von Mensch und Technik im Mittelpunkt des Projekts. Die Projektergebnisse dienen als Referenz, um für weitere Anwendungsfälle Testverfahren und -einrichtungen zu konzipieren und zu bewerten, die beispielsweise bei Herstellern, Zulieferern und Prüfstellen umgesetzt werden. Die erarbeiteten Ergebnisse werden im Anschluss an das Projekt direkt nutzbar sein und die Entwicklung von Serienprodukten im Bereich des hochautomatisierten Fahrens unterstützen.

Auch die Schaffung von Testfeldern, wie sie Bund und Länder aktuell umsetzen, trägt einen großen Teil zur schnellen Realisierung von Automation im Straßenverkehr bei. Ergänzend zu dem Testfeld auf der A9 soll mit dem vom Land Niedersachsen geplanten Testfeld auf der Autobahn 2, 7, 39 und 391 zwischen Hannover, Hildesheim, Salzgitter, Wolfsburg und Braunschweig der Verkehrsfluss zukünftig auch bei steigender Mobilitätsnachfrage sichergestellt werden. Assistenzsysteme und insbesondere (teil)automatisiertes und vernetztes Fahren können so in der Praxis erprobt und die Forschung und Entwicklung produktnaher Tests vorangetrieben werden.

Für die aktuell vom Bund geplanten Testfelder in sechs deutschen Städten (Braunschweig, Hamburg, Düsseldorf, München, Ingolstadt, Dresden) stellt das BMWI bis 2020 rund 80 Milli-

onen Euro bereit. Das vernetzte Fahren in der Stadt stellt die Forschung vor neue Herausforderungen: Automatisierte und vernetzte Fahrzeuge müssen beispielsweise komplexe Verkehrssituationen an Ampeln und Kreuzungen richtig auflösen. Auch die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern ist komplexer als auf der Autobahn. Straßen und Infrastruktur in den Innenstädten werden mit Sensorik und neuen Mobilfunktechnologien ausgestattet, um die Forschung am automatisierten und vernetzten Fahren im Realverkehr voranzutreiben. Die Nutzung von Echtzeit-Datenübertragung zwischen Verkehrsteilnehmern über den neuen Standard 5G und die Nutzung hochgenauer Karten sollen in diesem speziellen Umfeld untersucht werden. Zudem sollen neue Mobilitätskonzepte in der Stadt erprobt werden.

In Braunschweig existiert so ein urbanes Testfeld operativ bereits seit 2014: Mit der Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM) betreibt das DLR ein städtisches Testfeld zur Erforschung vielfältiger Verkehrsthemen. Explizit gehören dazu insbesondere das automatisierte und vernetzte Fahren, die Interaktion mit Fußgängern und Radfahrern sowie Maßnahmen zur Verbesserung des Verkehrsflusses. AIM wurde mit Mitteln des Bundes und des Landes Niedersachsen für 15 Millionen Euro als Großforschungsanlage aufgebaut und steht damit für Nutzer aus Wissenschaft und Wirtschaft zur Verfügung. AIM ist eine wiederverwendbare Plattform, die langfristig Aufbauten im realen Verkehrsumfeld der Stadt Braunschweig mit komplementären Simulationen, Laboren und über 20 Diensten bietet. Für die Erprobung in der Stadt wurde u.a. der gesamte Braunschweiger Stadtring zu einer Car2X-Referenzstrecke ausgerüstet mit Kommunikationstechnik an 36 Ampelkreuzungen. Damit ist die Erprobung automatisierten und vernetzten Fahrens im städtischen Bereich möglich. Dieselbe Strecke ist auch virtuell in Fahrsimulatoren verfügbar, so dass z.B. in einem kooperativen Simulationslabor Vorstudien für eine spätere Erprobung im realen Stadtverkehr erfolgen können.

In verschiedenen Projekten arbeitet das DLR hiermit z.B. an Grüne-Welle-Automation, adaptiver und kooperativer Ampelsteuerung, netzoptimierten Fahr- und Ladestrategien für Elektrobusse, Mobilitätsassistentz für sehbehinderte Fußgänger und Tote-Winkel-Assistentz für Lkw zum Schutz von Radfahrern. Sensorik zur Erfassung des Verkehrsgeschehens (u.a. Kameras, Radar) liefert darüber hinaus zum Ansatzpunkte für die Auslegung von Fahrzeugautomation, zum anderen werden hiermit die Auswirkungen neuer Systeme auf das Verkehrssystem untersucht. Mobile Aufbauten ergänzen diese fest installierte Infrastruktur für Untersuchungen an wechselnden Standorten, z.B. an Bahnübergängen oder Nebenstraßen. Forschungsfahrzeuge mit Sensorik zum automatisierten Fahren und Kommunikationstechnik gehören ebenfalls zum Großanlagen-Portfolio.

AIM deckt somit die gesamte Kette von Forschung und Entwicklung für ein breites Spektrum verkehrlicher Themen ab und leistet damit einen wichtigen Forschungsbeitrag für die urbane Welt von morgen. Denn: Seit 2007 leben erstmals mehr Menschen in Städten als auf dem Land. In Deutschland stehen die Autofahrer schon heute im Schnitt 36 Stunden im Jahr im Stau. Einige Städte und Ballungszentren liegen deutlich darüber: In und um Stuttgart und Karlsruhe sind es sogar mehr als 60 Stunden.

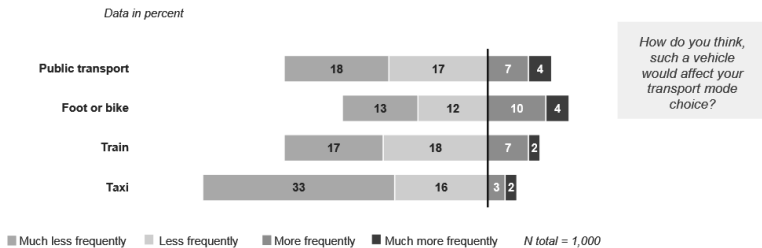
4. Auswirkungen automatisierten Fahrens auf das Nutzungsverhalten

Bis vollautomatisierte Fahrzeuge auf unseren Straßen fahren, liegt noch ein langer Weg vor Forschern und Entwicklern. Doch es wird der Tag kommen, an dem alle rechtlichen Probleme aus dem Weg geräumt, alle ethischen Fragen geklärt und alle technischen Herausforderungen gelöst sind. Das gesamte Verkehrssystem wird einem tiefgreifenden Wandel unterzogen sein. Für alle Verkehrsteilnehmer wird das autonome Fahren in Zukunft zur Normalität gehören. Doch wer wird ein solches System nutzen? Eher die jungen oder die älteren Fahrer? Und in welcher Situation werden autonome Fahrzeuge genutzt werden? Eine hohe Akzeptanz auf gesellschaftlicher Ebene, die über die reine Nutzerakzeptanz hinausgeht, ist Voraussetzung für die erfolgreiche Einführung der neuen Fahrzeuge im Personen- wie auch im Wirtschaftsverkehr.

Forschung zu gesellschaftlichen Aspekten von automatisiertem Fahren ist derzeit allerdings erst ansatzweise vorhanden. Neben einzelnen marktorientierten Befragungen gibt es aber bereits erste Ansätze, wie sie im Förderprojekt „Villa Ladenburg“ der Daimler und Benz-Stiftung anzutreffen sind. Im Mittelpunkt des Projekts steht die gesellschaftliche und individuelle Akzeptanz des automatisierten Fahrens. Erwartungen und Hoffnungen, aber auch Ängste und Befürchtungen der Verkehrsteilnehmer werden empirisch erschlossen. Die Untersuchungen, die Aspekte von Akzeptanz automatisierten Fahrens bisher betrachtet haben, vermitteln ein heterogenes Bild, das von begeisterter Zustimmung bis zu einem grundsätzlichen Widerstand gegenüber der Vorstellung reicht, die Kontrolle über die Fahrzeugsteuerung an einen Roboter abzugeben. Es gibt bereits erste Hinweise darauf, dass die unmittelbare Situation, in der ein derzeit verwendetes Verkehrsmittel durch ein autonomes Fahrzeug ersetzt werden könnte, einen direkten Einfluss auf die Akzeptanz hat.

In einer gemeinsamen Studie des DLR und der Humboldt-Universität zu Berlin [3] und in Verbindung mit dem o.g. Projekt Villa Ladenburg mit rund 1.000 Befragten in Deutschland, fanden die Forscher heraus, dass zwar Vorbehalte gegenüber dieser neuen Mobilitätsform bestehen, dass jedoch ein Großteil der Befragten ihr Verkehrsverhalten zukünftig nicht verändern wollen. Fast die Hälfte der Befragten würde in einer Welt mit autonomen Fahrzeugen

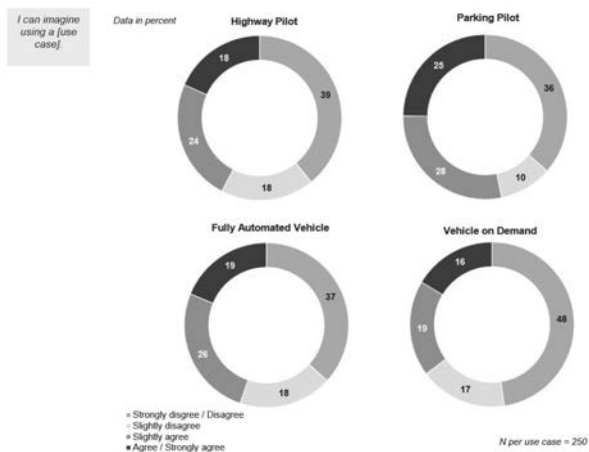
zukünftig seltener ein Taxi oder öffentliche Verkehrsmittel und Züge nutzen, weil sie sich in ihrem eigenen automatisiert fahrenden Fahrzeug bequem zu ihrem Ziel chauffieren lassen könnten.



Erwartete veränderte Wahl der Verkehrsmittel in einer Welt mit autonomen Fahrzeugen
(Quelle: [3])

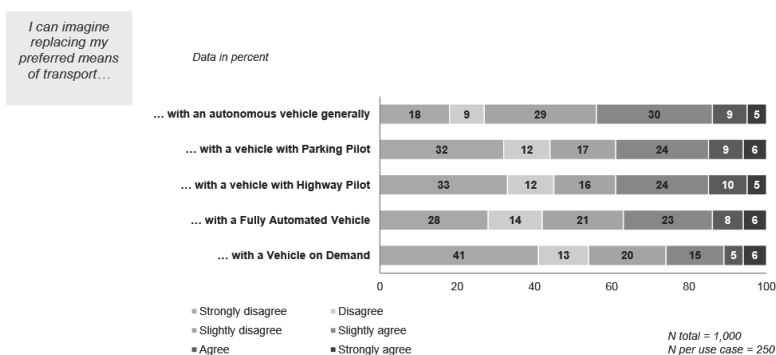
Die Wahl eines Verkehrsmittels wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Einige Gründe sind schwer zu erfassen, wie Routine, Bequemlichkeit, Rückzugsbedürfnis, mangelndes Wissen über Alternativen oder das soziale Ansehen der Verkehrsmittel. Andere wiederum lassen sich leichter in ihrem Einfluss messen: Dazu gehören Fahrtziele, Reisezeiten und -kosten oder der räumliche Kontext.

Aus der Studie wird auch deutlich, dass sich die Mehrheit der Befragten durchaus vorstellen kann, dem Fahrzeug bestimmte Aufgaben, wie beispielsweise das Parken, der Automation zu überlassen (53%). Der vollen Kontrollübergabe durch einen Autobahnpiloten oder einem vollautomatisierten Fahrzeug stehen sie allerdings skeptisch gegenüber.



Bereitschaft, ein automatisiertes Fahrzeug, bzw. automatisierte Fahrfunktionen zu nutzen.
 (Quelle: [3])

Über alle Anwendungsszenarien hinweg lässt sich beobachten, dass eine zurückhaltende bis skeptische Haltung gegenüber automatisierten Fahrzeugen steigt, je mehr Kontrolle der Fahrer an das Fahrzeug abgeben könnte.



Bereitschaft, in verschiedenen Anwendungsfällen das momentan bevorzugte Transportmittel gegen ein automatisiertes Fahrzeug zu ersetzen. (Quelle: [3])

Es ist also noch ein langer Weg, bis die Automatisierung nicht nur auf der Straße, sondern auch in den Köpfen der Menschen angekommen ist. Für die Bereitschaft, ein neues Verkehrssystem zu akzeptieren und bestimmte Fahrfunktionen – vor allem die volle Kontrolle – an die Maschine zu übergeben, muss auch das Interesse an Fortschritt und neuen Technologien vorhanden sein. Bis jetzt erwarten die Menschen noch nicht, dass die neuen Technologien einen Einfluss auf ihr persönliches Mobilitätsverhalten haben werden. Das unterstreicht einmal mehr den enormen Forschungsbedarf an psychologischen und gesellschaftlichen Fragestellungen, damit die Erwartungen der Menschen berücksichtigt und ihnen ihre Ängste hinsichtlich neuer Technologien genommen werden können. Nur so kann das automatisierte Fahren in der Gesellschaft ankommen.

- [1] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren. Berlin, 2015.
- [2] acatech (Hrsg.): Neue autoMobilität. Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft (acatech POSITION). München, Herbert Utz Verlag 2015.
- [3] Eva Fraedrich, Rita Cyganski, Ingo Wolf, Barbara Lenz. User Perspectives on Autonomous Driving. Berlin 2016, ISSN 0947 – 0360

Die Disruption der Automobilindustrie

Von der Evolution zur Revolution beim automatisierten Fahren?

Johann Jungwirth, Volkswagen AG, Wolfsburg

Kurzfassung

Insgesamt erleben wir gerade die Disruption der Automobilindustrie in drei Dimensionen welche orthogonal zueinander sind:

- Digitalisierung: vom Automobil mit uns Menschen als Fahrer zu vernetzten selbst-fahrenden Fahrzeugen
- Nachhaltigkeit: vom Verbrennungsmotor zum Elektroantrieb
- Urbanisierung: von Ownership zu Shared Mobility

Dies wird einen ähnlichen Fortschritt der Gesellschaft und vor allem die Erhöhung unserer Lebensqualität bewirken wie vor über 100 Jahren der Umstieg vom Pferd aufs Automobil. Ich sehe dies nicht erst in der fernen Zukunft, im Jahr 2030 oder 2035, sondern in den nächsten 3 bis 5 Jahren, in denen diese neue Welt geformt wird. Bis 2025 wird es in vielen Städten und Regionen der Welt ganz alltäglich sein, sich von A nach B in selbstfahrenden Autos transportieren zu lassen. Vor uns liegt also eine spannende Zeitreise zur Vollautonomie, sowohl als Owned Autonomy als auch als Shared Autonomy.

Es liegt mir sehr am Herzen, dass unsere Kinder ein besseres, sichereres, entspannteres, stressfreieres und schöneres Leben haben als wir selbst. Und dies ohne auf individuelle Mobilität und die damit verbundene Freiheit verzichten zu müssen.

Im letzten Jahrhundert war der Motor das Herz des Automobils und der Fahrer sein Gehirn. In diesem Jahrhundert wird das selbstfahrende System (Self-Driving System: SDS), welches den Fahrer ersetzt, zum Herz des Automobils und die Mobilitätsplattform zum Buchen von Mobilität „On Demand“ wird zu seinem Gehirn.

In diesem Sinne erfinden wir das Automobil neu und wir erfinden die Mobilität neu.

1. Die Megatrends: Digitalisierung, Nachhaltigkeit und Urbanisierung

Vielen von uns ist noch gar nicht bewusst, in welcher historisch bedeutender Zeit wir leben. Denn nicht nur das Automobil steht durch die digitale Transformation vor seiner ersten Neu-erfindung, sondern die Mobilität an sich: Selbstfahrende Fahrzeuge ohne Lenkrad und Pedalerie werden für den Transport von Personen und Waren in wenigen Jahren in den ersten Städten unterwegs sein. Insgesamt erleben wir gerade die Disruption der Automobilindustrie in drei Dimensionen welche orthogonal zueinander sind:

- Digitalisierung: vom Automobil mit uns Menschen als Fahrer zu vollvernetzten selbst-fahrenden Fahrzeugen
- Nachhaltigkeit: vom Verbrennungsmotor zum Elektroantrieb
- Urbanisierung: von Ownership zu Shared Mobility

Dies wird einen ähnlichen Fortschritt der Gesellschaft und vor allem die Erhöhung unserer Lebensqualität bewirken wie vor über 100 Jahren der Umstieg vom Pferd aufs Automobil. Ich sehe dies nicht erst in der fernen Zukunft, im Jahr 2030 oder 2035, sondern in den nächsten 3 bis 5 Jahren, in denen diese neue Welt geformt wird. Bis 2025 wird es in vielen Städten und Regionen der Welt ganz alltäglich sein, sich von A nach B in selbstfahrenden Autos transportieren zu lassen. Vor uns liegt also eine spannende Zeitreise zur Vollautonomie, sowohl als Owned Autonomy als auch als Shared Autonomy.

2. Auswirkungen der Vollautonomie aus Kundensicht

Heutzutage bestimmen Enge, Parkplatznot, Staus und Stress im Verkehr das Leben in unseren Innenstädten. Schauen Sie sich beispielsweise eine Stadt wie Berlin an mit diesen typischen Straßenzügen und beidseitig geparkten Autos:



Bild 1: Berlin 2016

Der Blick auf dieselbe Straße in 2025 wird ganz anders aussehen:

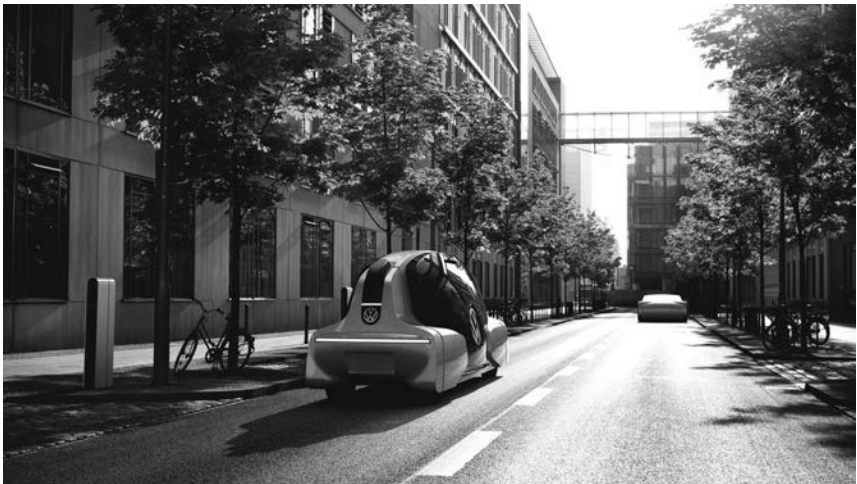


Bild 2: Vision Berlin 2025

Weil autonome Fahrzeuge die Menschen direkt an der Haustür abholen und selbstständig außerhalb der beengten Innenstadt parken, werden die innerstädtischen Flächen am Straßenrand frei und können z.B. für weitere Fahrspuren, eine Verbreiterung der Gehwege, sichere Fahrradwege oder ähnliches genutzt werden.

Zu diesem Potenzial mein nächstes Beispiel: Es ist doch unglaublich, wieviel wertvolle Fläche in den Innenstädten heute durch Parkplätze oder Parkhäuser belegt ist. Schauen Sie sich Houston, Texas an:



Bild 3: Houston, TX 2016

Hier meine Vision für 2025:



Bild 4: Vision Houston TX, 2025

Es entstehen also viele neue Gestaltungsräume und die wertvollen Innenstadtfächen können künftig sinnvoller genutzt werden, z.B. für zusätzliche Parks, Spielplätze, Einkaufszentren, Büro- und Wohnräume und das in den besten Innenstadtlagen der Welt. Das wäre doch sehr erstrebenswert, oder?

Lassen Sie mich eine weitere Entwicklung benennen. Schauen Sie sich an, wie wenig individuelle Mobilität wir heute den Schwächsten unter uns anbieten – den Alten, Kranken, Blinden und Kindern.



Bild 5: Blinde und alte Menschen unterwegs zu öffentlichen Haltestellen

Sie müssen weite Strecken mühsam zu Fuß, teilweise mit Rollator, zu öffentlichen Haltestellen gehen oder sich teure Taxis leisten. Der demographische Wandel verstärkt noch diese Situation.

In die neue Mobilitätswelt werden alle Menschen eingebunden.



Bild 6: Blinde in selbstfahrenden Fahrzeugen

Wir werden sie bequem und beschwerdefrei von Tür zu Tür transportieren – auf Knopfdruck oder auf Sprachbefehl: „Bitte hole mich ab.“ Solche Angebote bieten den Nutzern einen enormen Gewinn an Lebensqualität. Sie erleichtern erheblich die Teilhabe am gesellschaftli-

chen Leben. Können Sie sich vorstellen, wie dankbar uns diese Menschen sein werden? Zudem eröffnet sich hier ein riesiger Markt, der bisher weitestgehend brach liegt.

Ein weiteres Beispiel für die Chancen des autonomen Fahrens: Was würden Sie dazu sagen, dass wir bis zu 1,25 Millionen Menschen das Leben retten könnten – Jahr für Jahr? So viele Menschen sterben jährlich im Straßenverkehr, 91% davon durch sogenanntes menschliches Versagen. Die Minimierung von Verkehrsunfällen wird in einigen Teilen der Welt bald Realität werden weil selbstfahrende Autos keine Schrecksekunde haben sondern in Millisekunden reagieren, weil sie nicht abgelenkt werden, keine rote Ampel übersehen, keinen Alkohol trinken, nicht ermüden und daher viel sicherer als wir Menschen das Auto steuern können. Die Basis dafür liefern die künstliche Intelligenz, exponentiell wachsende Rechengeschwindigkeit und die Real-Time Vernetzung untereinander.

Und was würden Sie sagen wenn ich Ihnen heute mitteile, dass wir jedem Menschen 37.668 wertvolle Stunden schenken? Dies ist die Zeit, die jeder im Schnitt in seinem Leben im Auto verbringt. Bisher ist dies „verlorene“ Zeit. Denken Sie etwa an Staus, Stop-and-go in der City, oder die erfolglose Suche nach einem Parkplatz. Wir werden den Menschen diese Zeit zurückschenken, indem wir sie auch im Auto entspannt reisen lassen, ihnen die Möglichkeit zur Entspannung, zum Arbeiten, zum Kommunizieren geben, zum Genuss der schönen Natur, zum Spielen mit den Kindern, als Kinosaal, als Konzerthalle und vieles mehr.

3. Historische Zeiten der Revolution in der Automobilindustrie

Wäre es nicht ein Traum, sich abends nach der Arbeit in der Lounge seines Autos schlafen legen zu können und am nächsten Morgen ausgeschlafen am Urlaubsort in Italien anzukommen? Oder unterwegs einen Film in bester Ton- und Bildqualität zu sehen? Mehr Platz, mehr Zeit, höhere Lebensqualität, höhere Produktivität und Sicherheit: Das alles kann das autonom fahrende, voll vernetzte Auto der Zukunft den Menschen bringen.

Ich jedenfalls möchte gern in dieser Zukunft leben! Es liegt mir sehr am Herzen, dass unsere Kinder ein besseres, sichereres, entspannteres, stressfreieres und schöneres Leben haben als wir selbst. Und dies ohne auf individuelle Mobilität und die damit verbundene Freiheit verzichten zu müssen. Wir als Konzern mit unseren Marken, mit unseren bereichsübergreifenden Teams und ich persönlich ruhen nicht und arbeiten Tag und Nacht daran, dies umzusetzen.

Die Automobilindustrie erlebt gerade historische Zeiten. Dies ist gigantisch und für uns als Volkswagen Konzern sowohl eine Riesenherausforderung, der wir uns sehr gerne stellen, als auch eine noch viel größere Chance, das Leben deutlich zu verbessern, um die Erde in einem besseren Zustand zu verlassen als wir sie vorgefunden haben.

Sie können sich sicher vorstellen, wie es den Menschen vor über hundert Jahren ging, als die ersten Autos auf den Straßen fuhren, inmitten der Pferdekutschen. Ich habe volles Verständnis dafür, dass es auch heute viele Zweifler gibt; die weniger die Chancen als die Risiken sehen. Lassen Sie uns diese Menschen gemeinsam überzeugen! Wir sollten konsequent die Mutigen, die Kühnen, die Vordenker und Erfinder unterstützen, damit auch die Neuerfindung des Automobils auf breite Zustimmung trifft und mit Gesetzen, Bestimmungen und Regeln jetzt dafür der Weg freigemacht wird.

Wir im Volkswagen Konzern möchten diesen Wandel federführend vorantreiben und gestalten, deshalb erhöhen wir sowohl das Tempo als auch die Investitionen in diesen wichtigen Innovationsfeldern der Digitalisierung und Vollautomatisierung, und wir stellen uns dafür neu auf. Damit wird der Volkswagen Konzern vom Automobilhersteller zum Mobilitätsanbieter avancieren – mit der Mentalität und der Agilität des Silicon Valley.

4. Das Self-Driving System (SDS) als Herzstück des Automobils im 21. Jahrhundert

Im letzten Jahrhundert war der Motor das Herz des Automobils und der Fahrer sein Gehirn. In diesem Jahrhundert wird das selbstfahrende System (Self-Driving System: SDS), welches den Fahrer ersetzt, zum Herz des Automobils und die Mobilitätsplattform zum Buchen von Mobilität „On Demand“ wird zu seinem Gehirn. Sowohl das selbstfahrende System auf Basis künstlicher Intelligenz mit 360 Grad Laser, Radar, Kamera und Ultraschall Sensorik, Zentralrechner und Redundanzsystemen als auch die Mobilitätsplattform bestehen zum großen Teil aus Software und sehr komplexen Software-Algorithmen: von der Umgebungserfassung und Sensorfusion über die Objekterkennung, Situationsanalyse, Pfadplanung, Entscheidungslogik auf Basis künstlicher Intelligenz bis zur lernenden HD-Karte welche wir gemeinsam mit dem gemeinsam mit Partnern erworbenen Kartendienst HERE entwickeln.

5. Volkswagen als integrierter Hardware-, Software und Services Konzern

Dies bedeutet, dass wir uns zu einem „integrierten Hardware-, Software- und Services-Konzern“ weiter entwickeln werden, um diesen Wandel zu bewältigen und neue Geschäftschancen und Umsatzpotenziale zu erschließen. Ich möchte an dieser Stelle ein Zitat von

Alan Kay erwähnen, der bereits vor über 30 Jahren sagte: "Menschen, die es mit Software sehr ernst meinen, sollten ihre eigene Hardware bauen." Wir bei Volkswagen sehen dies genauso. Und der Riesenwettbewerbsvorteil für uns ist, dass wir die Hardware bereits beherrschen. Da unsere Zukunft davon abhängt, müssen und werden wir die Software- und Services-Entwicklung genau so professionell und mit Liebe zum Detail angehen wie die Hardware-Entwicklung.

5. Wandel zum Mobilitätsanbieter mit best-in-class User Experience Design im besten Ökosystem

Unser Ziel ist es, im Jahr 2025 ein weltweit führender Anbieter nachhaltiger Mobilität zu sein. Hierfür haben wir unser Konzerndesign für das digitale Zeitalter neu aufgestellt. Mit den zunächst drei „Volkswagen Group Future Center“ (in Europa, Asien und Kalifornien) werden Designer und Digitalisierungsexperten gemeinsam das Auto der Zukunft entwickeln. Im Center für Europa in Potsdam haben wir mit dieser kooperativen Arbeitsweise bereits Anfang 2016 begonnen und befinden uns gerade im Aufbau der beiden Future Center im Silicon Valley und Peking. Eine solche Verschmelzung von Digitalisierung und Design, die Hand in Hand das Interieur, das Exterieur und auch das User Experience Design für unsere Produkte und Services konzipieren und umsetzen, ist wegweisend für die Automobilindustrie. Integral, direkt und mit dem absoluten Fokus auf unsere Kunden, ihre Bedürfnisse, Wünsche und Träume! Auch damit bringen wir ein Stück Silicon-Valley-Kultur, dessen Denk- und Arbeitsweise in den Volkswagen Konzern und unsere Marken. Das Ziel: Die Fahrzeuge des Volkswagen Konzerns sollen bei Kundenerlebnis, Interface-Design, Bedienlogik, neuen Innenraumkonzepten sowie Info- und Entertainment "Best-in-Class" sein. Selbstverständlich gehören perfekte Konnektivität der Fahrzeuge mit der Cloud, mit den Kunden-Smartphones sowie mit dem Smart Home zu der Best in Class digitalen User Experience dazu, und genauso Over-the-Air Software Updates und Upgrades, welche unsere Fahrzeuge immer auf dem neuesten Stand halten und den Kunden neue Services bieten.

Die Digitalisierung ermöglicht uns auch die Schaffung eines „Ökosystems“ über Konzernmarken und -produkte hinweg, in welchem die Kunden und Nutzer das beste Erlebnis im Wettbewerbsumfeld erhalten, so wie wir es aus den Ökosystemen um unsere Smartphones, PCs und Home Entertainment kennen. Das Fahrzeug wird zu unserem besten Freund der uns versteht, mit uns spricht, unser Verhalten und unsere Vorlieben lernt, um uns perfekt zu unterstützen.

Ich bin überzeugt, dass dieses neue Kundenerlebnis faszinieren wird. Die selbstfahrenden Fahrzeuge werden nicht nur dem Ziel des unfallfreien Fahrens nahe kommen, sondern auch viel Fahrspaß bieten, wie mit dem Audi RS7 piloted driving concept im letzten Jahr auf der Rennstrecke gezeigt. Denn Emotionen, Performance und Fun to Drive werden auch in Zukunft wichtige Faktoren bleiben.

Diese Zukunft zu schaffen, die Chance zu haben, einen signifikanten Anteil an der Neuerfindung des Automobils und der Neuerfindung der Mobilität zu haben, das treibt uns alle im Volkswagen Konzern, das treibt mich persönlich an.

Insofern sehen wir das Zitat von Alan Kay als Leitgedanken: „Die beste Art die Zukunft vorherzusagen, ist, sie zu erfinden.“

In diesem Sinne erfinden wir das Automobil neu. Wir erfinden die Mobilität neu, und wir werden alles tun gemeinsam mit vielen Partnern und den besten Mitarbeitern um diese Revolution anzuführen!

Zeitlich-räumliche Erkennung von Stauenden für die assistierte Verzögerung von Fahrzeugen

M.-Sc., **Sven-Eric Molzahn**, Dr.-Ing. **Hubert Rehborn**,
Dr. rer. nat. **Micha Koller**, Daimler AG, Sindelfingen

Kurzfassung

Aktuelle Studien zeigen ein vermehrtes Aufkommen von Auffahrunfällen an Stauenden auf deutschen Schnellstraßen. Daraus resultierend wird ein Bedarf von Systemen zur passiven und aktiven Sicherheit abgeleitet, die einen Fahrer oder ein autonomes Fahrzeug im Falle eines gefährlichen Stauendes auch aktiv warnt.

Da Verkehr in einem komplexen zeitlich-räumlichen System stattfindet, ist es unabdingbar für ein Assistenzsystem zur Stauendewarnung ein lückenloses Verständnis der zugrundeliegenden Verkehrssituation zu haben. Die Eigenschaften zeitlich-räumlichen Verkehrs wurden mithilfe der Kernalerschen Drei-Phasen-Verkehrstheorie untersucht. Mit einer Einteilung, Erkennung und Verfolgung des Verkehrs in drei Phasen *freier Verkehr*, *synchronisierter Verkehr* und *sich bewegende breite Staus* können potenziell gefährliche Situationen erkannt und identifiziert werden.

In dieser Arbeit zeigen wir ein Verfahren zur Identifikation von Stauenden basierend auf mikroskopischen Fahrzeugdaten (FCD: Floating Car Data) und der Drei-Phasen-Verkehrstheorie.

Abstract

Recent research shows every so often upcoming cases of dangerous accidents happening at jam tails so that the introduction of some kind of proper warning system is helpful to alleviate the problem. Since traffic is a highly dynamic and complex system of spatiotemporal patterns one has to have an outright understanding of the underlying phases of the traffic to make a qualified assertion when a dangerous jam tail in a traffic pattern occurs. Kerner showed with the three-phase traffic theory an alternate approach of traffic modeling to the classical theories based on the fundamental diagram. With the help of splitting traffic into three distinct phases and the recognition and the reconstruction of phases: free flow, synchronized flow and wide moving jams, potentially dangerous situations can be detected and identified. In this presentation we illustrate an approach of identifying critical jam tails based on microscopic FCD (Floating Car Data) and the three-phase traffic theory.

1. Einführung

Das Auffahren auf Stauenden gilt auch heute noch als häufigste Ursache für Unfälle auf deutschen Autobahnen und hinzukommt, dass 95% dieser Unfälle mit schweren bis tödlichen Verletzungen einhergehen [1]. Daraus resultiert ein Bedarf an Regelungssystemen zur automatischen Erkennung von Stauenden und der Längsregelung eines hochautomatisierten Fahrzeugs. Während die heutige Technik zur Erkennung von vorausliegenden Hindernissen eine Distanz von ca. 200m nicht überschreitet (Radar, Lidar) [5], kann durch die flächendeckende mikroskopische Verkehrserfassung ein deutlich größer ausgedehnter Horizont gewählt werden. Radargestützte Assistenzsysteme und Umfeldsensorik zur Längsregelung bieten hingegen eine höhere Auflösung und örtliche Genauigkeit und können so Notfallsituationen wie das Auffahren auf ein Stauende mit starken Bremsmanövern entschärfen. Die Kombination aus beiden Systemen bietet höheren Komfort und Sicherheit. Bild 1 illustriert die Umsetzung eines Systems zur assistierten Verzögerung bei Erkennung eines Stauendes. Fahrzeuge erhalten über das Backend die relevanten Informationen zur örtlich und zeitlichen Position des Stauendes und verzögern bereits bis zu mehreren Kilometern vorher auf eine niedrigere Geschwindigkeit, bis die Sensorik die Hindernisse erkennt und das Fahrzeug mittels Komfortbremsung zum vollen Stillstand bringt [5].

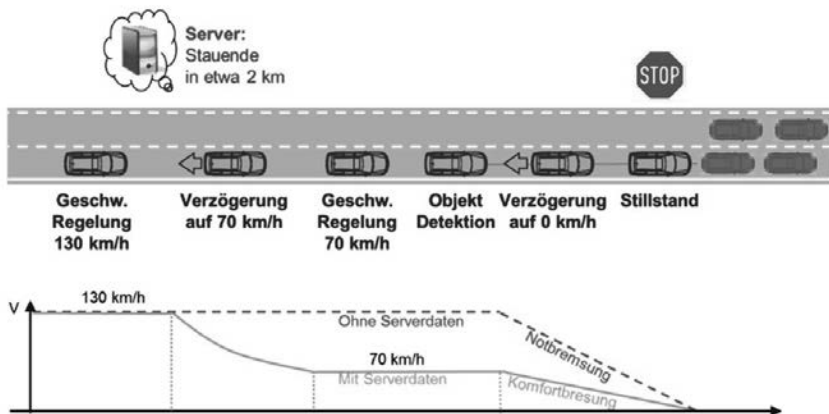


Bild 1: Ein Streckenabschnitt mit Fahrzeugen, die auf ein Stauende auffahren. Zeitlicher Geschwindigkeitsverlauf über die Zeit eines hochautomatisierten Fahrzeugs, das mit den Informationen über ein Stauenden ausgestattet ist (blau) und Geschwindigkeitsverlauf eines hochautomatisierten Fahrzeugs ohne diese Informationen (rot); Bildquelle [5].

Die Digitalisierung des Fahrzeugs bietet die Möglichkeit anonymisiert Fahrzeugdaten einer großen Flotte zu sammeln. Durch die Anbindung der Fahrzeuge über Mobilfunk an ein Internet-Backend besteht die Möglichkeit die aktuell eintreffenden sowie die historisch gespeicherten Daten zu analysieren. Für die Untersuchung in dieser Arbeit wurden anonymisierte GPS-Daten der Flotte über einen zweiwöchigen Zeitraum gesammelt und analysiert. Die Daten bestehen aus 5- und 10-sekündigen Positionsdaten (Longitude, Latitude) mit entsprechenden Zeitstempeln für die jeweilige Position. Die Positionsdaten wurden durch einen Kartenabgleich einer Straße zugeordnet und in mikroskopischen Trajektorien überführt.

2. Theoretischer Hintergrund

Als Grundlage zur verkehrstheoretischen Untersuchungen wurde die Drei-Phasen-Verkehrstheorie von Kerner genutzt [2,3]. Diese teilt Verkehr in drei charakteristisch unterschiedliche Phase ein: in *freien Verkehr* (F), *synchronisierten Verkehr* (S) und *sich bewegendem breiten Stau* (J). Abbildung 2 stellt eine exemplarische Fahrt durch ein typisches Staumuster dar. Das Fahrzeug tritt die Fahrt im freien Verkehr an und muss beim Verkehrszustandsübergang vom freien Verkehr zum sich bewegendem breiten Stau stark verzögern.

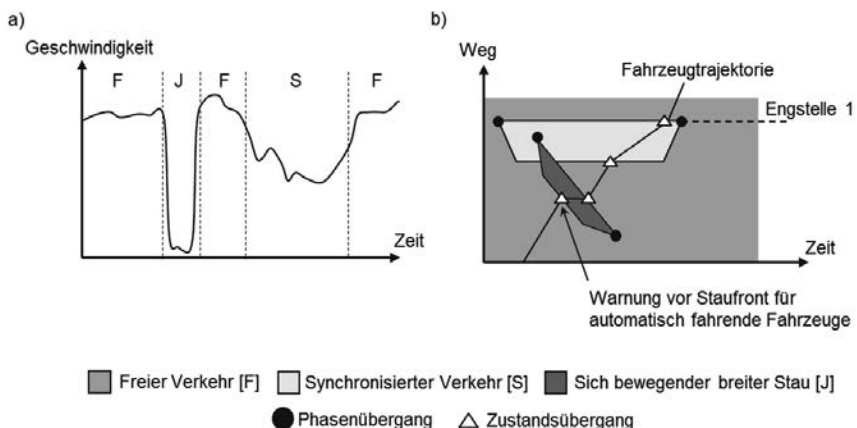


Bild 2: a) Geschwindigkeit einer Trajektorie über die Zeit. Phasen F, S und J sind zu erkennen. b) Die Trajektorie aus a) illustriert in einem Weg-Zeit Diagramm.

3. Verfahren zur Erkennung der Staufront

In dieser Arbeit wird zunächst auf ein Verfahren zur Erkennung einer Staufront aus historischen Daten eingegangen. Dieses basiert auf zwei unterschiedlichen Algorithmen. Zum einen wird jede Trajektorie, die aus einer Perlenkette aus mikroskopischen Geschwindigkeitswerten besteht, auf signifikante Veränderungen der Geschwindigkeit untersucht und den einzelnen Phasen, wie in Abschnitt 2 beschrieben, zugeordnet. Ein signifikanter Geschwindigkeitseinbruch deutet auf ein Stauende hin und wird zur weiteren Verarbeitung vermerkt. Dieser signifikante Geschwindigkeitseinbruch wird im Kontext der Drei-Phasen Verkehrstheorie als Zustandswechsel von F nach J oder S nach J beschrieben. Abbildung 2 b) zeigt illustrativ ein zeitlich-räumliches Verkehrsmuster mit identifizierten Verkehrszuständen und Staufronten. Mithilfe der fahrzeugautonomen Zustandserkennung [6] werden die Phasen- und Zustandsübergänge aus den Trajektorien extrahiert. So ist es möglich eine präzise räumliche und zeitliche Verfolgung der Staufront durchzuführen und zu bestimmen. Abbildung 3 zeigt reale anonymisierte Fahrzeugdaten auf der A8 von Kirchheim kommend zum Kreuz Stuttgart am 15.12.2015 zur morgendlichen Hauptverkehrszeit. Trajektorien sind in schwarz markiert und Staufronten blau. Der Algorithmus kann aus historischen Daten die *sich bewegendenden breiten Staus* erkennen und nachverfolgen. Mit diesem Wissen, kann nun ein Fahrzeug mehrere Minuten und Kilometer bevor es auf die Staufront auffährt gewarnt und mit entsprechenden Assistenzsystemen eine Komfortbremsung durchgeführt werden.

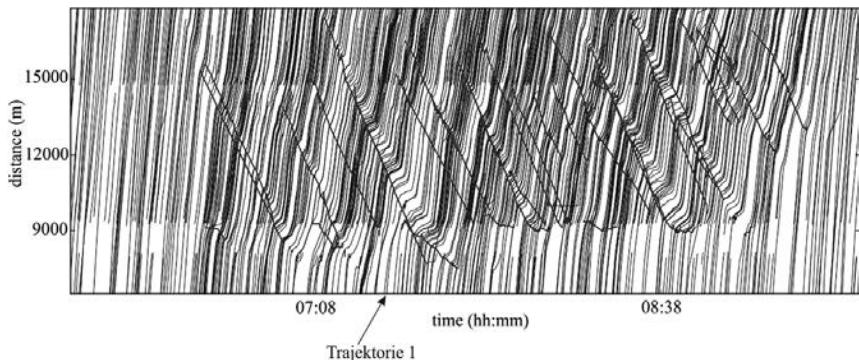


Bild 3: Empirische Trajektorien mit identifizierten Staufronten im Weg-Zeit Diagramm

Es stellte sich ein weiteres Phänomen heraus: kurz bevor Autofahrer aufgrund des Staus verzögern müssen, wird vor der Staufront beschleunigt und somit die Situation noch einmal verschärft. Mit unserem Verfahren zur automatischen Erkennung kann dieses Verhalten

vermieden und zusätzlich neben des Gewinns von Komfort und Sicherheit auch Sprit eingespart werden. Abbildung 4 a) zeigt genau dieses Verhalten eines real fahrenden Fahrzeugs, das entsprechend der Markierung in Abbildung 3 gefahren ist. Deutlich zu sehen ist zudem die Verzögerung von ca. $3,4 \frac{m}{s^2}$ in Abbildung 4 b) direkt nach dem überflüssigen Beschleunigen.

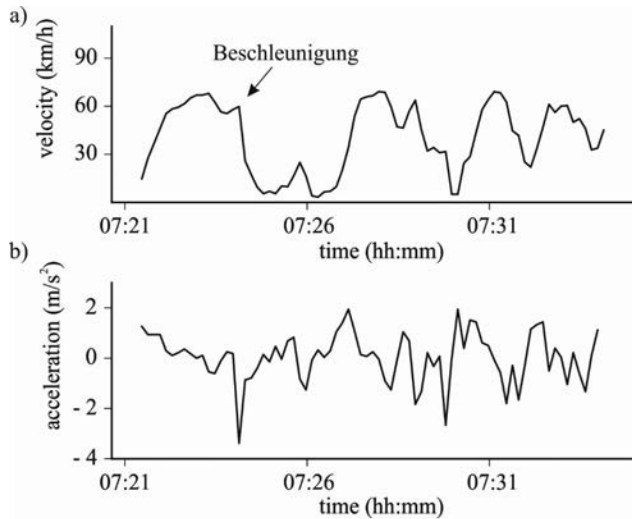


Bild 4: Geschwindigkeitsverlauf eines real fahrenden Fahrzeugs entsprechend der Trajektorie 1 in Abbildung 3 (a) und die dazugehörige Beschleunigung (b).

Bereits heute wird in modernen Mercedes-Benz Fahrzeugen ein System zur Warnung vor Stauenden eingesetzt (Abbildung 5). Dieses System dient zur akustischen und visuellen Warnung vor einem gefährlichen Stauende (zu sehen an dem Warndreieck an der stromaufwärtigen Staufront), jedoch ist es derzeit nicht mit weiteren Assistenzsystemen zur automatischen Verzögerung des Fahrzeugs verknüpft. Dies ist die logische Weiterentwicklung zu einem sicheren und komfortablen autonomen Fahren.

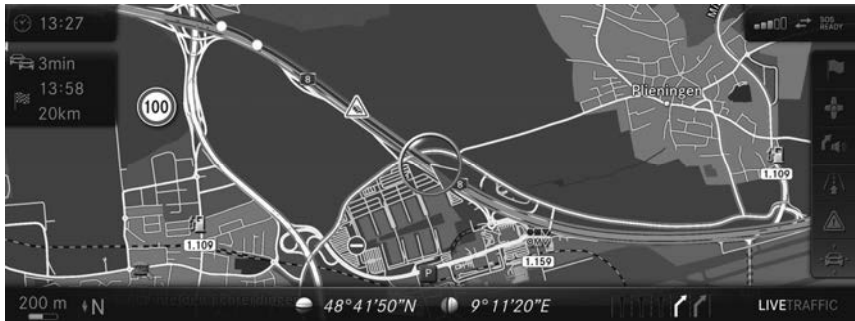


Bild 5: Einsatz der Stauendewarnung in der Mercedes-Benz Navigation

4. Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem hier vorgestellten Verfahren lässt sich eine Verfolgung der Staufront aus historischen Daten realisieren. Gegenüber der heute bereits im Fahrzeug implementierten Stauendewarnung bietet das in dieser Arbeit vorgeschlagene Verfahren, basierend auf der Drei-Phasen-Verkehrstheorie, den Vorteil, dass eine kurzfristige Prognose der Bewegung der Staufront in Abhängigkeit der Verkehrsphase durchgeführt werden kann. Durch die kontinuierliche Verbindung des Fahrzeugs an ein Internet-Backend lassen sich so Informationen über die aktuell vorliegende Verkehrssituation an vernetzte Fahrzeuge übertragen. Schon heute werden diese zur Warnung genutzt. Diese Information kann zur automatischen Verzögerung an ein Stauende genutzt werden und somit zu mehr Sicherheit, Komfort und weniger Kraftstoffverbrauch führen. Bei potenziell gefährlichen Stauenden kann bei hochautomatisierten Fahrzeugen eine Empfehlung zur Übernahme der Kontrolle des Fahrzeugs an den Fahrer frühzeitig gegeben werden zur Vermeidung von Situationen, die nicht oder nur mit hohem Risiko automatisiert bewältigt werden können.

- [1] Unger, T. Konstellationen bei Auffahrunfällen. In Berichte der ADAC Unfallforschung. ADAC, 03 2011.
- [2] Kerner, B. S., The Physics of Traffic, Springer, Berlin, New York, 2004.
- [3] Kerner, B. S., Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory, Berlin, New York: Springer (2009).
- [4] Rehborn, H., R.-P. Schäfer, B. S. Kerner, Traffic Jam Warning Messages from Measured Vehicle Data with the Use of Three-Phase Traffic Theory, Proc. of Advanced Microsystems for Automotive Applications (AMAA), <http://www.amaa.de/presentations-2012>, (2012).
- [5] Andrej, C., et al, Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen - industriepolitische Schlussfolgerungen, Dienstleistungsprojekt 15/14, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)
- [6] Palmer, J., Fahrzeugautonome und verteilte Erkennung räumlich-zeitlicher Verkehrsmuster zur Nutzung in Fahrerassistenzsystemen. PhD thesis, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, 2011

Trajektorienplanung zur Kollisionsvermeidung im urbanen Raum

Jens Ferdinand M.Sc., Boliang Yi M.Sc., Adam Opel AG, Rüsselsheim

Kurzfassung

Automatisiertes Ausweichen erfordert eine besondere Methodik zur Trajektorienplanung, um den spezifischen Anforderungen dieser Aufgabe gerecht zu werden. Eine optimale Trajektorie muss die Kriterien der Fahrbarkeit, der Kollisionsvermeidung und der optimalen Nutzung des begrenzt zur Verfügung stehenden Manöverraums berücksichtigen. Dazu ist eine Kombination aus Lenken und Bremsen erforderlich, was die Komplexität der Aufgabe zusätzlich erhöht. Des Weiteren ist es aus Sicht der funktionalen Sicherheit und der Leistungsfähigkeit der Umfeldsensorik ein zentrales Ziel, den zur Kollisionsvermeidung erforderlichen Auslösezeitpunkt möglichst weit hinaus zu schieben. Schließlich muss das Verfahren eine hohe Recheneffizienz aufweisen, damit es in Seriensteuergeräten implementiert werden kann.

In dieser Publikation wird eine Methodik zur Trajektorienplanung vorgestellt, die eine Kopplung von Längs- und Querdynamik erlaubt. Hierzu wird ein Optimierungsproblem formuliert, das zur Online-Optimierung und somit für die Fahrzeuganwendung geeignet ist. Das Potenzial des Verfahrens wird zunächst in Simulationen nachgewiesen und danach in einen Versuchsträger zum Nachweis der Echtzeitfähigkeit implementiert. Abschließend werden die Ergebnisse der Fahrversuche analysiert und diskutiert.

Abstract

Automated evasive maneuvers drive special methods of trajectory planning to meet the required demands. An optimal evasive trajectory requires driveability, guarantees a collision - free driving path and optimal utilization of the available maneuver room. Targeting these demands, a combination of braking and steering is desirable, at the cost of increased complexity. From a functional safety stand point and the performance of environmental sensors it is desirable to execute the maneuver as late as possible. Additionally, the algorithm needs to allow a real-time performance for a later integration into a production controller.

In this publication, we propose a trajectory planning procedure that combines braking and steering. We define an optimization problem that finds the last possible and drivable evasive trajectory. The potential of the proposed algorithm is verified by simulations followed by further analysis and discussion.

1. Einleitung

Aktuelle Fahrerassistenzsysteme zur Unfallvermeidung warnen den Fahrer und versuchen ihn damit zu einer Handlung zu bewegen. Reagiert der Fahrer jedoch nicht oder nicht rechtzeitig, besteht immer noch die Möglichkeit eines automatisierten Eingriffs zur Unfallvermeidung. Fahrerassistenzsysteme wie z.B. Autonomous Emergency Braking (AEB) [1], die zunehmend in Fahrzeugen der aktuellen Generation zu finden sind, können eine Kollision durch einen automatisierten Bremseneingriff verhindern, falls der Fahrer nicht, oder nur unzureichend reagiert. Diese Systeme können jedoch bei höheren Geschwindigkeiten nur noch die Unfallschwere mindern, verhindern können sie die Kollision jedoch nicht mehr. Für höhere Geschwindigkeiten bieten Ausweichmanöver, die eine kombinierte Brems- und Lenkstrategie verfolgen, das höchste Potential zur Unfallvermeidung [2]. Speziell im häufig beengten urbanen Raum, mit plötzlich in die Fahrspur tretenden Fußgängern, versprechen solche Strategien zur Manöverplanung große Vorteile gegenüber einem reinen Brems- oder Lenkeingriff. Allerdings führt die Kombination des Lenk- und Bremseneingriffs zu sehr komplexen Fahrmanövern, insbesondere wenn das Fahrzeug bis an die Grenzen seiner Fahrphysik gebracht werden soll. In diesem Falle muss bereits in der Trajektorienplanungsphase sichergestellt werden, dass diese Grenzen zwar erreicht, aber nie überschritten werden.

Für die Anwendung eines kombinierten Systems ist es wichtig, den Auslösezeitpunkt des Manövers möglichst spät zu wählen: Zum einen möchte man dem Fahrer möglichst lange die Möglichkeit einräumen die Gefahrensituation ohne Systemunterstützung zu lösen. Zum anderen steigt die Verlässlichkeit der verarbeiteten Information bei längerer Beobachtung und somit auch die Prädiktionsqualität innerhalb des vorliegenden Fahrszenarios.

In der Literatur sind viele Ansätze zu finden, die die Trajektorienplanungsaufgabe als Optimierungsproblem aufstellen. Dies ermöglicht das intuitive Einbinden von Rand- und Nebenbedingungen in die Planungsaufgabe. Hierzu werden in [3, 4] optimale Spurwechselmanöver vorgestellt. [5] stellt ein Verfahren zur Kollisionsvermeidung vor, das den optimalen Beschleunigungswinkel im Kamm'schen Kreis bestimmt, um dem Grenzbereich des Fahrzeugs möglichst nahe zu kommen.

Das hier vorgestellte Verfahren ist für ein Fahrerassistenzsystem mit teil-automatisiertem Eingriff vorgesehen, d.h. der Eingriff in die Quer- und Längsdynamik erfolgt nur für einen sehr kurzen Zeitraum und der Fahrer muss nach dem automatisiertem Manöver die Fahraufgabe wieder vollständig übernehmen. Dazu wird ein Verfahren appliziert, das ein optimales Ausweichmanöver liefert - und zwar sowohl im Sinne der Fahrbarkeit als auch des letztmög-

lichen Eingriffszeitpunkts. Im weiteren Verlauf wird das Verfahren anhand von Simulation und Realfahrten erprobt.

2. Trajektorienplanung

Im folgenden Abschnitt wird das Verfahren zur Trajektorienplanung vorgestellt. Ein typisches Verkehrsszenario ist in Abb.1 zu sehen. Hier fährt ein Fahrzeug plötzlich aus einer Parklücke heraus in die Fahrbahn. Dem ankommenden Fahrzeug bleibt in dieser Situation oftmals

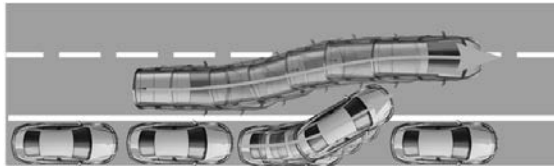


Bild 1: Innerstädtisches Ausweichszenario

keine andere Wahl als auszuweichen.

Für die Planung eines solchen Ausweichmanövers wird im Folgenden ein nicht-lineares Optimierungsproblem aufgestellt, das eine Ausweichtrajektorie liefert, die fahrbar und kollisionsfrei ist, und ein Ausweichen zum letztmöglichen Zeitpunkt ermöglicht.

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{z} \in D} f(\mathbf{z}) \\ \text{subject to } g_i(\mathbf{z}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \\ h_k(\mathbf{z}) = 0, \quad k = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Hierbei ist $f(\mathbf{z})$ die über den Optimierungsvektor \mathbf{z} zu minimierende Kostenfunktion, $g_i(\mathbf{z})$ und $h_k(\mathbf{z})$ sind die nicht-linearen Ungleichheits- und Gleichheitsbedingungen.

Kostenfunktion

Ziel des in dieser Arbeit vorgestellten Verfahrens ist es, eine Trajektorie zu finden, die ein Ausweichen zum letztmöglichen Zeitpunkt vor einem kritischen Objekt ermöglicht, sofern es die Umgebung erlaubt. Neben der Reduktion von möglichen Fehlauflösungen besteht ein weiterer Vorteil des späten Auslösens darin, dass durch die Kenntnis des letztmöglichen Auslösezeitpunktes auch bekannt ist, wie lange noch gewartet werden kann, bis die Auflösung erfolgen muss. Dieser Zeitraum kann als ein Maß für die Kritikalität der vorliegenden Situation aufgefasst werden. Ausgehend von der aktuellen Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeuges v_0 und der Relativposition des relevanten Objekts $[X_{Obj}, Y_{Obj}]$ wird kontinuierlich eine Trajektorie geplant. Befindet sich kein relevantes Objekt im Pfad, so wird eine unendli-

che Entfernung zu einem virtuellen Objekt angenommen. Die Kostenfunktion wird so definiert, dass der optimale (also letztmögliche) Auslösezeitpunkt diejenige Trajektorie liefert, die alle Rand- und Nebenbedingungen erfüllt

$$f(\mathbf{z}) = (X_{\text{obj}} - v_0 \cdot t_{\text{LME}})$$

mit der zu maximierenden Größe t_{LME} (*Time to Last Maneuver Execution*). Für eine Situation, bei der die Kenngrößen X_{obj} und v_0 bekannt sind, wird somit die Kostenfunktion minimal, wenn t_{LME} maximal wird. Wenn sich kein Objekt im Pfad befindet, also X_{obj} unendlich ist, ist dies auch gegeben. Hierbei wird t_{LME} unendlich und somit kann die Situation als unkritisch interpretiert werden. Nähert sich das Ego-Fahrzeug dem Objekt, so wird X_{obj} immer kleiner. In diesem Falle ist die optimale Lösung jene, bei der es ein maximales t_{LME} gibt, gleichzeitig alle Rand- und Nebenbedingungen erfüllt sind und keine weitere Verringerung von X_{obj} möglich ist.

Abtastung der Trajektorie

Der für die Planung von Ausweichmanövern wichtigste Zeitpunkt ist jener, an dem das Ego-Fahrzeug das Objekt passiert, im Folgenden *Passierungszeitpunkt* t_p genannt.

Dieser Zeitpunkt ist bezogen auf die stilisierte vordere Ecke des Ego-Fahrzeugs, die als erstes das Objekt passiert, wie in Abb.2 dargestellt. Des Weiteren ergibt sich durch Koordinatentransformation der Fahrzeugecken in den Schwerpunkt der schwerpunktbezogene *Passierungszeitpunkt*, der im Folgenden *Time to Last Maneuver Execution* t_{LME} genannt und zur Berechnung des letztmöglichen Ausweichzeitpunkts genutzt wird. Die Ermittlung von t_{LME} kann nicht im Vorfeld festgelegt werden, sondern muss situationsabhängig, unter Einbehaltung aller Rand- und Nebenbedingungen, für jedes Manöver individuell bestimmt werden.

Betrachtet man Trajektorienplanungsverfahren, die für automatisierte Systeme ausgelegt sind, so fällt auf, dass diese Verfahren fortlaufend das Manöver für einen festgelegten Zeitraum berechnen. Dies wird vorzugsweise in modelprädiktiven Reglern angewendet [6, 7, 8]. Hier wird die Trajektorie über einen konstanten Planungshorizont bestimmt, wobei die Trajektorie äquidistant mit N Stützstellen abgetastet wird. Dies hat den Vorteil, dass zum einen die Trajektoriendauer a-priori bekannt ist und sich andererseits die Aufgabenstellung bzw. Berechnung deutlich vereinfacht.

Allerdings birgt die Planung einer Trajektorie mit festem zeitlichem Ende die Gefahr, das gesamte Manöver nicht vollständig in einem Planungsschritt abgebildet werden kann, falls der Planungshorizont zu gering gewählt wurde. Dies kann speziell dann problematisch werden, wenn die geplante Trajektorie dem Zweck der Unfallvermeidung dienen soll. Einerseits

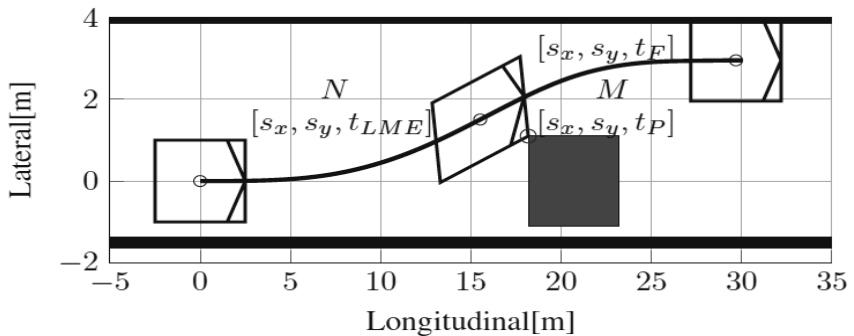


Bild 2: Abtastung der Trajektorie

muss das potenzielle Kollisionsobjekt vermieden werden, andererseits muss sichergestellt werden, dass das Fahrzeug nach erfolgreichem Ausweichen wieder in einen sicheren Zustand überführt wird und nicht z.B. mit einer Randbebauung kollidiert. Für diesen beschriebenen Anwendungsfall muss die Trajektorie für das gesamte Manöver vor dessen Ausführung bekannt sein. Wählt man den Planungshorizont beliebig groß, geht dies jedoch zu Lasten der Berechnungsperformanz, da mit steigendem Planungshorizont auch die Anzahl der notwendigen Stützstellen steigt. Aus den genannten Gründen wird folgender Ansatz zum Planen des Ausweichmanövers vorgeschlagen:

Das Gesamtmanöver wird zunächst in zwei Zeitbereiche unterteilt. Der erste Teil geht vom Manöverstart bis zum Passierungszeitpunkt t_P , der mit N Stützstellen abgetastet wird. Der zweite Zeitbereich erstreckt sich von t_P bis zum Manöverende t_{End} und wird mit M Stützstellen abgetastet. Für jeden Planungsschritt werden die optimalen Zeitpunkte für t_P und t_{End} ermittelt. Daraus resultieren Trajektorien, die dieselbe Anzahl an Stützstellen haben, allerdings variable, für die Situation optimale, Abtastintervalle besitzen. Dies ermöglicht es, das gesamte Ausweichmanöver effizient in einem Planungsschritt zu bestimmen.

Rand- und Nebenbedingungen

Die hier verwendeten Rand- und Nebenbedingungen entsprechen denen, die in [9] bereits veröffentlicht wurden. Hierbei werden geometrische Randbedingungen genutzt, die zum einen die Kollisionsfreiheit der Trajektorie mit dem Objekt sicherstellen und zum anderen solche, die ein Verlassen des Fahrkorridors verhindern. Dynamische Nebenbedingungen werden aufgestellt, damit die fahrdynamischen Grenzen des Ego-Fahrzeugs eingehalten wer-

den, wie z.B. die Begrenzung der Gesamtbeschleunigung und der maximalen Kurvenkrümmung.

3. Simulation

Das Trajektorienplanungsverfahren wird in Matlab™ umgesetzt und durch Simulation getestet. Als vereinfachtes Prüfzenario wird angenommen, dass sich das Ego-Fahrzeug mit einer Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 15$ m/s auf ein stationäres Hindernis bewegt, das sich zu Planungsbeginn in einem Abstand von $X_{Obj} = 40$ m und $Y_{Obj} = 0$ m befindet. Der laterale Versatz, der nötig ist um an dem Objekt vorbei zu kommen, ist 1 m. Es wird eine laterale Fahrbahnbegrenzung von 3,5 m angenommen. Die resultierende Trajektorie ist in Abbildung 3 zu sehen. Für die Ausgangssituation ergibt sich eine initiale *Time To Collision* *TTC* von 2,66 s. Diese berechnet sich aus der Anfangsgeschwindigkeit v_0 des Ego-Fahrzeugs und dem initia-

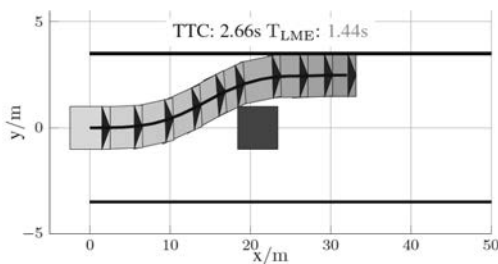


Bild 4: Trajektorienplanung für simuliertes Prüfzenario

len Abstand zum Objekt X_{Obj} mit der Beziehung $TTC = X_{Obj} / v_0$. Der berechnete letztmögliche Auslösezeitpunkt liegt bei $t_{LME} = 1,44$ s. Demnach kann mit dem Ausweichmanöver noch 1,44 s gewartet werden, was einer *TTC* von 1,22 s zum Zeitpunkt des letztmöglichen Ausweichens entspricht.

4. Erprobung des Gesamtkonzepts im Fahrversuch

Nun wird der vorgestellte Trajektorienplaner in einem Gesamtkonzept zur Unfallvermeidung umgesetzt und in einem Realfahrversuch getestet. Als Testfahrzeug dient ein Opel Insignia, dessen serienmäßig verbaute Lenk- und Bremsaktorik genutzt wird. Zur Erfassung der Umgebung kommen seriennahe Radar- und Kamerasysteme zum Einsatz.

Das Gesamtsystem wird in Simulink™ implementiert und im Fahrzeug auf einer dSPACE MicroAutoBox II integriert. Das zur Folgeregelung eingesetzte Regelungskonzept basiert auf der modellprädiktiven Regelungstheorie. Eine Beschreibung des Reglers ist in [10] zu finden. Abbildung 4 zeigt den zeitlichen Ablauf der Testfahrt.

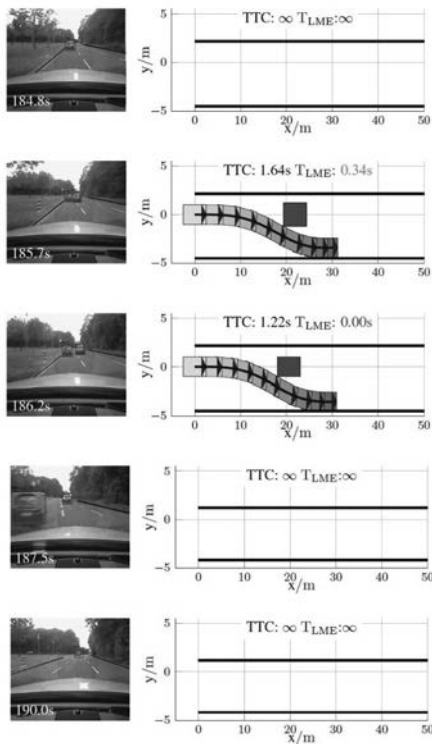


Bild 5: Trajektorienplanung im Realversuch

Der Zeitpunkt $t=184,8$ s zeigt die aktuelle Szene aus der Sicht des Ego-Fahrzeugs. Es folgt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 15m/s einem vorausfahrenden Fahrzeug. Zu diesem Zeitpunkt besteht keine kritische Situation, was daran zu erkennen ist, dass sowohl TTC als auch T_{LME} unendlich ist und keine Trajektorie geplant wurde. Zum nächsten Zeitpunkt bei $t = 185,7$ s weicht das vorausfahrende Fahrzeug plötzlich einem vor ihm stehenden Fahrzeug aus. Aus Sicht des Ego-Fahrzeugs besteht zu dem plötzlich auftauchenden stationären Hindernis eine TTC von 1,64 s. Die Trajektorienplanung liefert eine mögliche Ausweichtrajektorie. Jedoch ist mit $T_{LME} = 0,34$ s ein Auslösen des Manövers noch nicht erforderlich. Im nächsten Zeitschritt (186,2 s) ist das Ego-Fahrzeug näher an das stehende Fahrzeug herangefahren TTC wird zu 1,22 s ermittelt und die Trajektorienplanung liefert $T_{LME} = 0$ s. Demnach ist die Situation als

kritisch einzustufen und das Manöver wird ausgelöst. Bei 187,5 s hat das Ego-Fahrzeug erfolgreich die Kollision mit dem stehenden Fahrzeug verhindert. Während der Manöveraushführung wird die Situation fortlaufend beobachtet um ggf. auf Änderungen reagieren zu können. Die vorliegende Situation bleibt allerdings unverändert. Demnach wurde keine neue Trajektorie geplant und die anfänglich geplante Trajektorie bis zum Ende ausgeführt. Der letzte Zeitpunkt 190,0 s zeigt das Ende des Manövers, bei dem das Ego-Fahrzeug wieder in der Spur ausgerichtet ist.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren zur Trajektorienplanung für innerstädtische Kollisionsvermeidungsmanöver vorgestellt. Das vorgestellte Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass es das letztmögliche Ausweichmanöver findet und gleichzeitig die Zeitreserve zu

diesem liefert. Hinzu kommt, dass es an die Dynamik des Ego-Fahrzeugs angepasst ist und somit realistische, fahrbare Trajektorien liefert.

Das Verfahren wurde anhand eines vereinfachten Prüfszenarios getestet und in ein Gesamtsystem zur Unfallvermeidung integriert, das im Realversuch erfolgreich die Simulationsergebnisse bestätigte und das Potential zur Unfallvermeidung zeigten konnte.

6. Dank

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projekts UR:BAN durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert und durch Prof. Dr. C. Stiller vom KIT betreut.

Literaturverzeichnis

- [1] NCAP, *Autonomous Emergency Braking*, 2016.
- [2] H. Winner, „Frontalkollisionsschutzsysteme“, in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, Bd. 1, H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf, Hrsg., Vieweg + Teubner, 2009, pp. 522-540.
- [3] D. Soudbakhsh, A. Eskandarian und D. Chichka, „Vehicle steering maneuvers with direct trajectory optimization“, in *Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2010.
- [4] N. H. M. K. M. Sledge, „Comparison of Ideal Vehicle Lane-Change Trajectories“, in *Research into Vehicle Dynamics and Simulation*, 1997.
- [5] C. Schmidt, „Fahrstrategien zur Unfallvermeidung im Straßenverkehr für Einzel- und Mehrobjektszenarien“, KIT Scientific Publishing, 2014.
- [6] D. Ferguson, T. Howard und M. Likhachev, „Motion planning in urban environments: Part I“, in *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* 2008.
- [7] T. M. Howard, „ADAPTIVE MODEL-PREDICTIVE MOTION PLANNING FOR NAVIGATION IN COMPLEX ENVIRONMENTS“, 2009.
- [8] T. M. Howard und A. Kelly, „Optimal rough terrain trajectory generation for wheeled mobile robots“, *International Journal of Robotics Research (IJRR)*, Bd. 26, Nr. 2, pp. 141-166, 2007.
- [9] J. Ferdinand und B. Yi, „Trajectory Planning for Collision Avoidance in Urban Areas“, in *Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2016.
- [10] B. Yi, J. Ferdinand und H. Wu, „Robuste Fahrdynamikregelung zur Kollisionsvermeidung“, in *Proc. of the 6th GMM-Fachtagung Automotive meets Electronics (AME)*, 2015.

Konzeption und Entwicklung eines Preview-Systems zur Verbesserung der Komforteigenschaften und der Reichweiteneffizienz eines Fahrzeugs mit geregelten Vertikaldynamiksystemen auf Basis von Backend-Daten

M.Sc. **Andreas Noll**, I/EF-82, Audi AG, Ingolstadt;
Prof. Dr.-Ing. habil. **Christoph Ament**, Lehrstuhl für Regelungstechnik in der Ingenieurinformatik, Universität Augsburg, Augsburg

Kurzfassung

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht eine konkrete Umsetzung auf dem Gebiet der „präadaptiven Fahrwerkregelung“ in der Automobilindustrie mit dem Schwerpunkt der Datengenerierung und der Schwarmdatenverarbeitung. Hierzu wird ein konkretes Konzept entwickelt, welches die vorhanden aktiven und semi-aktiven Fahrwerkregelsysteme wie Dämpfer- und Niveauregulierung mit den generierten prädiktiven Streckendaten, auch Backend-Daten genannt, kombiniert. Aufgabe ist es, vorhandene Vertikaldynamiksysteme durch vorausschauende Streckeninformation, welche durch ein globales Serversystem zur Verfügung gestellt werden (Car-2-X), zu unterstützen, sodass diese im Vorfeld von Ereignissen entsprechende Maßnahmen einleiten können. Hauptziel ist es, die Komforteigenschaften und die Reichweiteneffizienz eines Fahrzeugs gezielt zu verbessern.

1. Einleitung

In heutigen Fahrzeugen kommen bereits viele unterschiedliche geregelte Vertikaldynamiksysteme zum Einsatz [1], die das Fahrverhalten hinsichtlich Fahrkomfort gegenüber passiven Fahrzeugen verbessern. Hierzu gehören Komponenten wie Verstelldämpfer, Luftfederung und eine aktive Wankstabilisierung. Aktuelle Ansätze verwenden darüber hinaus eine Kopplung von bestehenden aktiven Vertikal- und Preview-Systeme (vorausschauende Systeme), welche auf Grundlage von kamera- und laserbasierten Daten prädiktive Streckeninformationen generieren. Alle diese Regelsysteme verfolgen i.d.R. das Ziel der situationsabhängigen Komfort- bzw. Fahrdynamikoptimierung und beschränken sich dabei auf das durch Sensoren erfassbare Fahrzeugumfeld. Die gleichzeitige Steigerung der Reichweiteneffizienz bzw. CO_2 -Reduktion wird meist parallel anderen, nicht vertikaldynamischen Komponenten zugeordnet, wie bspw. rekuperative Bremssysteme [2] zur Energierückgewinnung oder ein intelligentes Motormanagement zur Abschaltung des Verbrennungsmotors im lastfreien Fahrzustand [3].

In naher Zukunft werden jedoch die nicht prädiktiven aktiven und semi-aktiven vertikalen Regeleinheiten in ihren Eigenschaften ausgereift sein. D.h. die Komforteigenschaften können mit den aktuellen Systemkomponenten nicht mehr entscheidend verbessert werden, da diese bzgl. der Dynamik der Aktoren und der vorhandenen Fahrzeugsensorik ausgereizt sind. Auch die zurzeit verwendeten Preview-Systeme sind in ihrer Funktionalität eingeschränkt. Aufgrund von wechselnden Umgebungsbedingungen und begrenztem Erfassungsbereich von Sensoren wie Kamera, Laser usw. neigen diese zu Fehlentscheidungen, da sie in ihrer prädiktiven Sichtweise eingeschränkt sind. Entsprechend sieht es bei den effizienzsteigernden Systemen aus. Als Folge der Elektro- und Hybridmobilität ist die Automobilindustrie besonders daran interessiert den Energieverbrauch ihrer Fahrzeuge zu senken, um maximale Reichweiten zu erzielen. Aber auch hier ist ein Umdenken notwendig. Einzelkomponenten werden in Zukunft keine entscheidenden Vorteile liefern, die gezielte Vernetzung der unterschiedlichen Systeme ist in diesem Zusammenhang zielführend.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept mit Backend-Datenanbindung (globale Serverdaten) und Schwarmdatenintelligenz vorgestellt. Durch diese zusätzliche (globale) Informationsquelle lassen sich bestehende Vertikaldynamiksysteme präadaptiv parametrisieren und plausibilisieren. Hierfür werden die gesammelten Straßeninformationen von den Fahrzeugen im Backend ausgewertet und in einer Daten-Infrastruktur hinterlegt. Das Ziel ist es, die gewonnen Informationen dem nachfolgenden Verkehr zur Verfügung zu stellen (Car-2-X Applications [4], [5]), sodass zum einen der Fahrkomfort durch Präadaptation der Verstelldämpfer optimiert und zum anderen der c_w -Wert reduziert sowie die Reichweiteneffizienz gesteigert werden, in dem das Fahrzeug situationsgebunden absenkt wird.

2. Vorstellung des Konzepts

Die Grundlage für das nachfolgend vorgestellte Konzept bilden aktive Luftfedern, mit deren Hilfe sich die Niveaulage des Fahrzeug bei wechselnden Beladungszuständen im Sekundenbereich variieren lässt, umso die Fahrsicherheit und die fahrdynamischen Eigenschaften sicherzustellen, und einer elektronische Dämpferregelung, welche die Dämpfungseigenschaften des Stoßdämpfers automatisch an die Fahrsituation anpasst, sodass die Aufbaubewegungen des Fahrzeugs minimiert und der Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn permanent sichergestellt bzw. die Radlastschwankungen reduziert werden. Bei der optimalen Niveaulage ergibt sich jedoch das nachfolgende Spannungsfeld, siehe Tabelle 1. Ebenfalls resultiert bei einer Dämpferregelung ein ähnlicher Zielkonflikt. Abhängig vom Straßenzustand und dem Auftreten von Einzelhindernissen ist eine verstärkte Aufbaudämpfung (Fahrkomfort) bzw. verringerte Radlastschwankung (Fahrsicherheit) zielführender.

Tabelle 1: Zielkonflikt zwischen Fahrzeugeigenschaften in Bezug zur Fahrzeughöhe

Fahrzeughöhe	niedrig	mittel	hoch
Fahrsicherheit/ Fahrdynamik	++	+	--
Fahrkomfort	--	+	++
Bodenfreigang/Bauteilschutz	--	+	++
Effizienz (strömungsoptimal)	++	-	--

In diesem Beitrag sollen diese Zielkonflikte durch zwei neuartige präadaptiver Regelstrategie weiter aufgelöst werden. Dabei kann für eine präadaptive Dämpfer- und Niveauregulierung ein Grundkonzept abgeleitet werden. Auf Basis der aktuellen GPS-Position des Fahrzeugs werden den beiden Regelstrategien prädiktive Streckeninformationen wie Straßenzustand bzw. Straßenklasse und Einzelhindernisse (bspw. Schlaglöcher oder Temposchwellen) zur Verfügung gestellt, sodass im Fall der Niveauregulierung die Fahrzeughöhe angepasst wird, um bspw. den Bodenfreigang des Fahrzeugs bei aufkommenden Hindernissen zu gewährleisten bzw. bei einer sehr guten Straße strömungsoptimal die maximale Reichweite zu erzielen. Bei der Dämpferreglung hingegen kann die Auslegung (bspw. sportlich, komfortorientiert) des Fahrwerks und der Federung angepasst werden, um so gleichzeitig die Fahrsicherheit und den Fahrkomfort zu steigern.

Für die Umsetzung der präadaptiven Regelstrategien müssen jedoch verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Zum einen liegen die notwendigen Straßeninformationen noch nicht vor, sodass diese in einem ersten Schritt, idealerweise von den Fahrzeugen selbst, generiert werden müssen (siehe Abs. 3). Dabei ist darauf zu achten, dass die gewonnen Informationen fahrzeugunabhängig und, um Bandbreite zu sparen, kompakt bzw. aussagekräftig sind, um eine breite Nutzung der Informationen zu ermöglichen. Zum anderen muss die Auswertung der gesammelten Schwarmdaten im Backend erfolgen (siehe Abs. 4) und die generierten Daten in einer aufbereiteten Form den nachfolgenden Verkehrsteilnehmern zur Verfügung gestellt werden. Dabei müssen die Informationen vom Up- und Download nicht zwangsläufig identisch sein, sondern durch Aggregation der Backend-Daten können auch neue Streckinformationen bereitgestellt werden.

3. Datengenerierung im Fahrzeug

Die notwendigen Straßeninformationen können auf Basis der Untersuchungen von [6] mit Hilfe eines modellbasierten Straßenbeobachters generiert werden. Das Fahrzeug wird dabei als eine Art Straßenbeobachter betrachtet, mit dessen Hilfe sich das vertikale Straßenhöhenprofil kontinuierlich über den vier Radaufstandspunkten rekonstruieren lässt. Der betrachtete Frequenzbereich der geschätzten Höhensignale beträgt dabei ca. 0.5 bis 15 Hz, was ebenso Einzelhindernisse wie bspw. Temposchwellen und Schlaglöcher mit einschließt. Die Schätzung eines absoluten (niederfrequenten) Höhenprofils, wie es bspw. von Navigationssystemen zur Verfügung gestellt wird, ist mit dieser Methode jedoch nicht möglich, [6].

Der Ansatz von [6] wird im Folgenden aufgegriffen und entsprechend für eine Straßenklassifizierung und Einzelhindernisdetektion im Fahrzeug erweitert, siehe Bild 1. Mit Hilfe des Straßenbeobachters erfolgt die Bewertung der gesamten Straße in zwei Schritten. Zum einen wird der Straßenzustand nach ISO8608:1995(E) [7] auf Basis der Betrachtung des Frequenzbereichs ermittelt, siehe Bild 2 und 3. Alternativ kann auch die Bewertung der Fahrbahn nach [8] Anwendung finden. Für weiterführende Literatur sei an dieser Stelle auf [9], [10] verwiesen. Zum anderen erfolgt die Detektion der Einzelhindernisse im Zeitbereich, siehe Bild 4.

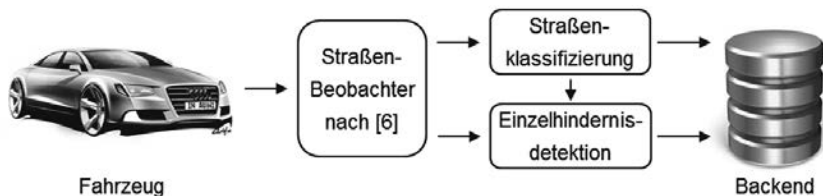


Bild 1: Schema der einseitigen Datenübertragung vom Fahrzeug zum Backend

In der Regel weist ein reales Fahrbahnoberflächenprofil keine periodischen Unebenheiten auf. Regellose bzw. stochastische Fahrbahnunebenheiten nehmen den größten Anteil im Straßenverlauf ein. Für die Beschreibung einer solchen stochastischen Fahrbahnanregung wird in der Literatur häufig die spektrale Unebenheitsdichte $\Phi(\Omega)$ zur Wegkreisfrequenz Ω verwendet. Diese beschreibt in Analogie zur Spektralen Leistungsdichte eines Signals den Erwartungswert für die quadrierte Amplitude je zugehöriger Frequenz im Spektrum, [8] - [11]. Die spektrale Unebenheitsdichte $\Phi(\Omega)$ lässt sich aufgrund von verschiedenen realen Fahrbahnhöhenprofilvermessungen [8] , [11] und den kaum vorhandenen periodischen Anteil im Straßenhöhenprofil standardisiert durch das Potenzgesetz nach (1) und den Begriffen der

Welligkeit w der Straße und des Unebenheitsmaßes Φ_0 zur Bezugswegkreisfrequenz Ω_0 approximieren, siehe [8] - [11]:

$$\Phi(\Omega) = \Phi_0(\Omega_0) \cdot \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-w}, \quad \Omega > 0 \quad (1)$$

Auf diese Art und Weise lässt sich ebenfalls die Straßenklassifizierung auf die Bezugsgrößen: Welligkeit w und Unebenheitsmaß Φ_0 reduzieren. Eine Möglichkeit der Klassifizierung ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt, siehe Bild 2.

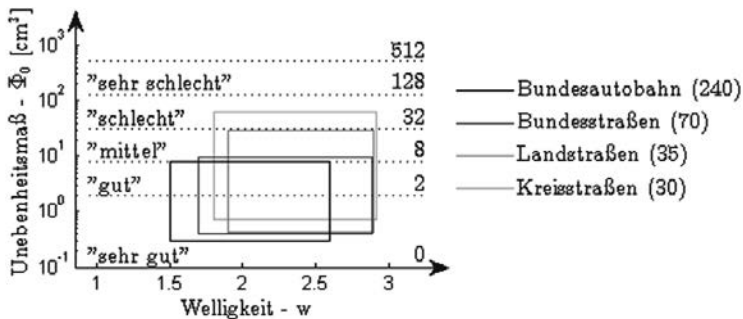


Bild 2: Grafische Darstellung der Ergebnisse von [8] auf verschiedenen Straßenklassen inkl. der Anzahl an Messstrecken in Klammern und der 5-stufigen Straßenklassifizierung nach ISO8608:1995(E) [7] zur Bezugswegkreisfrequenz $\Omega_0 = 1 \text{ m}^{-1}$

Aufgrund der Überlappungen der Straßenklassen von [8] ist diese Zuordnung nicht eindeutig. Aus diesem Grund wird sich im Folgenden für die Klassifizierung nach [7] entschieden. Wie sich die Straßenklassifizierung im Einzelnen zusammensetzt, kann der nachfolgenden Prozesskette entnommen werden, siehe Bild 3.

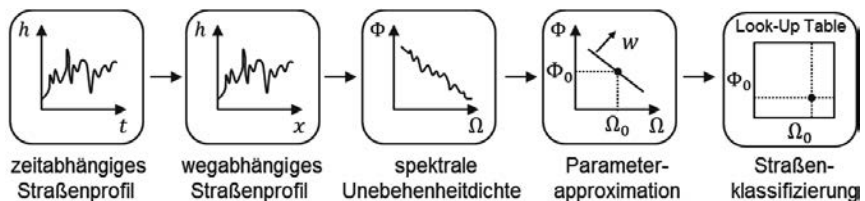


Bild 3: Konzept der fahrzeugseitigen Straßenklassifizierung

Ebenso kann für die Einzelhindernisdetektion auf Basis des zeitlichen Straßenhöhenprofils die nachfolgende Klassifizierung verwendet werden, siehe Bild 4. Dabei wird die Einzel-

hindernisdetektion von der zuvor vorgestellten Straßenklassifizierung beeinflusst. Auf diese Weise lassen sich straßenspezifische Einzelhindernisse detektieren.

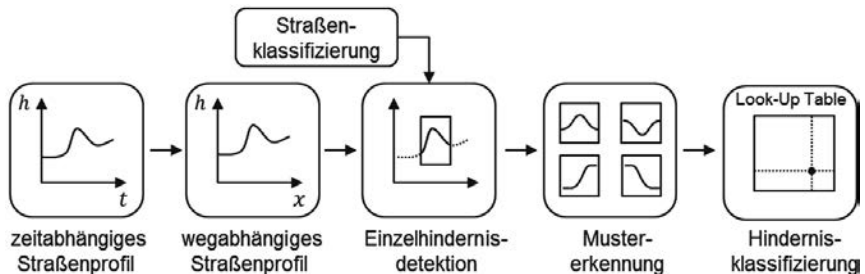


Bild 4: Konzept der fahrzeugseitigen Einzelhindernisdetektion

Somit kann sowohl eine Aussage über den aktuellen Straßenzustand als auch Einzelhindernisse im Fahrzeug getroffen werden. Die gewonnenen Daten können im Anschluss positionsabhängig ans Backend übermittelt und über die Fahrzeugflotte plausibilisiert werden.

4. Datenübertragung und -verarbeitung im Backend

Für die Übertragung der Straßeninformationen zwischen Fahrzeug und Backend gibt es verschiedene Möglichkeiten. Je nach zeitlichen Anforderungen können die Daten einzeln oder auch paketiert online (je nach Verfügbarkeit) mit Hilfe vom GSM-Standard bzw. UMTS oder LTE bei höherer Datenrate übermittelt werden [12]. Sind die zeitlichen Anforderungen der Datenübertragung gering, so ist ebenfalls eine temporär Datenübertragung via WLAN denkbar. Diese eignet sich jedoch nur, wenn sich die Straßeninformationen nicht permanent aktualisieren und die fahrzeugseitige Speicherkapazität entsprechend ausgelegt ist.

Das Ziel der Datenverarbeitung im Backend ist es, die gesammelt Schwarmdaten durch *Map Matching* [13] und *Clustering* [14] zu verknüpfen und anschließend neue Daten zu aggregieren. Im Fall der vorgestellten präadaptiven Regelstrategien bedeutet dies die Zuordnung der ermittelten Straßenkategorien und Einzelhindernisse zu einer digitalen Karte. Dieser Prozess wird als *Map Matching* bezeichnet. Sobald die verschiedenen Straßenabschnitte mehrfach von den Verkehrsteilnehmern befahren wird, erfolgt der zweite Schritt der Verarbeitung, dass sogenannte *Clustering*. Dieser Prozess definiert die Zugehörigkeit der Daten unter verschiedenen Aspekten wie bspw. Objekttyp, Verortung oder zeitlicher Verfügbarkeit. Damit lassen sich im Anschluss der Event-Typ, die GSP-Position, die Richtungsabhängigkeit oder die Überfahrgangswahrscheinlichkeit aggregieren und über Laufzeit aktualisieren, siehe Bild 5.

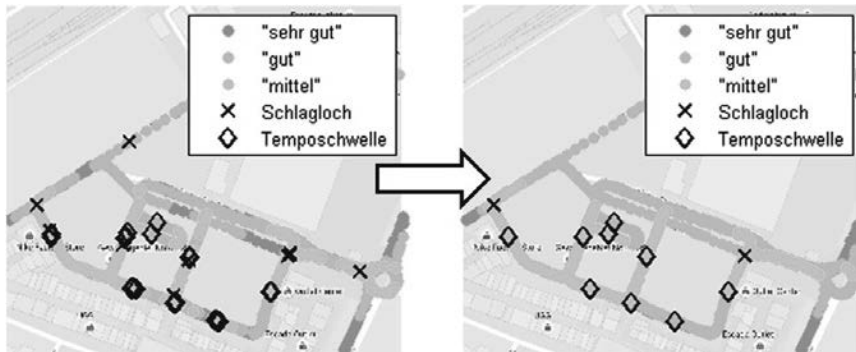


Bild 5: Konzept der Datenverarbeitung im Backend, ausgehend von den Schwarzwerten (Rohwerten) bei Mehrfachbefahrung links zu den aggregierten Daten rechts

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag stellt ein Konzept zur präadaptiven Dämpfer- und Niveauregulierung auf Basis von Backend-Daten vor. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der fahrzeugseitigen Datengenerierung und der Verarbeitung im Backend. Es wurde gezeigt, dass mit Hilfe eines Straßenbeobachters und der Auswertung des geschätzten Straßenhöhenprofils im Frequenzbereich die Straßenkategorie nach ISO8608:1995(E) ermittelt und Einzelhindernisse im Weg-/Zeitbereich detektiert werden können. Anschließend wurde ein Konzept zur Aggregation der generierten Schwarzwerten im Backend vorgestellt. Dabei ließ sich ein vereinheitlichter Prozess ableiten, welcher sowohl Linien-Events (Straßenklasse) bzw. Punkt-Events (Einzelhindernisse) verarbeitet. Die gewonnen Informationen können im Anschluss von den präadaptiven Regelstrategien genutzt werden, um den Fahrkomfort und die Niveaulage zu optimieren.

Anhand der in diesem Beitrag generierten Schwarzwerten im Backend lassen sich für die Zukunft noch weitere Use Cases ableiten:

- Auf Grundlage der Straßenklassifizierung kann die Routenberechnung des Navigationssystems erweitert werden, sodass als weiteres Kriterium für die Berechnung der Straßenzustand, bspw. nach dem Vorbild von [5], berücksichtigt wird.
- Auf Basis der Straßenzustandsgegebenheiten können die Bauteilbelastung des Fahrwerks in einem Land/Region analysiert und optimiert werden.
- Die Wartungsintervalle des Fahrzeugs können durch Auswertung der unterschiedlichen Straßeneinflüsse adaptiert und die Ausfallwahrscheinlichkeit reduziert werden.

- [1] Yamamoto, M. ; Hashiguchi, M. ; Nakagawa, S. : *Chassis, Control Systems and Equipment*, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 67-69, 2013-2015.
- [2] Reif, K. : *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik*, 6. Auflage, Bosch Fachinformation Automobil, Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [3] Schiergl, A. : *Verfahren zum Betreiben eines Antriebsstrangs eines Kraftfahrzeugs mit Freilauf-Motor-Aus-Funktion, sowie Steuergerät und Kraftfahrzeug*, Offenlegungsschrift DE102 012 008 632A1, 2013.
- [4] Li, Z. : *Developments in Estimation and Control for Cloud-Enabled Automotive Vehicles*, University of Michigan, Diss., 2016
- [5] Li, Z. ; Kolmanovsky, I. V. ; Atkins, E. M. ; Lu, J. ; Filev, D. P. ; Bai, Y. : *Road Disturbance Estimation and Cloud-Aided Comfort-Based Route Planning*. In: IEEE Transactions on Cybernetics PP (2016), Nr. 99, S. 1-13
- [6] Noll, A. ; Ament, C. : *Accuracy and Robustness of Road Observers with Uncertainties for Reconstruction of the Road Elevation Profile*. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2016
- [7] ISO 8608, *Mechanical Vibration - Road Surface Profiles - Reporting of Measured Data*, International Organization for Standardization, ISO 8608:1995(E), 1995.
- [8] Braun, H. ; Hellenbroich, T. : *Messergebnisse von Straßenunebenheiten*, In: Unebenheiten von Schiene und Straße als Schwingungsursache, Bd. 877, VDI-Verlag Düsseldorf, 1991, S. 47-80.
- [9] Mitschke, M. ; Wallentowitz, H. : *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. 5. Aufl. Springer Vieweg, 2014 (VDI-Buch)
- [10] Zeller, P. : *Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch; mit 43 Tabellen*. 2. Aufl. Vieweg + Teubner, 2012 (ATZ-MTZ Fachbuch).
- [11] Braun, H. : *Untersuchung von Fahrbahnunebenheiten und Anwendung der Ergebnisse*. Technischen Universität Braunschweig, Diss., 1969.
- [12] Sauter, M. : *From GSM to LTE-Advanced: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*. Wiley, 2014
- [13] White, C. E. ; Bernstein, D. ; Kornhauser, A. L.: *Some map matching algorithms for personal navigation assistants*. In: Transportation research part c: emerging technologies 8 (2000), Nr. 1, S. 91-108
- [14] Berkhin, P. : *A Survey of Clustering Data Mining Techniques*. In: Grouping Multidimensional Data. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, S. 25-71

Methodik zur Objektivierung einer Querführungsassistenz

M. Sc. **Hendrik Oschlies**, Dipl.-Ing. **Falko Saust**,
Volkswagen AG, Wolfsburg;
Jun.-Prof. Dr.-Ing. **Stephan Schmidt**, Institut für Mobile Systeme,
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Kurzfassung

Heutige Fahrerassistenzsysteme ermöglichen eine wesentliche Komfortsteigerung und können einen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit leisten, weshalb sie sich immer größer werdender Beliebtheit erfreuen. In den letzten Jahren unterlagen die Fahrerassistenzsysteme einer sehr hohen Entwicklungsdynamik und sind durch die Demokratisierung heute fester Bestandteil in zahlreichen Fahrzeugklassen. [4]

Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, mittels virtueller Methoden den Applikationsaufwand zu reduzieren. Eine wesentliche Komponente stellt dabei die Objektivierung des Systemverhaltens dar.

In diesem Beitrag wird eine Methodik für eine präzise subjektive und objektive Bewertung durch einen eigens entwickelten und validierten Fragebogen sowie ein aufeinander abgestimmtes Messequipment vorgestellt. Eine valide Datenbasis für die Objektivierung wurde mittels einer Probandenstudie auf einer Strecke mit hohem Geradeausanteil sowie auf einer Strecke mit hoher Krümmungsvariation geschaffen. Mit der hier gezeigten Methodik ist es möglich, einen Zusammenhang zwischen den Subjektivnoten der Normalfahrer und den objektiven Kennparametern zu finden. Im Rahmen der Veröffentlichung werden erste Ergebnisse aus der Probandenstudie anhand eines Bewertungskriteriums für eine Strecke gezeigt. Die Ergebnisse werden weiterführend für eine nachhaltige Weiterentwicklung eines Spurhalteassistenten genutzt.

1. Motivation

Die aktuelle Entwicklung und Applikation von Assistenzsystemen erfolgt hauptsächlich mit Hilfe von Realfahrversuchen. Vor dem Hintergrund, dass die Anzahl an Fahrzeugmodellen in den letzten Jahren stetig gestiegen ist und dieser Trend weiterhin anhält, bedeutet dies aufgrund einer Vielzahl an Parametern und unter der Annahme, dass für jedes Fahrzeugmodell eine eigene Applikation erforderlich ist, einen erheblichen Mehraufwand für die Entwicklung

solcher Systeme [17]. Virtuelle Methoden können eine Möglichkeit sein, den Applikationsaufwand zu reduzieren. Für die Entwicklung solcher Methoden ist es zunächst notwendig, das Systemverhalten zu analysieren und sowohl subjektiv als auch objektiv zu bewerten. In diesem Beitrag wird diese Objektivierung am Beispiel einer Querverführungsassistenz, die das Fahrzeug durch kontinuierliche Lenkeingriffe in der Spurmitte hält, erläutert. Aufgrund der kontinuierlichen Eingriffe ist ein für den Kunden möglichst „angenehmes“ Lenkverhalten erforderlich.

Durch die Demokratisierung von Fahrerassistenzsystemen rücken diese zunehmend auch in das Interesse von Fachzeitschriften. Beispielsweise haben die Zeitschrift „Auto, Motor und Sport“ im Jahr 2014 und der Allgemeine Deutsche Automobil-Club e. V. (ADAC) im Jahr 2015 Spurhalteassistenten von verschiedenen Herstellern getestet. Die Zeitschrift „Auto, Motor und Sport“ hat sechs Probanden auf ausgewählten Überlandstrecken die Systeme bewerten lassen. Die Probanden mussten nach einer Fahrt jeweils einen Fragebogen zu den Themen *Lenkeingriff*, *Intensität der Warnungen* und *Bedienung* ausfüllen. Der Test vom ADAC wurde mit 15 Probanden auf der Autobahn bei 130km/h und auf der Landstraße mit 100km/h durchgeführt. Die Strecken beinhalteten gerade und kurvige Abschnitte sowie Unterführungen. Die Probanden bewerteten *die Warnung/Eingriff des Systems*, *den Zeitpunkt der Warnung oder des Eingriffs*, sowie *die Anzahl der Fehlwarnungen*. Im Anschluss gaben die Probanden an, ob sie sich ein solches System im eignen Fahrzeug wünschen würden. Beide Tests sind allerdings sehr subjektiv, da nur wenig physikalische Größen für eine Objektivierung erhoben wurden. Eine wissenschaftliche Methodik zur Objektivierung von automatischen Fahrfunktionen und des Fahrerassistenzsystems ACC werden in [10] und [14] vorgestellt.

In dem hier vorgestellten Beitrag wird zukünftig im Rahmen der Objektivierung ein Gütekriterium zur Beschreibung der menschlichen Wahrnehmung der Fahrzeugquerführung abgeleitet. Mit diesem Gütekriterium kann eine auf die Kundenbedürfnisse zugeschnittene Systemauslegung gezielt und objektiv entwickelt werden. Durch Nutzung einer Simulationsumgebung können die Ergebnisse der Objektivierung frühzeitig für eine Systemauslegung verwendet werden.

2. Methodik

Für die genannten Herausforderungen wurde eine geeignete Methodik für die Systemauslegung und –bewertung des Spurhalteassistenten auf verschiedenen Strecken mit einem geeigneten Messequipment entwickelt. Für die Erhebung der subjektiven und objektiven Daten wurde eine Probandenstudie zum Fahr- und Lenkverhalten des Spurhalteassistenten durch-

geführt. Die Studie wurde auf einem geraden Autobahnabschnitt und auf einem kurvigen Teilstück durchgeführt, da der Fokus der Nutzung des Assistenten auf Autobahnen oder Landstraßen mit baulicher Trennung liegt. [18]

2.1 Erhebung der subjektiven Daten

Die Erhebung der subjektiven Daten wurde mit 29 Probanden aus der Volkswagen-internen Probandendatenbank durchgeführt. Es nahmen nur Probanden teil, die angaben, dass sie einen Spurhalteassistenten täglich oder mehrmals die Woche nutzen. Es nahmen 28 männliche und eine weibliche Probanden teil und diese waren zwischen 25 und 60 Jahren alt. Die Probandenstudie wurde auf einer Strecke mit hohem Geradeausanteil sowie einer Strecke mit hoher Krümmungsvariation durchgeführt. Die Geradeausfahrt wurde auf der Schnellbahn auf dem VW-Prüfgelände (PG) in Ehra-Lessien und die Kurvenfahrt auf einem Teilstück der A39 bei Wolfsburg durchgeführt. Während der Kurvenfahrt befand sich das System in der Nähe der Systemgrenze für ein Komfortsystem. Die Versuchsdauer betrug pro Proband im PG Ehra 3,5h und auf der A39 2,5h. Im Rahmen der Studie wurde insgesamt eine Strecke von 7500km zurückgelegt. Alle 29 Probanden haben an beiden Versuchen teilgenommen.

Für die Erhebung der subjektiven Daten wurde ein Fragebogen entwickelt. Ein Teil des Fragebogens enthält personenbezogene Fragen, wie Geschlecht, Altersgruppe und jährliche Fahrleistung. Darüber hinaus wurden Fragen zur bevorzugten Fahrweise nach [1] erhoben. Des Weiteren wurden die Vorerfahrung und die eigenen Erfahrungen im Umgang mit Fahrerassistenzsystemen sowie die technische Affinität nach [12] abgefragt. Über die Versuchsdauer gleichmäßig verteilt wurden die aktuelle Anspannung, Leistungsfähigkeit und Aktivierung der Probanden abgefragt, um Einflüsse der Versuchsdauer auf das aktuelle Befinden zu kontrollieren.

Ein weiterer Teil des Fragebogens wurde in einem mehrstufigen Verfahren in Anlehnung an [15] entwickelt. Dazu wurden Bewertungskriterien wie beispielsweise die *Qualität der Spurführung* definiert. Zum besseren Verständnis für die Probanden wurden für jedes Bewertungskriterium gegensätzlich (bipolar) formulierte Adjektive generiert. Die Adjektive wurden mit Hilfe von Experten in die Kategorie geeignet und ungeeignet für die Bewertung des jeweiligen Kriteriums unterteilt. Im Rahmen von Vorversuchen wurden die Bewertungskriterien mit den dazu passenden bipolaren Adjektiven angewendet und validiert.

Während der Durchführung der Probandenstudie wurden die bipolaren Adjektive auf einer siebenstufigen Skala bewertet. Die passenden Bewertungskriterien wurden auf einer 10er-Skala bewertet (siehe Tabelle 1).

Im gezeigten Versuchsaufbau werden die einzelnen CAN-Kanäle mit Hilfe eines Bus-Interfaces VN 1630 der Firma Vector auf einem Laptop zeitsynchron gespeichert. An diesem Interface sind die fahrzeuginterne Sensorik und das Fahrdynamikmesssystem angebunden. Die ADMA-G des Herstellers Genesys ist zusätzlich noch mit dem Dewe 211- Rechner der Firma Dewetron verbunden. Mit Hilfe des Rechners sind eine Live-Darstellung der gemessenen Größen und eine objektive Versuchsgüteüberprüfung möglich.

Die verbaute Multifunktionskamera (MPC 2) der Firma Bosch stellt die Spurdaten der Micro-AutoBox II und der Vector Box VN1630 zur Verfügung.

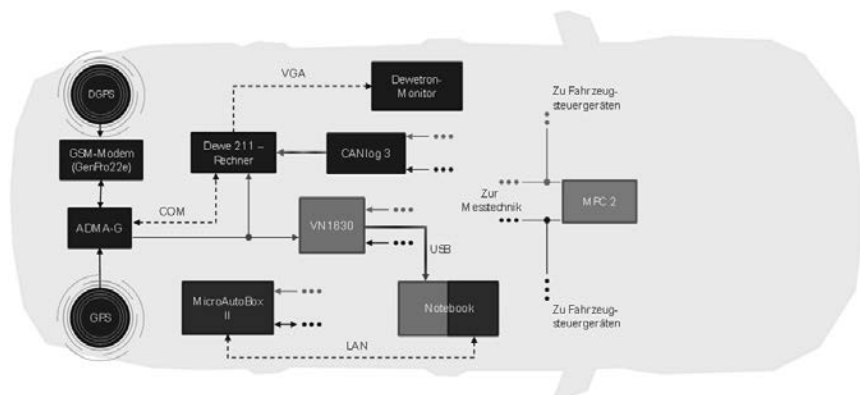


Bild 2: Messtechnikaufbau im Versuchsträger

Im Rahmen der vorbereitenden Applikationsarbeit wurden Systemauslegungen generiert und in Vorversuchen mit Expertenfahrern vier Auslegungen ausgewählt. Die Auslegungen wurden nach ihrem Potential für die größte subjektive Notenspreizung selektiert.

In Bezug auf den lateralen Abstand weisen die vier ausgewählten Varianten die in Abbildung 3 gezeigte Spreizung auf. Zur besseren Lesbarkeit sind nur die beiden Varianten mit der größten Spreizung B und C dargestellt.

Die Auslegung B kann durch eine geringe Anbindung an die Fahrspurmitte beschrieben werden. Die Auslegung C hingegen weist eine sehr direkte Anbindung an die Fahrspurmitte auf. Die Systemauslegungen A und D liegen hinsichtlich des lateralen Abstandes dazwischen. Des Weiteren unterscheiden sich die Auslegungen deutlich in der Lenkrad-Aktivität und den resultierenden Gierraten.

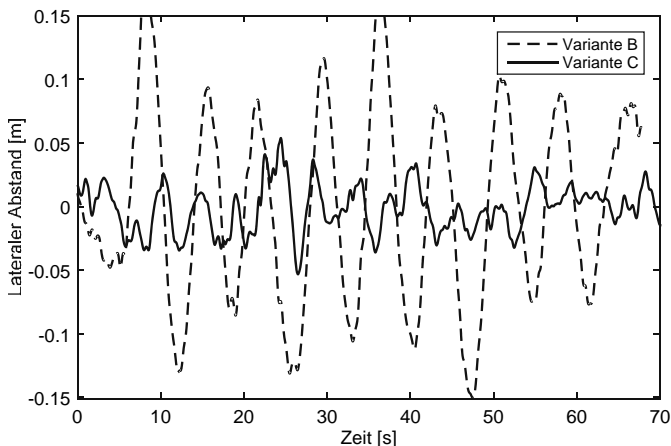


Bild 3: Maximale Spreizung der Systemauslegungen in Bezug auf den lateralen Abstand

3. Auswertung

Im Folgenden wird eine Auswertung der Probandenstudie am Beispiel eines Bewertungskriteriums vorgenommen. In Abbildung 4 ist das Vorgehen für die Auswertung dargestellt. Die Vorgehensweise zur Definition von Adjektiven und Bewertungskriterien im ersten Schritt ist bereits in Abschnitt 2 dargestellt worden, das entsprechende Verfahren zur Definition von Kennparametern wird im Folgenden erläutert.

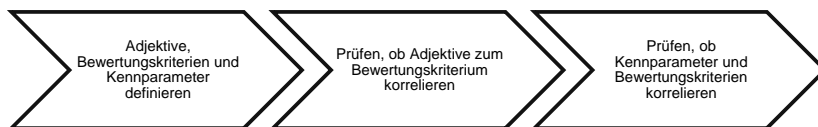


Bild 4: Vorgehen bei der Auswertung der Probandenstudie

Um die Belastbarkeit der subjektiven Daten nachzuweisen, wurde mittels einer Korrelation überprüft, ob die bipolaren Adjektive mit dem Bewertungskriterium in Beziehung stehen. Von einem starken Zusammenhang kann nach [2, 5, 6, 8, 13, 16] bei einer Korrelation von $r > 0,6$ gesprochen werden. In Tabelle 3 ist exemplarisch die Korrelation zwischen den bipolaren Adjektiven, die dem Bewertungskriterium *Spurführung* zugeordnet sind, und dem Bewertungskriterium *Spurführung* zu sehen. Die Korrelation zwischen den Adjektiven und dem Be-

wertungskriterium ist bei fast allen Adjektiven sehr hoch. Ein Grund für die geringe Korrelation bei dem Adjektivpaar „tolerant – intolerant“ ist möglicherweise, dass die Bedeutung des Adjektivpaares genau die umgekehrte Logik zu den anderen Adjektiven aufweist und diese Tatsache von den Probanden während der Versuche nicht erkannt wurde.

Tabelle 3: Korrelation zwischen dem Bewertungskriterium *Spurführung* und den bipolaren Adjektiven

Adjektive	Korrelationskoeffizient r
an Straßenverlauf unmittelbar gekoppelt	dem Straßenverlauf nur schleppend folgend 0.84
genau	ungenau 0.91
starr	flexibel 0.72
folgsam	unfolgsam 0.90
eng	weit 0.86
präzise	unpräzise 0.89
tolerant	intolerant 0.01
bestimmt	unbestimmt 0.76
exakt	nachlässig 0.87
beständig	schwankend 0.88
passend	unpassend 0.93

In Abbildung 5 sind die Ergebnisse aus den durchgeführten Paarvergleichen zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Präferenz in den Paarvergleichen immer Systemauslegung A oder D ist. Bei einem direkten Vergleich wird die Auslegung D gegenüber der Auslegung A bevorzugt. Ein Großteil der Probanden gibt an, dass die Auslegung D bevorzugt wird, weil

- sie nur sehr geringe und sanfte Lenkradbewegungen aufweist,
- sie sehr präzise die Spur hält und
- sie geringere Querschleunigungen aufweist.

Mit dem Paarvergleich wird gezeigt, dass Normalfahrer eine deutliche Unterscheidung der einzelnen Systemauslegungen wahrnehmen und somit ist eine Beurteilung der Bewertungskriterien der einzelnen Auslegungen möglich.

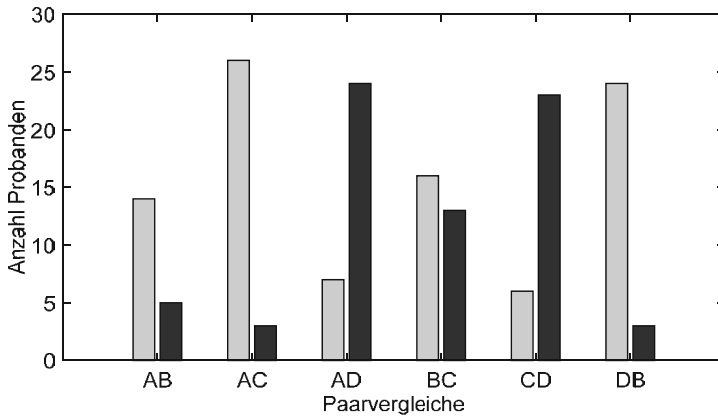


Bild 5: Ergebnisse des Paarvergleichs von der Strecke mit hohem Geradeausanteil

In Abbildung 6 sind die Bewertungen der Probanden für das Bewertungskriterium *Spurführung* zu entnehmen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Auslegung D gegenüber den anderen Auslegungen besser bewertet wird.

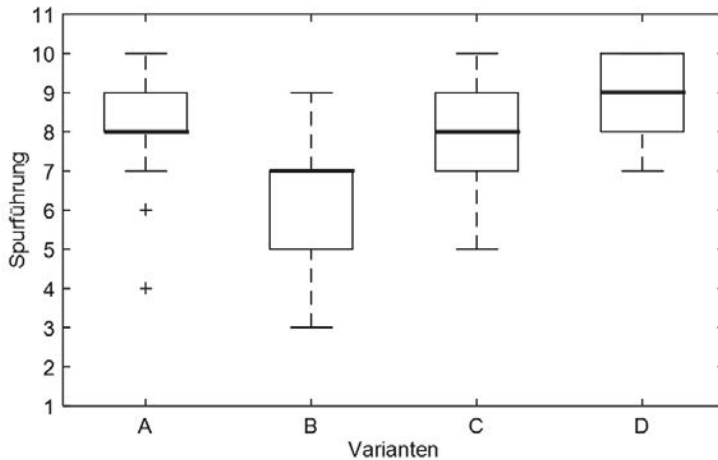


Bild 6: Noten für das Bewertungskriterium *Spurführung* von der Strecke mit hohem Geradeausanteil

Die weitere Auswertung der Probandenstudie soll ebenso exemplarisch am Bewertungskriterium der *Spurführung* durchgeführt werden. Dazu werden objektive Parameter aus den Versuchsfahrten extrahiert. Für die Beschreibung der *Spurführung* wurden u. A. die Kennparameter absoluter Mittelwert (KP 1), Interquartilsabstand (KP 2) und das Maximum der FFT (KP 3) definiert. Der Interquartilsabstand beschreibt die Differenz zwischen dem 25. und 75. Perzentil. Der Kennparameter Maximum der FFT beschreibt das Maximum der FFT der Spurmittenabweichung. Zur Bewertung der Kennparameter wird das Robustheitsmaß nach [11] verwendet. Das Maß ist wie folgt definiert:

$$R = 1 - \frac{\text{Messvarianz}}{\text{Variantenvarianz}} > 0.55$$

Die Variantenvarianz bildet die Bandbreite der Systemauslegungen ab. Für die statistische Auswertung wurden die Kennparameter und die Subjektivnoten auf Ausreißer, gleiche Erwartungswerte und Mittelwerte getestet. Zusätzlich wurden die Subjektivnoten normiert, da die Probanden unterschiedliche Erwartungshorizonte und unterschiedliche Bereiche der Bewertungsskala nutzen könnten. Die Ausreißer wurden nach dem Verfahren von Dean Dixon ermittelt und entfernt. Der Test auf gleiche Erwartungswerte wurde mit einem zweiseitigem F-Test mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ durchgeführt. Ein zweiseitiger T-Test wurde für den Test auf gleiche Mittelwerte mit dem gleichen Signifikanzniveau durchgeführt. [3] Der Zusammenhang zwischen den Subjektivnoten und den Kennparametern wird mittels einer Korrelation nach Pearson überprüft.

Die Ergebnisse der drei exemplarisch vorgestellten Kennparameter sind in Tabelle 4 zu sehen. Damit wird gezeigt, dass die Kennparameter eine robuste Beschreibung des Signalverlaufs ermöglichen. Weiter wird durch die Korrelation nachgewiesen, dass ein Zusammenhang zwischen den Kennparametern und dem Bewertungskriterium *Spurführung* besteht. Die vorgestellten Kennparameter sind damit geeignet, das Subjektivempfinden der Probandengruppe zur *Spurführung* objektiv zu beschreiben, und können für weiterführende Arbeiten zur Bewertung des Systemverhaltens von Spurhalteassistenten verwendet werden.

Tabelle 4: Ergebnisse der Korrelation zwischen dem Bewertungskriterium *Spurführung* und den Kennparametern

Kennparameter	Robustheitsmaß	Korrelationskoeffizient r
KP 1	0.65	0.61
KP 2	0.74	0.72
KP 3	0.69	0.66

4. Zusammenfassung

Für eine kundenoptimale Auslegung des Spurhalteassistenten ist es notwendig, eine ganzheitliche subjektive und objektive Analyse und Bewertung durchzuführen. Mit der hier vorgestellten Methodik, dem Fragebogendesign und dem beschriebenen Messequipment werden reproduzierbare Ergebnisse erzielt.

Es konnte nachgewiesen werden, dass Normalfahrer mit der hier dargestellten Spreizung zwischen den einzelnen Systemauslegungen, die durch Expertenfahrer appliziert wurden, eindeutige Präferenzen äußern können. Es hat sich weiter gezeigt, dass die Probanden mehrheitlich einen Spurhalteassistenten mit einer sehr geringen Lenkradaktivität und einer präzisen *Spurführung* bevorzugen.

Darüber hinaus konnte am Beispiel des Bewertungskriteriums *Spurführung* nachgewiesen werden, dass die Beurteilung der Bewertungskriterien mit den einzelnen bipolaren Adjektiven mit Normalfahrern möglich ist. Hier konnte mit einer Korrelation zwischen dem Bewertungskriterium und den bipolaren Adjektiven ein Zusammenhang nachgewiesen werden. Darüber hinaus wurde am Beispiel von drei Kennparametern ein Zusammenhang zu den Subjektivnoten festgestellt.

Im Rahmen der Objektivierung eines Spurhalteassistenten werden die Ergebnisse für eine simulationsbasierte Grundapplikation genutzt. Für ein ganzheitlich verbessertes Verhalten des Spurhalteassistenten werden die gewonnen Erkenntnisse aus den beiden Manövern für zukünftige Reglerauslegungen verwendet.

Literatur

- [1] Assmann, E.: Untersuchung über den Einfluss einer Bremsweganzeige auf das Fahrerverhalten. Dissertation TU München, 1985
- [2] Cohen, J.: Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates. 1988
- [3] DIN53804-1: 2002. Statistische Auswertungen – Teil 1: Kontinuierliche Merkmale
- [4] Ebner, H.-T.: Motivation und Handlungsbedarf für Automatisiertes Fahren, DVR-Kolloquium Automatisiertes Fahren, 2013
- [5] Freyer, J.: Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung des Spurwechselverhaltens von ACC. Dissertation TU München, 2008
- [6] Fritsche, M.: Ein Beitrag zur Objektivierung des Sicherheitsempfindens mit Fahrermodellen bei Lenkstörungen. Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2016
- [7] GeneSys Elektronik GmbH: ADMA: Automotive Dynamic Motion Analyzer. Offenburg. 2004
- [8] Griesche, S.: Soll mein Auto so fahren wie ich? – Welchen Fahrstil präferieren Fahrer für die Auslegung automatisierter Fahrzeugfunktionen. DLR Braunschweig, 2016
- [9] Heißing, B.; Brandl, H. J.: Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens. Würzburg: Vogel Fachbuch Verlag, 2002
- [10] Holzinger, J.; Schöggel, P.; Schrauf, M.; Bogner, E.: Objektivierung der Fahrbarkeit beim automatisierten Fahren. ATZ 116, 2014
- [11] Huneke, M.: Fahrverhaltensbewertung mit anwendungsspezifischen Fahrdynamikmodellen. Dissertation TU Braunschweig, 2012
- [12] Janneck, M.: Entwicklung und Validierung eines Fragebogens zum Technikbezogenen Selbstkonzept (TSK): Eine gendersensitive Studie. Lübeck Springer, 2012
- [13] Kronthaler, Franz: Statistik angewandt: Datenanalyse ist (k)eine Kunst mit dem R Commander. Heidelberg: Springer, 2016
- [14] Pawellek, T.; Liesner, L.; Henze, R.; Küçükay, F.: Objektivierungsverfahren für eine kundenoptimale ACC-Systemauslegung. ATZ 118, 2016
- [15] Rothhämmel, M.: On a Method for Generating a Word Pool fort he Description of Steering Feel. Södertälje, 2010
- [16] Schmidt, G.: Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente. Dissertation TU Braunschweig, 2009
- [17] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Jahresbericht Auto 2003. Frankfurt: VDA, 2002
- [18] Volkswagen AG: Selbststudienprogramm 418: Der Spurhalteassistent. Wolfsburg, 2008

Maschinelles Lernen Aktiver Sicherheitssysteme am Beispiel Fußgängerschutz

Markus Schratter, Univ.-Doz. Dr. **Daniel Watzenig**,
Kompetenzzentrum – Das virtuelle Fahrzeug Forschungs-
gesellschaft mbH, Graz;
Dr.-Ing. **Thomas Schaller**, BMW Group, München

Kurzfassung

Hochautomatisiertes Fahren eröffnet mittelfristig neue Perspektiven der Mobilität und steht stark im Fokus bei der Entwicklung zukünftiger Fahrzeuge. Fahrzeuge mit Hochautomatisierten Fahrfunktionen werden dazu mit umfangreicher Technologie ausgestattet. Durch die Nutzung dieser Technologien besteht Potential zur Verbesserung bestehender Systeme der Aktiven Sicherheit¹, die den Fahrer im nicht-hochautomatisierten Fahrmodus unterstützen und damit die Verkehrssicherheit erhöhen. In diesem Beitrag wird eine Methodik betrachtet, bei der anhand aufgezeichneter Verkehrssituationen die Funktionsauslegung Aktiver Sicherheitssysteme durch maschinelles Lernen am Beispiel des aktiven Fußgängerschutzes evaluiert wird. Der Grundgedanke ist dabei, vorhandenes Wissen bestehender Unfälle optimal zu nutzen, indem der Unfallverlauf direkt in die Funktionsauslegung miteinfließt.

1. Motivation aus Sicher der Aktiven Sicherheit

Aktive Sicherheitssysteme adressieren bereits heute einen hohen Anteil der häufigsten Verkehrsunfälle. Die Analyse von Unfallophäufungen und daraus abgeleitet die Anforderungen an Aktive Sicherheitssysteme erfolgt durch Experten, die abwägen, was technisch sinnvoll und machbar ist. Zur Unfallanalyse werden dafür einerseits Unfalldatenbanken mit einer großen Anzahl an Unfällen mit wenig detaillierten Informationen (Kollisionsgeschwindigkeit, Kollisionspunkt, Uhrzeit, etc.) verwendet (z. B. DESTATIS). Andererseits werden Datenbanken mit wenigen realen Unfällen verwendet, die dafür aber einen detaillierten Unfallhergang beinhalten (z. B. GIDAS Pre-Crash-Matrix [1]). Dazu wird der Unfallhergang durch eine genaue Vermessung der Unfallstelle und aus Analysen der Unfallfolgen rekonstruiert.

1.1 Komplexität und Variation von Verkehrsunfällen

¹ Aktive Sicherheitssysteme bezeichnen in diesem Beitrag Systeme, die dem Fahrer Informationen zur Verfügung stellen oder Eingriffe in die Fahrzeugführung vornehmen.

Aktuell adressieren Aktive Sicherheitssysteme die häufigsten Unfalltypen mit den dazugehörigen häufigsten Unfallursachen (z. B. querender Fußgänger, Unaufmerksamkeit). Dabei erfolgt eine Analyse, welche Einflussfaktoren notwendig sind, um diesen Unfalltyp zu adressieren, z. B. beim aktiven Fußgängerschutz die Position des Fußgängers. Diese Vorgehensweise funktioniert sehr gut und eine hohe Abdeckung im Feld wird damit erreicht, siehe in [2]. Eine Analyse aus Unfalldaten durch [3] hat gezeigt, dass bereits 50% aller Unfälle durch die 26 häufigsten Unfalltypen-Unfallursachen-Kombinationen abgedeckt werden (dargestellt in Bild 1). Jedoch werden die restlichen 50% der Unfälle durch 5287 möglichen Kombinationen von Unfalltypen und Unfallursachen verursacht.

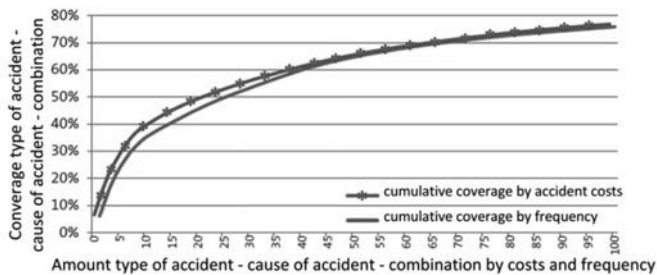


Bild 1: Kumulative Abdeckung der Unfälle bezogen auf die Unfalltypen-Unfallursachen-Kombinationen [3]

Durch Bild 1 ist gut ersichtlich, eine weitere signifikante Erhöhung der Adressierung von Unfalltypen-Unfallursachen führt zu einem exponentiellen Anstieg des Aufwandes bei der Entwicklung Aktiver Sicherheitssysteme. Ein zu großer Aufwand einzelner Aktiver Sicherheitssysteme ist notwendig, um nur einen Bruchteil der Unfälle abzudecken. Für ein beherrschbares Gesamtsystem werden deshalb neue Ansätze benötigt, die in der Lage sind, die große Variation an kritischen Situationen zu adressieren.

1.2 Problemstellung: Unfallerfassung

Quantitative Unfalldaten zeigen gut, welche Arten von Unfällen im Straßenverkehr vorkommen, liefern aber keine genaue Information zum Unfallhergang. Die Erfassung qualitativer Unfalldaten ist sehr aufwendig und erfolgt meist nur bezogen auf ein regionales Gebiet. Globale Fragestellungen können damit nicht vollständig beantwortet werden, aufgrund unterschiedlichster Verkehrsregeln und Fahrerverhalten in einzelnen Ländern. Beide Datenquellen haben den Nachteil, dass Sie nachträglich erfasst werden, teilweise nicht vollständig und mit Unsicherheiten behaftet sind, da der Unfallhergang nur eine Rekonstruktion darstellt.

2. Konzept Funktionsoptimierung

Zusätzlich zu den bestehenden rekonstruierten Unfallhergängen können Hochautomatisierte Fahrzeuge [4] zur Aufzeichnung detaillierter Unfallhergänge genutzt werden. Die 1) durch eine 360°-Umfeldererkennung in der Lage sind, alle relevanten Verkehrsteilnehmer zu erfassen, 2) ein detailliertes Abbild der Straßentopologie haben und sich auf der Straße [5] positionieren können, 3) das Verhalten des Fahrers [6] erfassen und 4) eine Verbindung zum Backend des Fahrzeugherstellers haben, über die ein Datenaustausch über kritische Situationen möglich ist [7]. Soweit dies aus datenschutzrechtlichen Gründen möglich ist.

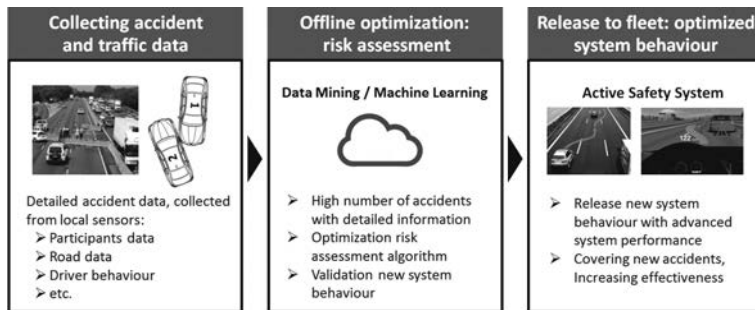


Bild 2: Prozessdarstellung - Von der Datenaufzeichnung über die Funktionsauslegung zur aktualisierten Aktiven Sicherheitsfunktion

Durch die verbauten Technologien ist es möglich, den Unfallhergang durch das Fahrzeug aufzuzeichnen. Das Verhalten Aktiver Sicherheitssysteme kann damit in kritischen Situationen ausgewertet werden, im Speziellen hinsichtlich True Positives (gerechtfertigte Systemauslösung) und False Positives (ungerechtfertigte Systemauslösung, z. B. eine Fußgängerwarnung, obwohl sich der Fußgänger neben der Straße befindet).

Mit den aufgezeichneten Daten ist es einerseits möglich, eine detaillierte Unfallanalyse durchzuführen und daraus kritische Einflussfaktoren abzuleiten, andererseits ist es denkbar, die aufgezeichneten Daten direkt zur Funktionsauslegung zu verwenden. Bild 2 zeigt dazu schematisch den Prozess von der Aufzeichnung des Unfalles über das Optimieren/Lernen bis zur Übertragung der Funktionsauslegung in die Fahrzeuge.

3. Konzeptevaluierung Maschinelles Lernen: Aktiver Fußgängerschutz

Nachdem aktuell auf keine aufgezeichneten realen Unfalldaten zurückgegriffen werden kann, erfolgt die Evaluierung anhand **generierter Szenarien**, die ursprünglich für die Wirksamkeitsanalyse vom Aktiven Fußgängerschutz konzipiert wurde. Die Szenarien decken dabei

einen begrenzten Handlungsraum des Fahrers und des Fußgängers ab. Um die hier vorgestellte Methodenanalyse durchzuführen wurden bei der Modellierung notwendige Adaptionen durchgeführt. Da eine Modellierung nur eine Annäherung an die reale Welt ist und per Definition mit Abweichungen behaftet ist, kann ein falsches Verhalten angelernt werden. Wird z. B. bei der Modellierung des Fahrers kein Ausweichen berücksichtigt, kann auch der Algorithmus das Ausweichen nicht lernen und würde im realen Einsatz ein unbekanntes Verhalten des Fahrers vorfinden. Deshalb ist basierend auf diesen Daten **keine Serienentwicklung möglich**. Für einen Serieneinsatz muss auf Realdaten zurückgegriffen werden, um ein realistisches Verhalten des gelernten Algorithmus zu erhalten. Ein weiterer Punkt bei der Betrachtung soll **kein kontinuierliches Lernen in jedem Fahrzeug** sein, sondern nur ein Lernen der Funktionsauslegung mit anschließender Validierung.

3.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage für die weitere Betrachtung stellen simulierte Fußgängerszenarien dar, die für die Wirksamkeitsanalyse des Aktiven Fußgängerschutzes durch Kates [8] generiert wurden. Die Szenarien beinhalten dabei eine große Anzahl an stochastischen Simulationen, in denen ein Fußgänger die Straße überquert. Dabei kommt es zu kritischen Situationen, wenn der Fußgänger die Zeitlücke zur Überquerung der Straße falsch einschätzt und der Fahrer nicht mehr rechtzeitig reagieren kann. Für ein realitätsnahes Verhalten sind der Fußgänger und der Fahrer mit systembedingten Prozessen als Zeitreihen von Zuständen modelliert, die von deterministischen und stochastischen Einflüssen beeinflusst werden. Eine genaue Beschreibung dazu findet man unter [8]. Die Szenarien zum Trainieren ($N=1840$, Unfälle= 242) und zum Lernen ($N=1829$, Unfälle = 249) sind hoch angereichert mit kritischen Situationen, die zu einem Unfall führen und auch mit Situationen, in denen der Fußgänger im letzten Moment die kritische Situation auflöst. Bei den Szenarien liegen die zeitlichen Bewegungsverläufe des Fahrzeuges und des Fußgängers vor. Daraus wird zu jedem Zeitschritt ein Datensatz generiert, der die Situation beschreibt. Jeder Datensatz wird hinsichtlich des Vermeidungspotentials durch die Fußgänger-Notbremsung klassifiziert. Dies ergibt sich aus den Systemgrenzen des Gesamtsystems wie z.B. die maximale Verzögerung oder die Signallaufzeiten. Inwieweit der Fußgänger die Situation noch vermeiden kann bzw. Unsicherheiten des Bewegungsverlaufes werden bei der Klassifizierung der Datensätze nicht berücksichtigt, diese Einflüsse sollen durch den maschinellen Lernalgorithmus ermittelt werden.

3.2 Maschinelles Lernen des Funktionsalgorithmus

Als maschineller Lernalgorithmus für den Fußgängerschutz wird ein Random Forest [9] verwendet. Dieser besteht aus einer Vielzahl an Entscheidungsbäumen, bei der die Klassifizierung über eine Mehrheitsentscheidung erfolgt. Damit werden eine hohe Genauigkeit und ein robustes Verhalten erreicht. Veröffentlichungen und Analysen zeigen, dass Random Forests für solche Arten von Anwendungen [9] sehr gut geeignet sind. Weitere denkbare Algorithmen für die Anwendung wären Naive Bayesian Classifier, Dynamic Bayesian Networks, Support Vector Machines oder Neural Networks, siehe [10]. Eine Möglichkeit, um die Qualität von Lernalgorithmen zu verbessern, besteht in der Anreicherung der Daten durch zusätzlich eingebrachtes Wissen. Das kann aus den bereits vorhandenen Daten generiert werden, wie z.B. der TTC (Time To Collision), die sich aus den Abständen und Relativgeschwindigkeiten zwischen Fußgänger und Fahrzeug ergibt oder den präzidierten Querversatz zu $TTC = 0s$.

3.3 Auswahl der Einflussfaktoren beim Funktionsalgorithmus

Random Forests sind eine Ansammlung von Entscheidungsbäumen, die wiederum aus einer Vielzahl an Knoten bestehen, wobei für jedes Feature (Einflussfaktor) ein Knoten notwendig ist. Eine Methode zur Ermittlung der Relevanz der Features ist Mean Decrease of Impurity [11]. Angewendet auf die generierten Fußgängerszenarien ist die Relevanz der Features in Bild 3 dargestellt, die dicken Balken stellen den Mittelwert der Relevanz aller Entscheidungsbäume und die schmalen Balken die Schwankungsbreite durch die einzelnen Bäume dar.

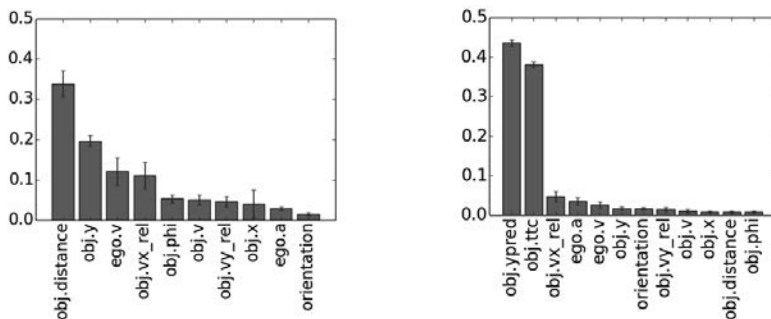


Bild 3: Relevanz der Einflussfaktoren (Features) links: Basisdatensatz, rechts: erweiterter Datensatz mit TTC und präzidierten Querversatz

Das linke Diagramm in Bild 3 zeigt die Relevanz der Features angewandt auf den Basisdatensatz, rechts angewandt auf den erweiterten Datensatz, bei dem die TTC und der präzidierte Querversatz hinzugefügt wurde. Gut erkennbar ist der mit Abstand größte Einfluss der

beiden hinzugefügten Features, die eine Kombination aus anderen Features darstellen. Interessanterweise hat sich bei der Auswertung der Klassifizierung der Testdaten gezeigt, dass zwischen den beiden Betrachtungen ein vernachlässigbarer Unterschied auftritt. Der Random Forest kommt auch ohne die zusätzlichen zwei Features mit der Komplexität der vorhandenen Daten zurecht.

4. Simulationsergebnisse und Ausblick

Zur Evaluierung wurde anhand von 1829 Szenarien der maschinell gelernte Fußgängerschutz mit einem Referenzsystem verglichen, das im Verhalten dem Fußgängerschutzsystem im Serieneinsatz entspricht. Das Referenzsystem ist TTC-basiert, dabei ist der frühestmögliche Bremszeitpunkt geschwindigkeitsabhängig. Die Position des Fußgängers wird dazu präzisiert. Zur Bewertung kann der Geschwindigkeitsabbau und die True Positive- und False Positive-Rate verwendet werden, die Berechnung dazu erfolgt folgendermaßen:

$$TP_{Rate} = \frac{TP}{FN + TP} \dots \text{Sensitivität}$$

$$FP_{Rate} = \frac{FP}{TN + FP} \dots \text{Spezifität}$$

System response		
yes	no	
True Positive (TP)	False Negative (FN) not detected - system limits	yes
Almost Near Miss (NM)	True Negative (TN) correct no intervention	no
False Positive (FP)		

Bild 4: Klassifizierung der Systembewertung bei Systemeingriffen

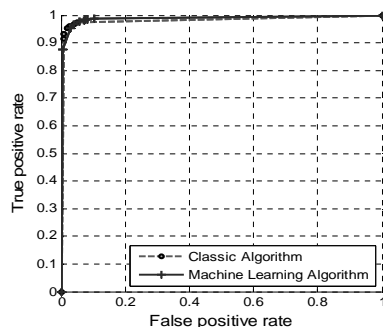


Bild 5: Vergleich der ROC-Kurve der beiden betrachteten Systeme

In Bild 5 ist die Receiver-Operating-Characteristic-Kurve (ROC-Kurve) für den gelernten Algorithmus und das Referenzsystem dargestellt. Die ROC-Kurve stellt die Abhängigkeit der Wirksamkeit mit der False Positive Rate (inkl. Near Miss Fällen) für unterschiedliche Arbeitspunkte (z.B. frühestmöglicher Bremszeitpunkt) dar. Für einen Arbeitspunkt, bei dem die True Positive- und False Positive Rate beider Algorithmen nahezu gleich sind, ist in Bild 6 die Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit mit und ohne Fußgängerschutzsysteme dargestellt. Eine Reduzierung der Kollisionsgeschwindigkeit durch beide Systeme ist erkennbar. Die Evaluierung hat im prototypischen Versuch in der Simulation gezeigt, dass eine Auslegung

eines aktiven Fußgängerschutzes über maschinelles Lernen möglich ist. Über die Verschiebung des Arbeitspunktes des Algorithmus ist es möglich, den gewünschten Geschwindigkeitsabbau festzulegen und daraus die False Positive Rate zu ermitteln, bezogen auf die evaluierten Szenarien. Zu bedenken ist, dass ein selbstlernender Algorithmus nicht gezielt auf Szenarien ausgelegt werden kann. Die Auslegung kann aber über die Datenbasis gesteuert werden, indem die Häufigkeit der entsprechenden Szenarien angepasst wird.

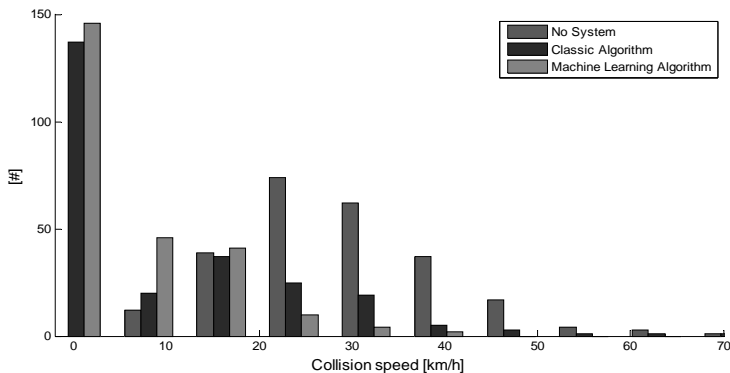


Bild 6: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeiten

Als nächster Schritt ist die Robustheit des gelernten Algorithmus zu evaluieren. Dabei ist zu analysieren, welche Auswirkungen Sensorfehler haben und wie der Algorithmus auf nicht betrachtete Verkehrssituationen reagiert, wie z. B. ein bewegender Fußgänger in Fahrtrichtung und die Anwendung auf real rekonstruierte Fußgängerunfälle. Da bei der oben beschriebenen Betrachtung nur die Bremsstrategie evaluiert wurde, ist die Anwendung an einem mehrstufigen Fußgängerschutz mit Warn- und Bremsstrategie geplant.

Zusammengefasst:

- Die Technologie des Hochautomatisierten Fahrens bietet Potential für die Aktive Sicherheit. Neue Methoden in der Systementwicklung können dieses ausschöpfen.
- Eine Verbesserung bestehender Aktiver Sicherheitssysteme mit deterministischem Verhalten ist durch maschinelles Lernen möglich.
- Insbesondere Systeme der Aktiven Sicherheit müssen auch bei Einsatz von Maschinellern ein deterministisches und nachvollziehbares Systemverhalten aufweisen.

6. Danksagung

Diese Arbeit entstand am VIRTUAL VEHICLE Research Center in Graz. Die Autoren bedanken sich für die Förderung im Rahmen des COMET K2 - Competence Centers for Excellent Technologies Programms des Österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), des Österreichischen Bundesministeriums für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (bmfwf), der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG), des Landes Steiermark sowie der Steirischen Wirtschaftsförderung (SFG).

7. Literaturangaben

- [1] A. Schubert, C. Erbsmehl und L. Hannawald, „Standardized pre-crash-scenarios in digital format on the basis of the VUFO simulation, Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH,“ in *Expert Symposium on Accident Research*, Hannover, 2012.
- [2] T. Hummel, M. Kühn, J. Bende und A. Lang, An investigation of their potential safety benefits based on an analysis of insurance claims in Germany, Berlin: UDV (German Insurers Accident Research), 2011.
- [3] T. Heinrich, J. Ortlepp, J. Schmiele und H. Voß, „Infrastrukturgestützte Fahrerassistenz,“ UDV (German Insurers Accident Research), Berlin, 2011.
- [4] Aeberhard N., Rauch S., Bahram M., Tanzmeister G., Thomas J., Pilat Y., Homm F., Huber W., Kaempchen N., „Experience, Results and Lessons Learned from Automated Driving on Germany's Highway,“ *IEEE Intelligent transportation systems*, 2015.
- [5] R. Krzikalla, A. Schindler, M. Wankerl und R. Wertheimer, „Vernetztes Automobil: Mehr Sicherheit durch Positionsbestimmung mit Satelliten und Landmarken,“ Springer, Wiesbaden, 2014.
- [6] M. Liebner, C. Ruhhammer, F. Klanner und C. Stiller, „Generic driver intent inference based on parametric models,“ in *IEEE Intelligent Transportation Systems*, 2013.
- [7] F. Klanner und C. Ruhhammer, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme 3. Auflage / Backendsysteme zur Erweiterung der Wahrnehmungsreichweite von Fahrerassistenzsystemen*, Wiesbaden: Springer, 2015.
- [8] R. Kates, O. Jung, T. Helmer, A. Ebner, C. Gruber und K. Kompass, *Stochastic simulation of critical traffic situations for the evaluation of preventive pedestrian protection systems*, VDI Verlag GmbH, 2010.
- [9] M. Huelsen , *Knowledge-Based Driver Assistance Systems*, Wiesbaden: Springer Fachmedien , 2014.
- [10] M. Liebner und F. Klanner, „Driver Intent Inference and Risk Assessment,“ in *Handbook of Driver Assistance Systems*, Springer, 2015.
- [11] G. Louppe, L. Wehenkel, A. Sutura und P. Geurts, „Understanding variable importances in forests of randomized trees,“ in *Advances in Neural Information Processing Systems* 26, 2013.

Für Rückfragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Klassifikation von Fahrerzuständen und Nebentätigkeiten über Körperposen bei automatisierter Fahrt

Dipl.-Inform. **Manuel Martin**, Dr.-Ing. **Michael Voit**,
Fraunhofer IOSB, Karlsruhe;
Dr.-Ing. Dipl.-Psych. **Frederik Diederichs**,
Dipl.-Psych. **Vivien Melcher**, Fraunhofer IAO, Stuttgart;
M. Sc. **Kangxiong Li**, Hochschule Pforzheim;
Dipl.-Ing. **Harald Widloither**, IAT der Universität Stuttgart;
Prof. Dr.-Ing. **Rainer Stiefelhagen**, Karlsruhe Institut für Technologie

Kurzfassung

Durch die fortschreitende Automatisierung von Fahrzeugen, besonders des Fahrvorgangs selbst, verändert sich die Rolle des Fahrers mehr und mehr hin zum Passagier. Damit steigt die Bedeutung von Nebenaufgaben und fahrfremden Tätigkeiten. Solange jedoch mit Rückübergaben der Fahraufgabe an den Fahrer während der Fahrt gerechnet werden muss, müssen aus Sicherheits- und Komfortgründen die Aktivitäten des Fahrers erfasst werden. Eine Möglichkeit hierfür ist die optische Erfassung und Klassifikation der Körperhaltung. In diesem Beitrag präsentieren wir ein System zur manuellen Analyse der Körperhaltung für Simulator-Studien sowie einen Ansatz zur automatischen Erfassung der Körperhaltung im Fahrzeug.

1. Einleitung

Durch die Entwicklung automatisiert fahrender Fahrzeuge verändert sich die Rolle des Fahrers weg von der klassischen Fahraufgabe hin zum Passagier, dem ähnliche Nebentätigkeiten erlaubt sind wie allen anderen Fahrzeuginsassen. Für ein automatisiert fahrendes Fahrzeug ist es wichtig, diese Nebentätigkeiten zu verstehen, zum einen aus Sicherheitsgründen, z.B. wenn der Fahrer das Steuer übernehmen soll, zum anderen, um den Insassen kontext-sensitive Interaktionsmöglichkeiten bieten zu können. Nebentätigkeiten und fahrfremde Tätigkeiten bieten einen wesentlichen Mehrwert für den Fahrer und sind daher auch eine mögliche Einnahmequelle für die Anbieter. Eine Möglichkeit, Nebentätigkeiten zu klassifizieren und automatisch optisch zu erfassen, ist die Beobachtung und Klassifikation der Körperpose. Statische und dynamische Körperposen sowie natürliche Gesten können Aufschluss über das Aktivitätsniveau des Fahrers, den Fahrerzustand, seine Intentionen [1] und über die Art der Nebentätigkeit geben. Wir stellen eine Lösung für die manuelle Analyse von Nebentätig-

keiten bezüglich unterscheidbarer Körperposen vor und präsentieren einen Ansatz zur automatischen optischen Auswertung auf Basis einer Tiefenkamera (MS Kinect).

2. Stand der Forschung

Der Fokus unseres Beitrags liegt auf der Erfassung der Körperpose im Fahrzeug sowie darauf aufbauend auf der Klassifizierung von Nebentätigkeiten bei automatisierter Fahrt. Wir berücksichtigen hierbei die Stufen 4-5 nach SAE [2] bzw. das »Hochautomatisierte und Vollautomatisierte Fahren« nach der Definition der BAST.

Zur Erfassung und Analyse der Körperpose gibt es unterschiedlichste Ansätze. Die genaueste Erfassung der Pose ist mit optischen Marker-basierten oder Marker-losen Multi-Kamera-Motion-Capture-Systemen möglich. Beide Methoden sind für einen Einsatz im Fahrzeug eher ungeeignet, da es durch die eingeschränkten räumlichen Verhältnisse schwierig ist, die Kameras geeignet zu platzieren. Eine andere Möglichkeit zur Erfassung ist die Anbringung von Inertialsensorik am Körper. Hierbei kommt es aber oftmals mit der Zeit zu Sensordrift und, insbesondere im Fahrzeug, zu Störungen durch Metallteile, die das Ergebnis verschlechtern. Alle diese Systeme haben zudem den Nachteil, dass Sie teuer sind, einen hohen Konfigurationsbedarf haben und nicht geeignet sind, später in Serie eingesetzt zu werden.

Für Simulator-Versuche und deren Analyse eignen sich deshalb auch Systeme, die eine effiziente manuelle Auswertung ermöglichen. Solche Systeme gibt es bereits in anderen Bereichen. Sie werden beispielsweise zur Evaluation von Ergonomie und Arbeitssicherheit eingesetzt [3]. Die Basis zur Auswertung ist dabei eine Aufzeichnung der Probanden mit einer einfachen Videokamera und eine Auswertung durch einen Beobachter über einen Analysebogen. Aktuell gibt es noch kein System, das speziell für den Einsatz im Simulator konzipiert ist und die vorhandenen Systeme sind nur eingeschränkt übertragbar.

Zum späteren Einsatz der im Simulator-Versuch erzielten Ergebnisse im Fahrzeug muss die Auswertung dann jedoch automatisch und in Echtzeit erfolgen. Aktuell beschränkt sich die Erfassung des Fahrers hauptsächlich auf die Beobachtung des Kopforientierung und Blickrichtung. In einzelnen Fällen werden auch die Hände erfasst [4]. Um darüber hinaus auch die gesamte Körperpose zu bestimmen eignen sich Verfahren, die wenige Kameras und maschinellen Lernverfahren verwenden [5]. Für viele Anwendungsfälle ist dabei eine deutlich geringere Präzision notwendig als jene, die die oben genannten Motion-Capture-Verfahren liefern.

3. Entwurf der DPAM-Methodik

Das Ziel der DPAM (Driver Posture Analysis Method)-Methode ist, ein Verfahren zu entwickeln, welches ermöglicht, Videoaufnahmen der Körperpose der Insassen ohne komplexe

Technik, wie zum Beispiel Marker-basierte Trackingverfahren, effizient zu analysieren und ein Ergebnis zu erzeugen, das mathematisch vergleichbar ist.

Es wurde dafür ein 16-stelliger Code entwickelt der pro analysiertem Bild die Pose des Kopfes, der oberen Extremitäten und des Torsos beschreibt. Jeder Ziffer des Codes ist dabei ein Freiheitsgrad eines Gelenkes zugeordnet. Die Anzahl der Freiheitsgrade und deren Bewegungsspielraum unterscheiden sich je nach Gelenk aufgrund von anatomischen Gegebenheiten. Der Bewegungsspielraum der einzelnen Gelenke wird zur Kodierung in Kategorien unterschiedlicher Größe eingeteilt. Ein Problem hierbei ist die Wahl der Größe der Kategorien für jedes Gelenk. Werden zu kleine Kategorien gewählt, entstehen später mehr Fehler bei der Annotation, bei zu großen Kategorien ist die Auswertung dagegen nicht aussagekräftig, weil zu ungenau. P.M. van Wyk et al. [6] haben dieses Problem untersucht und für verschiedene Gelenke ideale Kategoriegrößen bestimmt, die wir hier als Basis verwenden (siehe Tabelle 1). Die Anzahl der Kategorien ergibt sich dabei aus der Kategoriegröße und dem anatomisch begrenzten Bewegungsspielraum des Gelenks. Die Kategorisierung der Hände stellt eine Ausnahme dar, da hier die Kategorien keine Winkelbereiche, sondern verschiede-

Tabelle 1: Kodierung der Gelenke im DPAM-Code mit ihren Kategorien und Winkelbereichen.
Schulter, Ellenbogen und Handhaltung sind jeweils für Rechts und Links vorhanden.

Kategorie Beschreibung	Kategorien [#]	Bewegungsspielraum [Grad]
Kopf Sagittalebene	5	-45 bis 45
Kopf Frontalebene	5	-55 bis 55
Kopf Transversalebene	7	-80 bis 80
Rumpf Sagittalebene	7	-55 bis 100
Rumpf Frontalebene	5	-50 bis 50
Rumpf Transversalebene	5	-50 bis 50
Schulter Sagittalebene	9	-45 bis 180
Schulter Frontalebene	9	-45 bis 180
Schulter Transversalebene	6	-60 bis 90
Ellenbogen Sagittalebene	6	0 bis 150
Handhaltung	12	-

ne Grifftypen beschreiben.

Anstatt eines Analyseprotokolls in Form von Papier wird die DPAM-Referenzmethodik als Programm entwickelt. Das Programm hat folgende Vorteile gegenüber dem Papierprotokoll:

1. Die Ergebnisse der Analyse lassen sich schnell auf ein anderes Programm übertragen.
2. Die Zuordnung der Ergebnisse ist erheblich einfacher.
3. Durch eine geeignete Dialogführung und Darstellung kann eine höhere Zuverlässigkeit und ein höherer Detailgrad erreicht werden.

Das Auswerteprogramm stellt immer alle Kategorien aller Freiheitsgrade eines Gelenks als Piktogramme auf einmal dar. Der Nutzer kann frei zwischen den einzelnen Gelenken wechseln (siehe Bild 1). Durch die Piktogramme wird die Auswertung stark vereinfacht, da dies einen direkten Vergleich zwischen dem Piktogramm und dem zu annotierenden Videobild ermöglicht.

4. Skeletterfassung im Fahrzeug

Die Basis der automatischen, videobasierten Auswertung der mit der DPAM-Methode gewonnenen Ergebnisse ist eine Skeletterfassung der Fahrzeuginsassen. Aufbauend auf der Skeletterfassung kann dann mit weiteren Verfahren eine Kategorisierung, zum Beispiel von Nebentätigkeiten, erfolgen. Hierfür kann entweder vollautomatisch ein DPAM-Code generiert werden und dieser mit vorher gewonnenen Codes verglichen werden, oder es können andere Verfahren wie zum Beispiel Hidden-Markov-Modelle oder Dynamic Time Warping verwendet werden. Dieser zweite Schritt wird in diesem Beitrag aber nicht betrachtet.

Das hier vorgestellte Verfahren zur Skeletterfassung verwendet eine Tiefenkamera (Microsoft Kinect v2) und funktioniert marker-los. Es baut auf dem Verfahren von J. Shotton et al. [5] auf. Es werden keine Auswertelgorithmen der Hersteller-SDKs verwendet. Grundsätzlich basiert das Verfahren auf dem Labeling verschiedener Körperregionen im Tiefenbild mit Hilfe von maschinellen Lernverfahren in Form von Entscheidungsbäumen.

Das Gesamtsystem kann in mehrere Schritte unterteilt werden, die im Folgenden kurz beschrieben werden:

Bei der *Vorverarbeitung* der Sensordaten wird das Tiefenbild der Kamera zuerst geglättet, um das Rauschen zu unterdrücken. Anschließend wird das Tiefenbild mit Hilfe der Spezifikation der Kamera in eine Punktwolke umgewandelt.

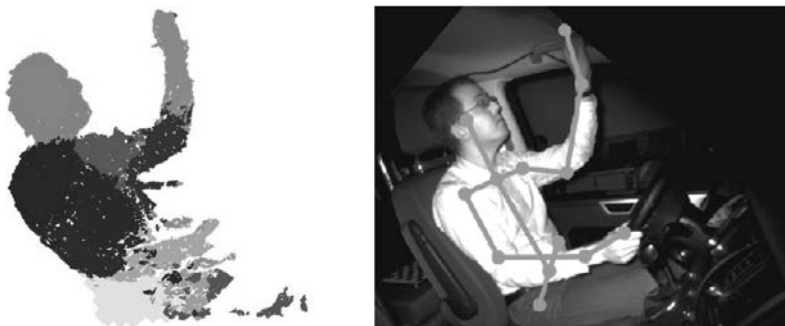


Bild 2: Links: Ergebnis der Segmentierung und der Körperteilklassifikation; rechts: Ergebnis der Skelettschätzung.

Die *Segmentierung* des Tiefenbilds beruht auf einem dreidimensionalen Hintergrundmodell des leeren Fahrzeugs in Form eines Voxel-Grids. Ein Voxel stellt einen kleinen Würfel im drei-dimensionalen Raum dar; es entspricht einem Pixel im zwei-dimensionalen Raum. Jeder Voxel des Hintergrundmodells codiert, ob das Volumen Teil des Fahrzeugs, also des Hintergrunds, ist oder nicht. Zum Einlernen des Modells wird im aktuellen System mit der Kamera das leere Fahrzeug aufgenommen und die aufgezeichneten Sensordaten zur Generierung des Hintergrundmodells verwendet. Alternativ könnte auch ein CAD-Modell des Fahrzeugs verwendet werden. Nach dem Einlernen des Modells kann für jeden Punkt der Punktwolke effizient der Voxel bestimmt werden, in den der Punkt fällt. Ist dieser Voxel nicht Teil des Hintergrunds, so wird der Punkt in die Segmentierung mit aufgenommen.

Das *Labeling* der Körperregionen arbeitet auf den durch den vorherigen Schritt segmentierten Tiefendaten, die den Fahrer beschreiben. Es wird hierfür durch mehrere Entscheidungsbäume für jeden Punkt der Segmentierung bestimmt, zu welcher Körperregion er gehört. Die Entscheidungsbäume werden dafür zuerst auf einer Vielzahl segmentierter und gelabelter Kamerabilder aus derselben Kameraperspektive mit unterschiedlichen Posen eingelernt. Die Entscheidungsbäume liefern ein Histogramm, das die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit eines Punktes zu einer Region beschreibt. Der Eintrag mit dem größten Wert definiert dann, welcher Region der Punkt am wahrscheinlichsten zuzuordnen ist (siehe Bild 2).

Das *Clustern* fusioniert die zuvor pixelweise gelabelten Punkte zu größeren Regionen. Hierfür wird eine Variante der Connected Component Analysis verwendet. Dabei wird zur Bestimmung der Cluster sowohl die euklidische Distanz als auch die geschätzte Körperregion genutzt. Nur Punkte, die der gleichen Region zugeordnet sind und in räumlicher Nähe liegen, können in einem Cluster zusammengefügt werden. Von jedem resultierenden Cluster wird

nachfolgend der Schwerpunkt berechnet. Die Schwerpunkte bilden zusammen mit der Clustergröße und den entsprechenden Körperteillabeln die Hypothesen für die einzelnen Gelenke.

Aufgabe der *Skelettschätzung* ist es, aus den Hypothesen für die einzelnen Gelenke die richtigen auszuwählen. Bei perfekten Körperteillabeln und perfektem Clustering würde es für jedes Gelenk nur eine Hypothese geben, die einfach ausgewählt werden könnte. In der Praxis erhält man aufgrund von Fehlern bei den vorangegangenen Schritten eine größere Anzahl Gelenkhypothesen für jedes Gelenk. Zusätzlich kommt es im Fahrzeug durch die begrenzten Verhältnisse und meist nur suboptimal anbringbaren Kameras zu großen Verdeckungen, so dass Gelenke zeitweise nicht sichtbar, aber durch Rauschen eventuell trotzdem zugehörige Hypothesen vorhanden sind. Um Verdeckungen festzustellen und die richtigen Gelenke zu finden, wird ein iteratives Verfahren eingesetzt. Im ersten Schritt wird dabei für jedes Gelenk die Hypothese, die zum größten Cluster gehört, als korrekt angenommen. Im zweiten Schritt wird dann entlang der kinematischen Kette überprüft, ob es entlang der Verbindung zwischen zwei Gelenken Punkte in der Punktwolke gibt, die in der Nähe der Verbindung liegen. Ist dies nicht der Fall, wird für das jeweilige Gelenk die nächstbeste Hypothese gewählt und Schritt 2 wiederholt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass das Skelett innerhalb der Punktwolke liegt.

5. Evaluation

Die DPAM-Methode wurde in einer Fahrsimulator-Studie evaluiert. Es nahmen 23 Probanden teil (10 weiblich, 13 männlich; Alter 15 bis 58 Jahre). Da bei der Betrachtung der Körperpose die Anthropometrie des Fahrzeugführers wichtig ist, wurde zudem sowohl die Verteilung der Größenverhältnisse der Bevölkerung abgebildet als auch Linkshänder ausgewählt. Der Versuch wurde in einem VW Passat durchgeführt und der Fahrer wurde mit Kameras an jeder A-Säule gefilmt. Ziel der Studie war es zu untersuchen, inwieweit verschiedene Nebentätigkeiten bei automatisierter Fahrt über die Pose des Oberkörpers identifizierbar sind. Es wurden 14 häufige Nebentätigkeiten ausgewählt: SMS schreiben, Tablet benutzen, mit Beifahrer sprechen, ausruhen, Buch lesen, Makeup anbringen, mit Person auf Rückbank sprechen, telefonieren, ein Kaltgetränk trinken, ein Heißgetränk trinken, Essen mit einer/zwei Händen, Head Unit bedienen, Smartphone per Bluetooth mit dem Fahrzeug verbinden. Es wurde ein Realvideo einer Autobahnfahrt genutzt, keine Simulator-Software, um eine automatisierte Fahrt realistischer Abzubilden.

Der Versuch bestand aus zwei Teilen, die nacheinander durchgeführt wurden. Jeder Teil dauerte ca. 20 Minuten. Beim ersten Versuch ging es um eine manuelle Fahrt, der Fahrer

musste während der gesamten Fahrt mindestens eine Hand am Lenkrad belassen und dabei die Nebentätigkeiten durchführen.

Der zweite Teil simulierte eine hochautomatisierte Fahrt der Stufe 4 nach SAE [1]. Währenddessen mussten die Probanden auf die Anweisungen des Versuchsleiters reagieren. Sobald der Proband eine Anweisung wie zum Beispiel »Bitte trinken Sie den Tee« hörte, musste er diese ausführen.

Bei der Versuchsdurchführung wurden insgesamt 770 Minuten Videomaterial bei der manuellen Fahrt und 623 Minuten bei hochautomatisierter Fahrt gesammelt.

Nach dem Versuch wurden insgesamt 1130 Bilder aus den Videos selektiert und mit der DPAM-Methodik annotiert. Einige der dynamischeren Nebentätigkeiten wurden dafür zur Kodierung in mehrere Phasen unterteilt. Typische Posen sollten dabei zwei Charakteristiken haben: Sie sollen repräsentativ und eindeutig sein. Durch die Auswertung der Kodierungen konnten den Nebentätigkeiten »Mit dem Handy anrufen«, »ein Kaltgetränk trinken«, »ein Heißgetränk trinken«, »Tablet bedienen« und »Head Unit bedienen« eindeutige Posen zugeordnet werden.

Zur Evaluation des Systems zur Körperposenschätzung des Fahrers auch bei Realfahrten wurde ein VW T5 mit einer Kinect v2 an der Beifahrer A-Säule ausgestattet. Die etwas unübliche Position für eine Beobachtung des Fahrers ist dem Öffnungswinkel und dem benötigten Mindestabstand geschuldet. Diese Kamera wurde nach einem Test vieler Consumer-Tiefenkameras ausgewählt, weil Sie die größte Robustheit gegenüber Sonnenlicht zeigte. Es ist somit auch möglich, das System auf offener Straße bei moderater Sonneneinstrahlung erfolgreich zu nutzen. Die Entscheidungsbäume wurden mit etwa 10.000 annotierten Bildern unterschiedlicher Posen trainiert. Die Bilder wurden im Labor außerhalb des Fahrzeugs aber mit ähnlicher Perspektive aufgezeichnet. Dies ist problemlos möglich, da nach der Segmentierung das Fahrzeug selbst keine Rolle mehr spielt. Mit diesem Setup wurden sowohl während der Fahrt als auch im Stand mehrere Stunden Daten aufgenommen. Leider gibt es für diese Daten aktuell noch keine Groundtruth. Eine quantitative Auswertung ist deshalb nicht möglich. In der Zukunft planen wir, Daten manuell zu annotieren. Bis jetzt wurden die Daten qualitativ durch Überlagerung des Skeletts mit den Kamerabildern evaluiert. Es hat sich gezeigt, dass das System die Pose bei manueller Fahrt und auch bei verschiedenen Nebentätigkeiten gut erkennt. Bild 3 zeigt einige Beispielergebnisse des Systems.

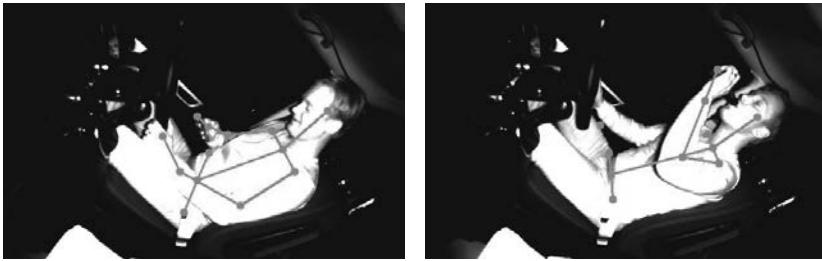


Bild 3: Beispielbilder der Ergebnisse des Systems zur Skeletterkennung für die Aktivitäten »SMS schreiben« und »ein Kaltgetränk trinken«

5. Zusammenfassung

Ziel des Beitrags ist aufzuzeigen, wie Nebentätigen bei automatisierter Fahrt manuell analysiert und im nächsten Schritt automatisch erfasst werden können. Hierfür wurden zwei Systeme vorgestellt. Die präsentierte DPAM-Methode ist eine kosteneffiziente Möglichkeit, mit Hilfe von Videodaten manuell die Pose des Fahrers auszuwerten. In einem Simulator-Versuch wird aufgezeigt, wie diese Methodik eingesetzt werden kann, um Nebentätigkeiten bei automatisierter Fahrt auf ihre Unterscheidbarkeit hin zu untersuchen. Das zweite vorgestellte System kann das Skelett der Insassen mit Hilfe von Tiefenkameras automatisch ableiten. Dieses System stellt den ersten Schritt zur Umsetzung einer automatischen Klassifikation der mit der DPAM-Methode identifizierten Nebentätigkeiten dar. Wir zeigen die Funktionalität des Systems qualitativ auf Videodaten aus dem Fahrzeug.

- [1] Diederichs, F. (in press) Entwicklung von verhaltensbasierten Verfahren zur Erkennung von Fahrerintention für die Prädiktion von Fahrmanövern. Diss. Universität Stuttgart
- [2] SAE. Automated Driving. Abgerufen am 15.09.2016, von http://www.sae.org/misc/pdfs/automated_driving.pdf
- [3] Buchholz, B., et al.: "PATH: A work sampling-based approach to ergonomic job analysis for construction and other non-repetitive work." Applied Ergonomics, 27 (1996): 177–187.
- [4] Ohn-Bar, E., et al.: "Head, eye, and hand patterns for driver activity recognition." International Conference on Pattern Recognition (2014).
- [5] Shotton, J., et al.: "Real-time human pose recognition in parts from single depth images." Communications of the ACM 56.1 (2013): 116-124.
- [6] van Wyk, Paula M., et al.: "Determining the optimal size for posture categories used in video-based posture assessment methods." Ergonomics 52.8 (2009): 921-930.

Ambient Light – An integrative, LED based interaction concept for different levels of automation

M. Sc. Psych. **Marc Dziennus**, Dipl. Ing. **Johann Kelsch**,
Dipl. Psych. **Anna Schieben**, Deutsches Zentrum für Luft- und
Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik (ITS),
Braunschweig

Abstract

In the present paper an innovative approach for the driver-automation interaction based on visual signals is presented. A 360° LED stripe which is installed in the interior of the car communicates to the driver via his peripheral vision (Ambient light). A consistent, color-coded interaction design in the peripheral field of vision is used to guide the driver's attention and to support him in different level of automation by providing automation-related information. The HMI concept uses situation specific sub-symbolic signals to achieve a simple and intuitive driver-automation interaction. The paper presents the results of a simulator study with 40 participants (between-subject design) who tested two different design versions for the ambient light. The main focus of the study was to evaluate if the ambient light could be used to support drivers in transitioning from SAE level 3 (driver does not need to monitor the automation function) to SAE level 2 (driver needs to monitor the automation function). Two different interaction designs (Basic SAE2 indication vs. Basic SAE2 indication + detected object) of the ambient light were developed and compared regarding their potential to support drivers in a system failure scenario. Results from gaze behaviour show that the ambient light is very effective in supporting the drivers to shift their attention from complete distraction while driving (SAE3) towards the monitoring task (SAE2). Further, the indication of detected vehicles by the automation helped participants to anticipate automation failures and led to an earlier takeover of control if needed.

1. Theoretical background

More and more assistance functions up to complete automation of lateral and longitudinal vehicle control are currently brought to market. For the driver-vehicle interaction it is crucial that the information of all these different systems in a vehicle is well aligned. Currently, different assistance systems often use different ways to communicate with the driver. These

inconsistent information strategies could lead to confusion and delayed or wrong reactions by the driver [1 to 3]. A well designed HMI for different functions becomes even more critical for highly automated vehicles when the driver needs to be aware of the current status of the vehicle and needs to react correctly to e.g. take-over requests. The role of the driver in different automation level shows a huge variety. In SAE level 2 [3] the driver is supposed to monitor the automation and if the automation reacts in an unintended way the driver should be able to take over control instantly and to perform the correct driving manoeuvre. Compared to that, in SAE level 3 the driver does not need to monitor the automation anymore and he is allowed to engage in non-driving tasks. Nevertheless, the driver should be able to take over control when the automation sends a take-over request.

There is a great difference in the role of the driver regarding monitoring in these two levels but in both levels the driver is asked to handle situations which the automation is not capable of. This leads to the question how to support drivers in these (time-) critical tasks. Research has shown that the strategy to communicate automation uncertainty could lead to higher acceptance of the automation than simply trigger a takeover request [4]. Further the transparency of automation behaviour becomes an important part to increase the drivers' situation awareness. Experts assume that drivers could be supported in monitoring by receiving information of the future actions of the automated vehicle [5].

2. Ambient Light

The ambient light consists of a 360° LED stripe which is installed in the interior of the car. As an innovative human-machine interface the ambient light communicate via a consistent, color-coded interaction design in the peripheral field of the driver's vision. By illuminating different sections (front, rear, left and right) of the ambient light it is possible to guide the driver's attention and to support him in different level of automation by providing automation-related information. The HMI concept uses situation specific sub-symbolic signals to achieve a simple and intuitive driver-automation interaction. Previous research to LED stripes shows that this technology is applicable for specific assistance systems [6 to 12].

2. Research question

The present study addresses the driver-vehicle interaction while automated driving in the SAE level 2 and 3. As the role of the driver differs significantly in these two levels the main issue of the study was to investigate if it is possible to support the driver during the transition from SAE level 3 (non-driving tasks allowed) to SAE level 2 (supervising of the automation needed) using the ambient light. Further two different ambient light designs for SAE level 2

were investigated regarding their potential to enhance automation behaviour transparency in a system failure scenario. Following two main research questions were defined:

- Is it possible to bring the driver from SAE level 3 into SAE level 2 (monitoring role) by using ambient light and HDD?
- Is it possible to display additional information about detected vehicles on the ambient light to help drivers anticipate critical situations? (Basic SAE2 indication vs. Basic SAE2 indication + detected object)

3. Driver-automation interaction

In the present paper the ambient light was used to inform the driver about the present automation level, transitions of automation levels and detected vehicle via a color-coded interaction strategy in the peripheral vision field of the driver. When the automation triggered a transition from SAE level 3 to SAE level 2 the entire ambient light flashes two times in orange to request the driver to supervise the system. After that the automation gave a directed cue where the driver needs to supervise the automation by illuminating the relevant segment (left, right, front, rear) in orange. Participants in the condition “Basic SAE2 indication” experienced only the directional cue where they need to monitor the automation (Fig. 1, left). Participants of the condition “Basic SAE2 indication + detected object” got additional information about detected vehicle in their environment (Fig. 1, right). To indicate a detected vehicle a blue bar was illuminated on the ambient light directly under the object in the environment. This additional information should help the driver to understand automation behaviour which is based on detected vehicle and potential dangerous situations when the automation has not detected relevant objects. While driving in SAE level 2 and 3 all participants were instructed to perform a visual searching task - the Surrogate Reference Task (SuRT) [13] - as secondary task on a tablet.



Fig. 1: Design of condition “Basic SAE2 indication” blue sides and orange in front (left) and design of “Basic SAE2 indication + detected object” blue sides and orange with blue bar in front (right)

5. Experimental Design

Participants were randomly distributed to one of the two experimental groups (Basic SAE2 indication and Basic SAE2 indication + detected object) in a between group design (Table 1). All participants tested the HMI concept in a first run without any additional explanation of its functionality. In the second run the HMI concept were explained in detail before the start. The complete study consisted of eleven different driving scenarios with transitions from SAE 3 to SAE 2 including two automation failure scenarios. Regarding the driving data only the results for one of the automation failure scenarios will be reported.

Table 1: Experimental design of the study

	Basic SAE2 indication	Basic SAE2 indication + detected object
Automation can handle situation	Basic indication	Basic indication + detected object
Automation can't handle situation (failure)	Basic indication	Basic indication

8. Procedure

All 40 participants conducted the experiment in 1.5 hours on a single day. At first, all participants filled out a consent form and a demographic survey. After that, participants were able to familiarize themselves with the simulator during a 10 minutes training scenario. In the following trainings drive participants were introduced to highly automated driving and learned how to activate and deactivate the automation. While driving in SAE level 2 and 3 all participants were instructed to perform the SURT as secondary task. Afterwards, participants tested the HMI concept without any prior instruction in three different driving scenarios. The first run took about 10 minutes. After this run participants had to fill out a questionnaire and the ambient light design was explained to them in detail. After this the second run started. The second run took about 30 minutes and contained eleven driving scenarios from which one was a scenario with a critical automation failure. After the second run, the participants were asked to fill out a questionnaire again and were paid for their participation in the study (10 Euro per hour).

6. Scenario “Critical automation failure”

All participants started in SAE 0 on a three lane motorway on the right lane. Two other vehicles A & B were positioned in front of the ego car (Fig. 2). After 10 seconds participants were asked to activate the highly automated driving mode (SAE 3) by pressing a button on the

steering wheel. While driving in SAE 3 participants had to perform the SURT as secondary task on a tablet. During the SAE 3 level driving the ambient display was illuminated in blue. After 60 seconds the automation triggered a transition from SAE 3 to SAE 2. The next 20 seconds the driver had to supervise the automation while the automation drove 96km/h and kept a constant distance to the front vehicle A (57m). Then the indicator of the front vehicle (A) started to flash and the car changed to the middle lane (Fig. 2). After the lane change of vehicle A the new front vehicle (B) was not detected by the automation. Due to this the automation accelerated and kept no safety distance to vehicle B. Without a driver intervention the automation would have crashed into vehicle B.

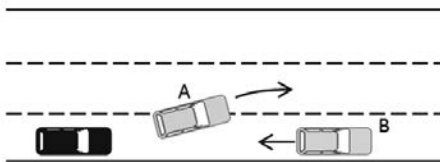


Fig. 2: Ego vehicle (black) and two other vehicles (grey) in a critical automation failure scenario

4. Simulator environment

The study was conducted in the dynamic driving simulator at DLR with motion system. The technical set-up of the driving simulator is as follows: A complete real vehicle is mounted into the simulator cabin. The vehicle is surrounded by the projection system of the dynamic driving simulator, which provides a wide visual field covering the front and the sides of the vehicle (270° horizontal x 40° vertical) and a high resolution presentation (approx. 9200 x 1280 pixels). The rear view mirror and TFT-display in the side mirrors allow the driver to keep an eye on the rear traffic.

7. Participants

In total 40 participants (25 male, 15 female) took part in the current study. The mean age was 29.7 years (SD=10.1years) and participants had a driving experience of 12.53 years (10.26 years). Half of the participants reported to drive more than 5000km per year. Condition "Basic SAE2 indication" includes 4 females and 16 males with a driving experience of

17.55years (SD=12.15years) while condition “Basic SAE2 indication + detected object” had 11 females and 9 males with a driving experience of 7.5 years (SD=3.91years).

8. Results

The first research question was if the chosen ambient light design for initiation a transition from SAE3 to SAE2 could help drivers to shift their attention from the secondary task to a monitoring task (SAE level 2). To investigate this, we calculated the attention ratio for looking on the road (percentage of glances onto area of interest) while driving in SAE 3 with secondary task and compared it to the attention ratio while driving in SAE 2. A comparison of the this mean attention ration averaged over all eleven scenarios (Fig. 3, left) showed that participants looked more often on the road after the ambient light indicated a change from SAE 3 to SAE 2. ($F(20) = 15.2$; $p < 0.01$). Regarding the question if an indication of the detected vehicle could lead to an earlier reaction of the driver in critical situations with an automation failure we investigated the distance in m to the front vehicle (vehicle B see Fig. 2) at the moment when drivers intervene and took over the control of the vehicle. Participants of the group “Basic SAE2 indication + detected object” took over control at a significantly higher distance to the front vehicle than participants without extra information about the detected vehicles by the automation (($F(1,35)=5.523$; $p=.025$), Fig. 3, right). The two groups also differed significantly ($\chi^2=6.74$; $p=.009$) in the way how the drivers triggered the transition back to manual control in the automation failure scenario. While participants of condition “Basic SAE2 indication” deactivated the automation only by braking, participants of condition “Basic SAE2 indication + detected object” used the brake pedal or the transition button on the steering wheel to deactivate the automation.

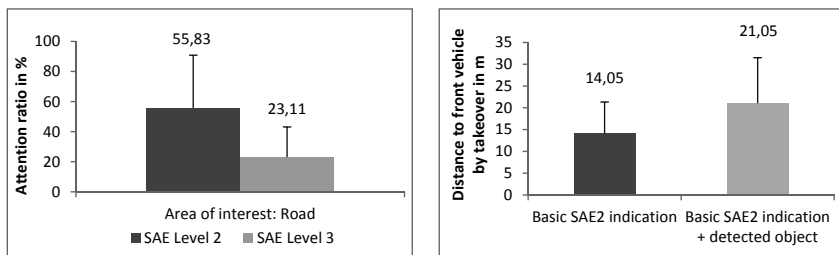


Fig. 3: Attention ratio of the AOI “Street” (left) & Distance to front vehicle (B) at driver intervention (right)

8. Conclusion

The results show that the chosen design for the change between SAE 3 and SAE 2 worked very well. After participants received a feedback on the LED stripe that there was a transition between the SAE levels, drivers changed their gaze behaviour and looked more frequently onto the road. Regarding the monitoring task needed in SAE level 2 the main assumption of our design was that a driver is only able to react upon a critical situation when he is able to detect it. Therefore, the observed adjustment of the gaze behaviour indicates that the driver is supported in building up a good situation awareness of the driving scene in SAE2 by our HMI design. Further, we could show that a specific design variant that visualizes the vehicles detected by the automation enhances automation transparency and generates benefits in the human-machine interaction. Participants were able to anticipate automation failures and took over control in a critical scenario earlier than participants without knowledge of the vehicles detected by the automation. Up to now, the 360 LED Band was only tested for manual driving applications and driver assistance (SAE1) [6-12,14] the presented study evaluated the concept for higher automation functions. The developed HMI concept for the 360 LED band showed great potential for using it for higher automation levels, especially for supporting the driver during a transition phase and for enhancing his situation awareness in SAE level 2. The HMI concept will be further developed at DLR for more complex driving situations e.g. in urban environments and is further evaluated and test in simulators and test vehicles.

The research leading to these results has received funding from the European Commission Seventh Framework Programme (FP/2007-2013) under the project AdaptIVe, grant agreement number 610428. Responsibility for the information and views set out in this paper lies entirely with the authors. The authors would like to thank all partners within AdaptIVe for their cooperation and valuable contribution.

- [1] Scott, J. J.; Gray, R.: A comparison of tactile, visual, and auditory warnings for rear-end collision prevention in simulated driving. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50 (2008) S. 264–275
- [2] Cummings, M. L.; Kilgore, R. M.; Wang, E.; Tijerina, L.; Kochhar, D. S.: Effects of Single Versus Multiple Warnings on Driver Performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49 (2007) S. 1097–1106
- [3] SAE International J3016 - "Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. J3016_201401, 2014

- [4] Heesen, M.; Baumann, M.: *Uncertainty* feedback as component in the interaction design for highly automated vehicles. In: 55th Teap Vienna. Pabst. Tagung experimentell arbeitender Psychologen (2013), Wien. ISBN 9783899678529
- [5] Fastenmeier, W.; Gstalter, H.: Beitrag psychologischer Erkenntnisse und Methoden zur Bewertung von Fahrerassistenzsystemen (FAS). Zeitschrift für Arbeitswissenschaften, 1 (2008) S.15–24
- [6] Dziennus, M.; Kelsch, J.; Schieben, A.: Ambient light based interaction concept for an integrative driver assistance system – a driving simulator study. In D. de Waard, K.A. Brookhuis, A. Toffetti, A. Stuiver, C. Weikert, D. Coelho, D. Manzey, A.B. Ünal, S. Röttger, and N. Merat (Eds.). Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2015 Annual Conference (2016) S. 171-182
- [7] Laquai, F.; Chowanetz, F.; Rigoll, G.: A large-scale led array to support anticipatory driving. In 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) (2011) S. 2087 -2092
- [8] Maier, K.: Multimodaler Warnbaukasten : Entwicklung einer neuen Warnphilosophie für Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung unfallkritischer Bremsszenarien. Göttingen: Cuvillier (2014)
- [9] Utesch, F.: Unscharfe Warnungen im Kraftfahrzeug: Eignet sich eine LED-Leiste als Anzeige für Fahrerassistenzsysteme? Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhelmina. Diss. 2014
- [10] Löcken, A.; Müller, H.; Heuten, W.; Boll, S.: An Experiment on Ambient Light Patterns to Support Lane Change Decisions. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (2015) S. 505–510
- [11] Pfromm, M.; Cieler, S.; Bruder, R.: A Driver Assistance via Optical Information with Spatial Reference. Proceedings of the 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (2013) S. 2006–2011
- [12] Kelsch, J.; Dziennus, M.: Gradual action-oriented ambient stimuli as means for joint driver-automation system design. Presentation at the 6th international Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (2015)
- [13] ISO/TS 14198:2012(E). 2012. Road vehicles -- Ergonomic aspects of transport information and control systems -- Calibration tasks for methods which assess driver demand due to the use of in-vehicle systems
- [14] Continental AG: http://www.continental-corporation.com/www/pressportal_com_en/themes/press_releases/3_automotive_group/interior/press_releases/pr_2013_02_07_driver_focus_en.html

Die Pre-Crash Phase als Auslegeskriterium für zukünftige Fahrerassistenzsysteme

M.Sc. **Saskia Grünzel**, Dr. **Berthold Färber**,
Universität der Bundeswehr München, Neubiberg

Kurzfassung

Das Wissen über die letzten Sekunden vor einem Unfall liefert wichtige Informationen für die Unfallvermeidung und Fahrerassistenzsysteme. Über die Zeit unmittelbar vor einem Unfall gibt es im Bereich der Unfallforschung derzeit keine genauen Daten. Aus diesem Grund gehen viele Informationen für die Entwicklung zukünftiger Warn- und Assistenzfunktionen sowie das hoch automatisierte Fahren verloren. Grund hierfür ist, dass sich die letzten Sekunden vor einem Unfall nicht ausschließlich aus der physikalischen Auswertung eines Unfalles rekonstruieren lassen. Vor allem in dieser Zeit vor dem Unfall hat der Mensch einen sehr hohen Einfluss auf das Geschehen. Um das Ziel der „Vision Zero“ zu erreichen, müssen FAS in Richtung einer gänzlichen Unfallvermeidung weiterentwickelt werden. Um die best-möglichen Eingriffszeitpunkte künftiger FAS bestimmen zu können ist ein detailliertes Wissen über die Pre-Crash Phase von großer Bedeutung. Hierzu wird ein neues Schema vorgestellt, welches die Pre-Crash Phase in die Pre Phase, die Informationsphase, die Bewertungs-/Entscheidungsphase und die Handlungsphase aufteilt, anhand derer das Potential zukünftiger FAS abgeleitet werden kann.

Abstract (optional)

The knowledge about the last seconds before an accident occurs can provide valuable information for accident prevention and Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). Actually the knowledge about the time immediately before an accident is not sufficient. Thus much important information for the development of future warning and assistance systems gets lost. The reason for this lack of information is that the analysis and reconstruction of the last seconds before an accident on the basis of a physical parameters is incomplete. Especially during this period the human being has in most cases a large influence. To reach the goal 'vision zero', i.e. total accident prevention ADAS must become better and better. For determining the best possible intervention point of this future ADAS it is important to have a detailed knowledge about the process of the pre-crash phase. A new system for a detailed description of the pre-crash phase is presented. It divides the pre-crash phase into sub phases,

taking human information processing aspects into account and leading to rational base for the development of future ADAS.

1. Problemstellung

Trotz steigender Fahrzeugzulassungen sinkt die Anzahl der Verkehrstoten [1], [2]. Dies ist auf die erhebliche Verbesserung der aktiven und passiven Sicherheitssysteme zurückzuführen. Im Bereich der passiven Sicherheit, also der Unfallfolgenminderung, sind beispielsweise durch die Einführung von Airbag und Sicherheitsgurte maßgebliche Verbesserungen eingetreten. Im Bereich der aktiven Sicherheit hingegen gibt es noch ein deutliches Potential für unterstützende und vorausschauende FAS. Zukünftige FAS werden sich dem Bereich der gänzlichen Unfallvermeidung immer weiter nähern. Laut statistischem Bundesamt lassen sich 75 % der Unfälle mit Personenschäden auf menschliches Fehlverhalten zurückführen [3]. Dies zeigt, welche Potentiale in der künftigen Entwicklung von FAS liegen. Um diese Potentiale nutzen zu können und die bestmöglichen Eingriffszeitpunkte zu bestimmen ist jedoch ein detaillierteres Wissen über die unfallauslösenden Faktoren und ihre Einbettung in der Pre-Crash Phase von großer Relevanz.

Über die Zeit unmittelbar vor einem Unfall gibt es im Bereich der Unfallforschung derzeit keine genauen Daten. Aus diesem Grund gehen viele Informationen für die Entwicklung zukünftiger Warn- und Assistenzfunktionen sowie das hoch automatisierte Fahren verloren. Grund hierfür ist, dass sich die letzten Sekunden vor einem Unfall nicht ausschließlich aus der physikalischen Auswertung eines Unfalles rekonstruieren lassen, da der Mensch an dieser Stelle einen sehr großen Einfluss hat.

Um eine genauere Beschreibung der Pre-Crash Phase zu ermöglichen wird diese in unterschiedliche Phasen unterteilt, anhand derer eine bessere Ableitung zukünftiger FAS möglich sein soll.

2. Stand der Forschung

Bislang haben sich nur wenige publizierte Forschungen mit einer genaueren Beschreibung der Pre-Crash Phase beschäftigt. Einer der wenigen der eine Aussage zur Definition der Pre-Crash Phase macht ist Appel [4].

Appel [4] definiert die Pre-Crash- oder auch Unfalleinleitungsphase als den „Zeitraum bis zur Kollision einschließlich unfallbezogener Vorgeschichte und Einlaufbewegung der Fahrzeuge“.

In einer späteren Arbeit definieren Appel und Krabbel [5] die Pre-Crash Phase als den „Zeitraum vom Erkennen der kritischen Situation bis zum ersten Kontakt mit dem Unfallgegner“.

Im Unterschied zur ursprünglichen Definition von Appel beginnt die Pre-Crash Phase nach der neuen Definition erst mit dem Erkennen der kritischen Situation und beinhaltet die unfallbezogene Vorgeschichte nicht mehr. Diese ist der Pre-Crash Phase nun vorgelagert.

Die gesamte Vorunfallphase (Pre-Crash Phase mit unfallbezogener Vorgeschichte) wird maßgeblich durch den Fahrer, die Straßenumgebung und die aktive Sicherheit des Fahrzeuges sowie des Unfalls bestimmt [6].

Appel und Krabbel [5] erläutern am Beispiel einer Kurvenfahrt vereinfacht den Verlauf einer kritischen Situation, die zum Unfall führen kann, aber nicht muss (Bild 1).

Sie unterteilen die Vorunfallphase in fünf Abschnitte:

1. Fahren-Phase
2. Informationsaufnahme-Phase

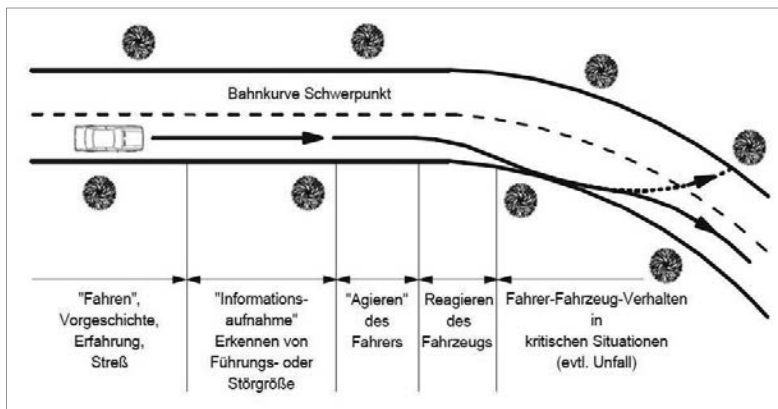


Bild 1: Zeitlicher Ablauf einer kritischen Situation [5] S. 19

3. Agieren-Phase
4. Reagieren-Phase
5. Fahrer-Fahrzeug-Verhalten

Die „Fahren“-Phase ist die der Pre-Crash Phase vorgeschaltete Phase, die die unfallbezogenen Vorgeschichte berücksichtigt. Sie beinhaltet den Unfall beeinflussende Faktoren, wie beispielsweise die Fahrerfahrung des Fahrers, seinen Stresspegel, oder auch den Müdigkeitszustand des Fahrer zum Fahrtzeitpunkt.

Der Pre-Crash Phase kann die Informationsaufnahme-, die Agieren- und die Reagieren-Phase sowie das Fahrer-Fahrzeug-Verhalten zugeordnet werden.

In der Informationsaufnahme-Phase erkennt der Fahrer mögliche Führungs- oder Störgrößen, welche einen Einfluss auf seinen Fahrverlauf haben. Führungsgrößen sind z.B. Fahr-

bahnmarkierungen, die den Fahrbahnverlauf angeben, oder auch Verkehrszeichen an die sich der Fahrer halten sollte. Störgrößen können z.B. ein auf die Fahrbahn rollender Ball sein, oder ein Tier, welches auf die Straße läuft. Auf diese Störgrößen muss der Fahrer entsprechend reagieren um einen Unfall zu verhindern.

Nachdem der Fahrer die kritische Situation erkannt hat entscheidet er in der Agieren-Phase, welche Maßnahmen er einleiten muss um diese Situation abzuwenden. An dieser Stelle hat die Fahrerfahrung des Fahrers einen großen Einfluss, da bei der Wahl der Maßnahme auf frühere Erfahrungen in ähnlichen Situationen zurück gegriffen wird.

Die Reaktion des Fahrzeugs auf die gewählte Aktion des Fahrers wird der Reagieren-Phase zugeordnet wird. Durch die Reaktion des Fahrzeugs kommt es dann zu Interaktionen zwischen Fahrer und Fahrzeug (Fahrer-Fahrzeug-Verhalten), die zum Unfall führen können. Kommt es z.B. nach dem Abkommen ins Bankett zu einem Verreißen des Lenkrades worauf mit einem zu starken Gegenlenken reagiert wird, kann dies im Folgenden zu einem Schleudervorgang führen, welcher in einer Kollision enden kann. Der Verlauf ab dem Zeitpunkt des ersten Gegenlenkens wird dem Fahrer-Fahrzeug-Verhalten zugeordnet.

3. Schwächen des Unfallphasen-Schemas nach Appel

Im Rahmen einer Expertenstudie, die mit Experten aus dem Bereich der Unfallforschung durchgeführt wurde, wurden 72 Unfälle mit mindestens zwei Unfallbeteiligten bewertet. Ziel der Studie war die Bestimmung, der unfallauslösende(n) Situation(en) eines Unfalls und die Zuordnung zu den Phasen der Pre-Crash Phase nach Appel und Krabbel [5]. Aufgrund dieser Zuordnung sollte es möglich sein, Potentiale für FAS abzuleiten.

Die Ergebnisse der Studie zeigten jedoch, dass die Aufteilung der Phasen nach Appel nicht sinnvoll ist für die Zuordnung der unfallauslösenden Situation. In vielen Fällen wählten die Experten zwar die gleiche Situation als unfallauslösend, ordneten sie aber verschiedenen Phasen zu. Am häufigsten traten Probleme bei der Unterscheidung der Zuordnung zwischen der Informationsaufnahme- und der Agieren-Phase sowie der Agieren- und Reagieren-Phase auf. Gerade bei Fällen, in denen die unfallauslösende Situation nicht ganz eindeutig war variierten die gewählten Phasen der Experten sehr häufig. Zum einen fiel die Zuordnung schwer, zum anderen erwiesen sich die Grenzen der Phasen als nicht klar genug definiert.

4. Zielsetzung der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es daher, das vorliegende Schema von Appel so anzupassen, dass die unfallauslösenden Situationen besser zugeordnet werden können und damit einen bessere Ableitung des FAS Potentials möglich ist.

Die Aufteilung der Phasen soll so gewählt werden, dass jede Phase klar definiert und die Abgrenzung der einzelnen Phasen voneinander eindeutig ist.

5. Neues Schema

Um eindeutigere und klarere Abgrenzung und Aufteilung der Pre-Crash Phase zu erreichen, orientiert sich das neue Schema an der 5-Step Methode der Audi Accident Research Unit (AARU) [7]. Die AARU ist ein interdisziplinäres Forschungsprojekt des Universitätsklinikums Regensburg in Zusammenarbeit mit der AUDI AG. Ziel des Forschungsprojektes ist die Steigerung der allgemeinen Verkehrssicherheit [8]. Die 5-Step Methode dient in der AARU zur Bestimmung der Unfallursachen und ist in drei Hauptbereiche unterteilt. Es wird unterschieden in menschliche, fahrzeugtechnische und Umwelt/Infrastruktur-Einflüsse. Diese drei Hauptkategorien werden wiederum weiter unterteilt und werden entsprechend immer detaillierter beschrieben.

Die menschlichen Einflüsse werden unterteilt in:

- Informationszugang,
- Informationsaufnahme,
- Informationsverarbeitung,
- Zielsetzung
- Handlung

Bei den fahrzeugtechnischen Einflüssen wird unterschieden zwischen:

- technischem Mangel,
- unzulässiger technischer Veränderung und
- Schnittstelle-Mensch-Maschine

Weiterhin werden die Einflussfaktoren aus dem Bereich der Umwelt und Infrastruktur unterschieden in:

- Zustand / Wartung
- Auslegung der Straße
- Faktoren aus der Natur
- Weitere Einflüsse

Die größten Schwierigkeiten bei der Zuordnung der unfallauslösenden Situation nach dem Schema von Appel traten bei der Unterscheidung auf, ob ein Fehler der Informationsaufnahme- oder Agieren-Phase bzw. der Agieren- oder Reagieren-Phase zugeordnet werden soll.

Um die Abgrenzung zwischen den einzelnen Phasen klarer abgrenzen zu können unterscheidet das neue Schema die folgenden Phasen (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**):

1. Pre Phase
2. Informationsphase
3. Bewertungs-/Entscheidungsphase und
4. Handlungsphase.

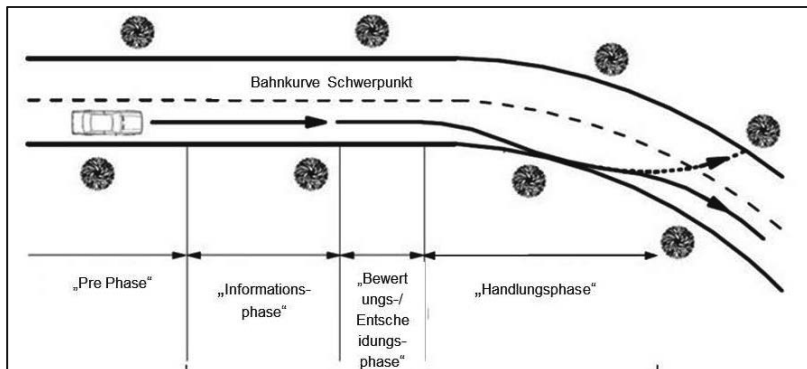


Bild 2: Neues Schema der Pre-Crash Phase

Die Unterkategorien der 5-Step Methode werden den einzelnen Phasen des neuen Schemas zugeordnet und somit in eine zeitliche Reihenfolge in Bezug auf einen Unfall gebracht. Durch die Zuordnung der Unterkategorien zu den einzelnen Phasen sind die Inhalte der einzelnen Phasen klar bestimmt, sodass eine eindeutigere Zuordnung der Fehler, die zu einem Unfall führen, möglich ist.

Die „Pre Phase“ startet mit dem Fahrtantritt und beinhaltet alle Eigenschaften und Zustände, die der Fahrer bei Fahrtantritt mitbringt. Weiterhin berücksichtigt diese Phase die Umwelt- und Infrastruktureinflüsse die zu dieser Zeit vorgeherrscht haben. Der Pre Phase können somit die Unterkategorien Technischer Mangel, unzulässige Veränderungen am Fahrzeug und Schnittstelle Mensch-Maschine aus der Kategorie „Einfluss aus dem Bereich der Fahrzeugtechnik“ zugeordnet werden. Weiterhin werden die vier Unterkategorien der Kategorie „Umwelt und Infrastruktur“ (Zustand/Wartung, Auslegung der Straße, Faktoren aus der Natur und weitere Einflüsse) der Pre Phase zugeordnet. Eigenschaften und Zustände die der Fahrer mitbringt können beispielsweise Müdigkeit, Stress, Fahrerfahrung oder auch die Laune des Fahrers sein. Diese kurz- oder langfristigen Eigenschaften und Zustände des Fahrers

können sein Unfallrisiko steigern, allerdings führen sie nicht zwangsläufig zum Unfall, sondern sind erst in Kombination mit anderen auftretenden Einflussfaktoren unfallverursachend. Die „Informationsphase“ startet zu dem Zeitpunkt, zu dem dem Fahrer erstmalig theoretisch alle Informationen zur Verfügung stehen, um eine kritische Situation zu erkennen bzw. wahrzunehmen. Dieser Phase werden die Unterkategorien Informationszugang und Informationsaufnahme aus der Kategorie „menschliche Einflüsse“ zugeordnet. Mögliche Fehler des Informationszuganges können Sichtverdeckungen durch Objekte innerhalb oder außerhalb des Fahrzeugs sein oder auch Informationsmaskierung durch Witterung oder mangelnde Kontraste. Ist der Fahrer abgelenkt durch Dinge im Verkehrsraum oder beispielsweise durch Mitfahrer, handelt es sich um einen Fehler in der Informationsaufnahme und wird ebenfalls der Informationsphase zugeordnet. Auch eine zu niedrige Aktivierung des Fahrers, oder ein falscher Aufmerksamkeitsfokus gehört in diese Kategorie.

Die „Bewertungs-/Entscheidungsphase“ beginnt mit dem tatsächlichen Erkennen bzw. Wahrnehmen der kritischen Situation durch den Fahrer. In dieser Phase werden, auf Grundlage der Informationen aus der Informationsphase, die einzelnen möglichen Aktionen bewertet um die bestmögliche Aktion auszuwählen, welche die Kollision noch verhindern könnte. Aus der Kategorie „menschliche Einflüsse“ fallen die Unterkategorien Informationsverarbeitung und Zielsetzung in diese Phase. Kommt es zum Unfall, weil der Fahrer eine falsche Erwartung bezüglich des Unfallortes oder des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer hat, ist dies ein Fehler in der Informationsverarbeitung. Auch Fehleinschätzungen der Geschwindigkeit oder der Distanz in Bezug auf andere Verkehrsteilnehmer fallen in diese Unterkategorie. Trifft der Fahrer eine falsche Entscheidung oder begeht vorsätzlich einen Regelverstoß, welche zu einem Unfall führen, werden diese Fehler der Zielsetzung zugeordnet und gehören zur Bewertungs-/Entscheidungsphase.

In der „Handlungsphase“ beginnt die Umsetzung der in der Bewertungs-/Entscheidungsphase gewählten Aktion. Fehler die dieser Phase zugeordnet werden können, treten bei der 5-Step Methode in der Unterkategorie Handlung auf, welche zu den menschlichen Einflüssen gehört. Handlungsfehler können z.B. Verwechslungs- und Bedienfehler wie Verwechslung oder Abrutschen bei der Pedalerie sein. Auch Fehler in der Reaktion, welche zum Unfall führen, wie zu starkes oder zu schwaches Lenken oder Bremsen, gehören als Reaktionsfehler zur Handlung. Auch Handlungseinschränkungen aufgrund des Alters, welche eine korrekte Ausführung der Aktion behindern, werden der Handlungsphase zugeordnet.

In einer weiteren Expertenstudie wurden 35 Unfälle im Hinblick auf die Zuordenbarkeit der unfallauslösenden Situation nach dem neu entwickelten Schema bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Neuaufteilung der Pre-Crash Phase und die genauere Definition der

einzelnen Phasen, die Zuordnung eindeutiger möglich ist. Die Experten stimmten bei der Wahl der unfallauslösenden Situation, sowie der Zuordnung zu einer Phase fast vollständig überein.

6. Ableitung FAS Potential

Aufgrund der Neueinteilung der Pre-Crash Phase lassen sich mögliche FAS Potentiale einfacher ableiten bzw. Eingriffszeitpunkte leichter zuordnen. Analog zum MMI Baukasten aus dem UR:BAN Projekt lassen sich die dort getroffenen Unterteilungen auf das neue Schema anwenden. Der MMI Baukasten unterteilt die FAS in drei Strategien: „Warnung & Eingriff“, „Regelung“ und „Handlungsvorschlag“ [9]. Die Strategie „Warnung & Eingriff“ wird weiter unterteilt in Frühwarnung, Warnung, Akutwarnung, Noteingriff und Deeskalation. Diese Unterteilungen stehen in einer zeitlichen Abfolge, die auf das neue Schema angewendet werden kann. Treten in der Pre Phase oder der Informationsphase Fehler auf, die unfallinduzierend sind, so fällt dies unter die Kategorie Frühwarnung. Das bedeutet, dass Fehler, die in der Pre Phase bzw. der Informationsphase auftreten, durch Frühwarnung systemseitig schon vermieden werden können. Der Fahrer wäre, durch die Warnung auf eine potentielle Gefahr hingewiesen worden und hätte noch entsprechend reagieren können. Treten Fehler in der Bewertungs-/ Entscheidungsphase auf, so können diese durch eine Warnung ebenfalls behoben werden. Fehler in der Handlungsphase können bei der Strategie „Warnung und Eingriff“ durch die Akutwarnung beeinflusst werden. Die Akutwarnung fordert den Fahrer zu einer sofortigen Handlung auf, da er spätestens zu diesem Zeitpunkt eingreifen muss. Sollte der Fahrer auf diese Akutwarnung nicht reagieren, bleibt nur noch der Noteingriff des Fahrzeugs, um die Unfallfolgen zu vermindern, bzw. zu verhindern.

Generell lässt sich festhalten, dass nach dem neuen Schema Fehler, die in der Pre Phase und der Informationsphase auftreten, durch assistierende Systeme, die den Verkehrsraum beobachten, vermieden werden können. Der Fahrer kann allein durch Warnung vor der kritischen Situation geschützt werden. Fehler in der Bewertungs-/ Entscheidungsphase können durch Warnung und assistierende Systeme, die den Fahrer unterstützen, vermieden werden. Treten Fehler in der Handlungsphase auf, so können diese durch eingreifende bzw. autonome FAS behoben werden. Insofern bietet die neue Taxonomie der Vorunfallphase eine gute Basis für die nutzergerechte Auslegung von FAS.

- [1] http://www.bast.de/DE/Statistik/Unfaelle-Downloads/getoetete-grafik.pdf;jsessionid=1108ED49FC6E3506BB75C11D4975F8C0.live11291?__blob=publicationFile&v=7 23.08.2016
- [2] <https://www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/jahreszahlen/neuzulassungen.html> 23.08.2016
- [3] <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/Tabellen/FehlverhaltenFahrzeugfuehrer.html> 23.08.2016
- [4] Appel, H. Unfallaufklärung aus technischer Sicht. In H.-J. Wagner (Hrsg.): Verkehrsmedizin S.424-437. Berlin, Heidelberg: Springer 1984
- [5] Appel, H. & Krabbel, G.: Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion. Kippenheim: INFORMATION Ambis 1994
- [6] Johannsen, H.: Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion – Grundlagen der Unfallaufklärung. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2013
- [7] Jaensch, M.; Otte, D.; Pund, B., Chiellino, U., Hoppe, M.: Implementation of ACASS-Accident Causation Analysis with seven Steps – in In-Depth Accident Study GIDAS. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik, Heft 72, 2008 S. 107-124
- [8] <http://www.aaru.de/aaru/verkehrsunfallforschung/> 23.08.2016
- [9] Werneke, Dr. J.: UR:BAN 3. Meilensteinbericht (Q12): Implementierung funktionspezifischer MMI Konzepte in Funktionsträger und Demonstratoren. 2015

Der Einfluss fahrfremder Tätigkeiten und Manöverlängsdynamik auf die Komfort- und Sicherheitswahrnehmung beim hochautomatisierten Fahren

Ein Argument für die Adaptivität automatisierter Fahrfunktionen

Michael Festner, Hannah Baumann, BMW Group, München;
Prof. Dr.-Ing. Dieter Schramm, Lehrstuhl für Mechatronik,
Universität Duisburg-Essen

Kurzfassung

Der Fahrstil hochautomatisierter Fahrfunktionen stellt einen wichtigen Stellhebel zur Erhöhung der Kundenwertigkeit und -akzeptanz dieser Innovation dar. Die Art der durchgeführten fahrfremden Tätigkeit und der daraus resultierende Ablenkungsgrad üben einen relevanten Einfluss auf die Komfort- und Sicherheitswahrnehmung aus. Aus diesem Grund wurde in einer Studie der Einfluss verschiedener fahrfremder Tätigkeiten in Abhängigkeit der Verzögerungsdynamik auf das Wohlfühl analysiert. Die resultierende Aussage adressiert die viel diskutierte Frage, wie sich fahrfremde Tätigkeiten auf die Wahrnehmung der Längs- und dabei insbesondere der Verzögerungsdynamik auswirkt. Die Ergebnisse zeigen die Notwendigkeit einer manuellen Adaptionsfähigkeit automatisierter Fahrfunktionen, da das Wahrnehmungsspektrum und Toleranzniveau der Fahrer, die beim hochautomatisierten Fahren (HAF) mehr und mehr zu Passagieren werden, einen weiten Bereich einnimmt.

Abstract

The driving style of highly automated driving systems represents an important lever to increase the customer value and acceptance of the innovation itself. Moreover, comfort and subjective safety perceived by the customer depend on the kind of non-driving related task and, as a result, the level of distraction. For this reason the drivers' sense of well-being was analyzed in a study with regard to different deceleration dynamics and non-driving related tasks performed at that time. The findings address the controversial issue how the tolerance towards longitudinal dynamics, particularly deceleration dynamics, is affected. In conclusion, the results show the need for a manual adaptability of highly automated driving systems as the drivers' spectrum of perception and tolerance range diverges along with his transition to a passenger.

1. Motivation

Das automatisierte Fahren (AF, engl. AD) stellt derzeit den bedeutendsten Entwicklungstrend in der Automobilindustrie dar [1]. Inzwischen stellt sich nicht mehr die Frage, ob automatisierte Fahrzeuge auf die Straße kommen, sondern vielmehr wann es soweit sein wird [2]. Die Verantwortung zur Fahrzeugführung wird mehr und mehr vom Fahrzeug übernommen, um den Komfort und die Sicherheit als kundenrelevante Zielgrößen für den Fahrer zu erhöhen. Hierfür wurden 5 elementare Automatisierungsstufen identifiziert, die sich anhand einer veränderten Verantwortungsteilung zwischen Fahrer und Fahrzeug unterscheiden lassen [3]. Dieser Übergang vom manuellen Fahrer zum Passagier [4] wird in der folgenden Abbildung 1 verdeutlicht.

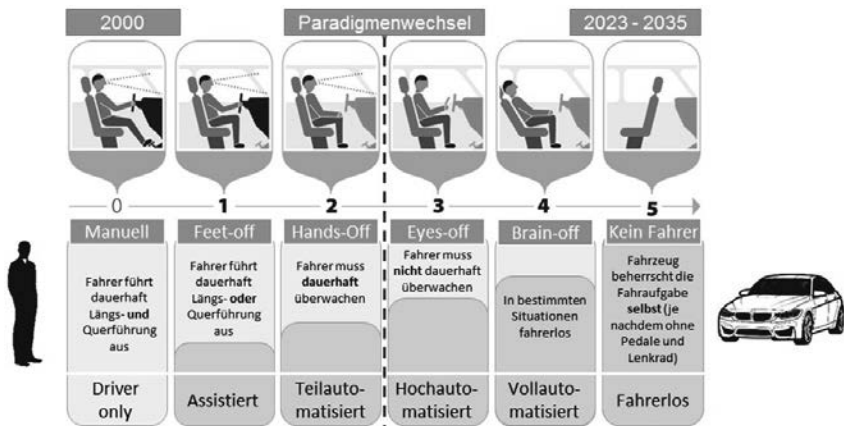


Bild 1: Fünf Automatisierungsstufen der Verantwortungsteilung zwischen Fahrer und Fahrzeug nach BASt (in Anlehnung an [3] und [5])

Der eingezeichnete, grundlegende Paradigmenwechsel durch das vernetzte und automatisierte Fahren – vom Autofahrer zum Autopiloten [6] – verlangt ein Umdenken hinsichtlich der Auslegungskriterien neuer Funktionen und dem bisher gesetzten Fokus zur Erreichung einer hohen Kundenzufriedenheit. Um das Potenzial dieser revolutionären Technologie möglichst kundenwertig gestalten zu können, ist eine Bewertung des Wohlfühls des Fahrers beim automatisierten Fahren hinsichtlich der Manöverdynamik erforderlich. Dazu ist es essentiell, die „Use of (H)AD-Time“ durch einen für den Anwendungsfall optimierten Fahrstil bestmöglich nutzbar zu gestalten. Während die Fahraufgabe dabei zeitweise komplett von der automatisierten Funktion übernommen wird, ist eine dauerhafte Überwachung des Verkehrs nicht mehr notwendig, was die Beschäftigung mit fahrfremden Tätigkeiten ermöglicht. Es ist davon

auszugehen, dass das Komfortgefühl beim automatisierten Fahren, genau wie beim manuellen Fahren, in erster Linie vom Fahrstil des Fahrers bzw. der Fahrfunktion abhängig ist [7]. Vor diesem Hintergrund ist es entscheidend, die Wahrnehmungsverschiebung der Einflüsse auf das Wohlfühl des Fahrers zu kennen, welcher während des automatisierten Fahrens immer mehr zum Passagier wird. Griesche und Dotzauer vom DLR [8] beschreiben die Herausforderung als die Differenzen zwischen der Auslegung der Automation und den individuellen Präferenzen des Fahrers. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, die Zielgrößen der Auslegung aus Kundensicht zu definieren (Abschnitt 2), um die Einflussfaktoren auf das Wohlfühl (Abschnitt 3) in einem abgegrenzten Use-Case (Abschnitt 4) im Detail analysieren zu können.

2. Beschreibung der Zielgröße Wohlfühl und deren Einflussfaktoren

Der Begriff Kundengesamterlebnis umfasst beim automatisierten Fahren die gesamthafte Betrachtung all der für den Fahrer wahrnehmbaren Vorzüge, die sich aus den übergreifenden Trends der Automatisierung, Digitalisierung und Vernetzung ergeben. Dabei handelt es sich um ein komplexes Konstrukt aus verschiedenen Arten des Kundennutzens, die unter anderem aus den kundenrelevanten Entwicklungsfeldern der Innenraumgestaltung, der Ausgestaltung der Verantwortungsübergänge zwischen Fahrer und Fahrzeug, der digitalen Durchgängigkeit oder der Mode Awareness¹ erwachsen. Neben den Einflussfaktoren Luftqualität, Lärm, Temperatur und Vibrationen, die auch bei manuell gesteuerten Fahrzeugen den Passagierkomfort im Innenraum beeinflussen, rücken mit der Automatisierung weitere Größen wie fahrdynamische Beeinträchtigungen, Natürlichkeit der Fahrmanöver, wahrnehmbare Sicherheit und Motion Sickness² mehr in den Fokus [3].

In diesem Zusammenhang steht auch die Fragestellung, welche Auswirkungen sich durch den Fahrstil und damit der Dynamikausprägung einer automatisierten Fahrfunktion auf das Komfortempfinden ergeben. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Fokus dabei bewusst auf die hochautomatisierten Zeitanteile der Fahrt gelegt, in denen die Fahraufgabe vollständig vom System übernommen wird und keine Übernahmesituation zu erwarten ist.

Engelbrecht (2013) stellt fest, dass in der Literatur zum Teil große Uneinigkeit über den Begriff des Komforts herrscht und auch gegensätzliche Auffassungen zu finden sind [9]. Dies ist unter anderem durch inhaltlich weit divergierende Forschungsfragen über viele Branchen hinweg zu erklären, in denen der Begriff Komfort unterschiedlich interpretiert wird. Für hochautomatisierte Fahrfunktionen beschreibt das Wohlfühl im Wesentlichen übergeordnet die beiden Zielgrößen des **Fahrkomforts** und der **subjektiven Sicherheitswahrnehmung**. Da-

¹ Bewusstsein über den Modus, in dem das Fahrerassistenzsystem sich gerade befindet

² Bewegungskrankheit, auch Reisekrankheit, fachsprachlich als „Kinetose“ bezeichnet

bei werden auch die verwandten Teilaspekte Automations-vertrauen, Akzeptanz bzw. Erwartungshaltung, Motion Sickness sowie Souveränität und Nachvollziehbarkeit der Fahrzeugbewegungen teilweise mit abgedeckt.

Der Komfort in all seinen Facetten wird allerdings sehr subjektiv empfunden und die ihn beschreibenden Größen sind oftmals schwierig zu messen oder nicht bekannt [10]. Daher ist eine objektive Beschreibung nach mathematischen Gesetzmäßigkeiten nicht ohne weiteres möglich [11]. Aus diesem Grund musste eine für den Versuch spezifische Operationalisierung der Messgröße gefunden werden.

Grundsätzlich gibt es eine Vielzahl an Einflussfaktoren auf das Wohlfühl während einer hochautomatisierten Fahrt. Es ist davon auszugehen, dass sich die Einflussstärke einzelner Parameter beim Übergang vom manuellen zum hochautomatisierten Fahren verändern wird, einige wegfallen und neue hinzukommen. In diesem Zusammenhang konnten drei übergreifende Haupteinflusskategorien auf das Wohlfühl identifiziert werden, diese sind **Fahrzeug**, **Umfeld** und **Fahrer**, siehe Abbildung 2. Durch den Fahrerzustand, der der Hauptkategorie Fahrer untergeordnet ist, ergibt sich eine beachtenswerte Verschiebung der Wahrnehmung der Längs- und Querdynamik, z.B. hinsichtlich der Größen Ruck³ und Beschleunigung. Daher wird dieser Einfluss bei der vorliegenden Studie in den Mittelpunkt gestellt.

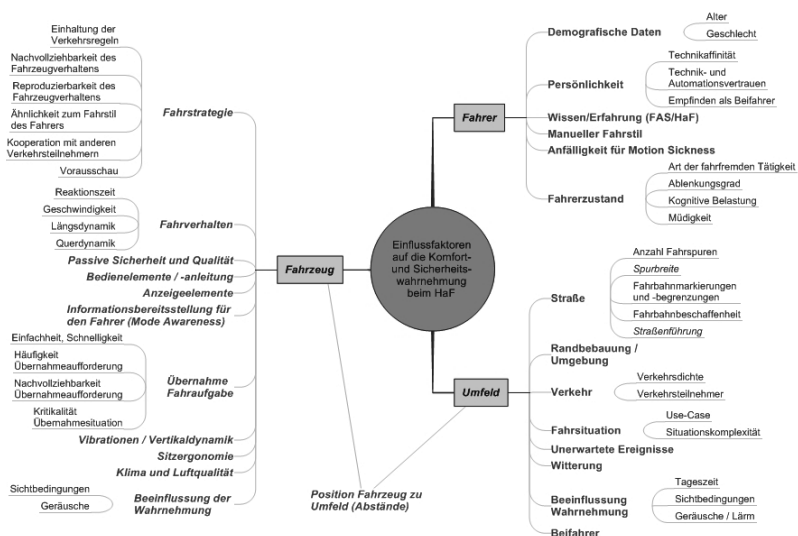


Bild 2: Einflussfaktoren auf das Wohlfühl des Fahrers während einer hochautomatisierten Fahrt

³ Erste Ableitung der Beschleunigung; zweite Ableitung der Geschwindigkeit

3. Studiendesign

Das längsdynamische Verhalten eines Fahrzeugs bestimmt maßgeblich sowohl den Fahrspaß bei manueller Fahrt als auch das Komfort- und Sicherheitsempfinden bei teil- und hochautomatisierter Fahrzeugführung [12]. Um eine realistische Wirkung dynamischer Größen (Beschleunigung, Ruck) und Abstände auf das Wohlfühl zu erreichen, wurde der Versuch nicht im Simulator, sondern mit einem Realfahrzeug auf dem BMW Versuchsgelände durchgeführt. Da die Probanden sich während des Versuchs mit fahrfremden Tätigkeiten auf einem fahrzeugfest verbauten Tablet beschäftigen sollen und den Verkehr dadurch nicht dauerhaft überwachen können, nehmen diese auf dem Beifahrersitz Platz.

Als ein typischer Use-Case mit relevanter Fahrzeuginlängsdynamik für die erste Entwicklungsstufe des automatisierten Fahrens auf der Autobahn wurde eine Verzögerung von 130 km/h (Richtgeschwindigkeit) auf ein langsamer fahrendes Vorderfahrzeug (80km/h, typische LKW-Geschwindigkeit) gewählt. Bei einer ACC-Annäherung auf ein bremsendes oder langsamer vorausfahrendes Fahrzeug besteht potenziell die höchste Sensibilität der Insassen bezüglich des Bremsbeginns und -verhaltens [13]. Allgemein beschreibt eine Verzögerung auf ein mit konstanter Geschwindigkeit fahrendes Vorderfahrzeug ungefähr 16% aller Hauptmanöver auf der Autobahn [7].

Um den Einfluss lateraler Dynamik und etwaiger Wechselwirkungen zwischen Längs- und Querdynamik auszuklammern, wurde ein Manöver ohne laterale Bewegungen gewählt. Für diesen Anwendungsfall wurden drei verschiedenartige Dynamikausprägungen (D1-D3) hinsichtlich maximaler Verzögerung, Ruck und Abstand zum Vorderfahrzeug realisiert. Diese drei Manöverausprägungen wurden mit drei verschiedene fahrfremden Tätigkeiten kombiniert: den **Verkehr beobachten** (T1), einen **Artikel lesen** (T2) und eine **Zahlenfolge schreiben** (T3). T2 und T3 wurden auf einem einstellbaren, fahrzeugfest verbauten Tablet ausgeführt. Dadurch konnten drei Ablenkungsgrade hinsichtlich visueller, kognitiver und motorischer Ablenkung realisiert werden. Um den Einfluss der fahrfremden Tätigkeit auf den Komfort und die subjektive Sicherheit betrachten zu können, wurde von den Probanden jede der 9 Kombinationen bewertet. Nach jedem erlebten Manöver wurden

- das erlebte Wohlfühl: 7-stufige Kunin-Skala [14] anhand von Gesichtern von -3 bis +3
- der wahrgenommene Komfort: 5-stufige Skala von „sehr unkomfortabel“ bis „sehr komfortabel“ mit jeweils 3 Tendenzkategorien (- o +) von 0 bis 15
- die subjektive Sicherheit: 5-stufige Skala von „sehr unsicher“ bis „sehr sicher“ mit jeweils 3 Tendenzkategorien (- o +) von 0 bis 15

mit einer zugehörigen Begründung für die Bewertung abgefragt. Darüber hinaus wurden in einem Vorgebogens demografische Daten, Erfahrungen mit Fahrerassistenzsystemen sowie Einstellung und Erwartung gegenüber zukünftigen Systemen erhoben. Im Rahmen eines Abschlussfragebogens wurden unter anderem Präferenzen hinsichtlich fahrfremder Tätigkeiten während einer hochautomatisierten Fahrt abgefragt. An der Studie nahmen 33 Probanden (6 Frauen, 27 Männer) im Alter von 23 bis 55 Jahre teil – das Durchschnittsalter lag bei 32 Jahren mit einer Standardabweichung von 8 Jahren. Es handelte sich um Laien mit durchschnittlicher FAS-Erfahrung, die überwiegend selbst fahren und nur selten auf dem Beifahrersitz Platz nehmen.

4. Studienergebnisse

Um eine eindeutige Unterscheidbarkeit der durch Applikationsparameter eingestellten Dynamiken gewährleisten zu können, wurden die charakteristischen Größen aufgezeichnet und im Nachgang kategorisiert. In Tabelle 1 werden die Kenngrößen der beiden verwertbaren Dynamikausprägungen gegenübergestellt. Aus den Durchschnittswerten wird die applizierte Differenz bei allen drei Größen ersichtlich. Insbesondere beim gemessenen Ruck, der einen wesentlichen Einfluss auf die vestibuläre Wahrnehmung ausübt, geht der Unterschied deutlich hervor.

Tabelle 1: Kenngrößen der Dynamikausprägung der Verzögerungsmanöver (130 auf 80 km/h)

	D1			D3		
	$ \bar{x} $	$ Min $	$ Max $	$ \bar{x} $	$ Min $	$ Max $
Maximale Längsbeschleunigung	$1,7 \frac{m}{s^2}$	$1,6 \frac{m}{s^2}$	$1,9 \frac{m}{s^2}$	$1,9 \frac{m}{s^2}$	$1,8 \frac{m}{s^2}$	$2,2 \frac{m}{s^2}$
Maximaler Ruck	$1,3 \frac{m}{s^3}$	$1,1 \frac{m}{s^3}$	$1,6 \frac{m}{s^3}$	$2,9 \frac{m}{s^3}$	$2,4 \frac{m}{s^3}$	$3,3 \frac{m}{s^3}$
Abstand zum Vorderfahrzeug bei Manöverstart	100 m	103 m	114 m	91 m	83 m	96 m

In Abschnitt 2 wird die Komfort- und Sicherheitswahrnehmung als Bestandteil des übergreifenden Wohlgefühls definiert. Aus den Bewertungen der Probanden lässt sich ablesen, dass mit einem höher eingeschätzten Wohlgefühl auch höhere Werte von Komfort- und Sicherheitswahrnehmung einhergehen. Die Korrelationskoeffizienten liegen für das Wohlgefühl und dem Sicherheitswahrnehmung bei $r = 0,79$ und für das Wohlgefühl und Komfortwahrnehmung bei $r = 0,64$. Darüber hinaus korrelieren die beiden untergeordneten Größen des Kom-

fort- und Sicherheitswahrnehmung ebenfalls mit $r = 0,67$. Dies lässt die Verknüpfung der drei Zielgrößen deutlich werden.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Bewertungen der Verzögerungsmanöver durch Mittelwerte und Standardabweichungen für die einzelnen Dynamik-Tätigkeitskombinationen dargestellt. Mit Hilfe eines zweiseitigen t-Tests ($\alpha = 0,05$) konnte nachgewiesen werden, dass die Dynamik der Verzögerungsmanöver einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung der 3 Zielgrößen ausübt. Die niedrigere Dynamikausprägung D1 wurde bei allen drei Tätigkeiten im Mittel besser bewertet als D3.

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen der Manöverbewertungen

		T1 Verkehr beobachten	T2 Artikel lesen	T3 Zahlenfolge schreiben
D1	Wohlgefühl	$\bar{x} = 2,3$ ($s = 0,8$)	$\bar{x} = 2,2$ ($s = 0,9$)	$\bar{x} = 2,2$ ($s = 0,8$)
	Komfortwahrn.	$\bar{x} = 12,5$ ($s = 2,2$)	$\bar{x} = 12,6$ ($s = 2,5$)	$\bar{x} = 12,5$ ($s = 2,2$)
	Sicherheitswahrn.	$\bar{x} = 13,2$ ($s = 1,8$)	$\bar{x} = 13,3$ ($s = 1,7$)	$\bar{x} = 13,3$ ($s = 1,7$)
D3	Wohlgefühl	$\bar{x} = 1,7$ ($s = 1,2$)	$\bar{x} = 1,8$ ($s = 1,1$)	$\bar{x} = 1,8$ ($s = 1,1$)
	Komfortwahrn.	$\bar{x} = 11,2$ ($s = 2,8$)	$\bar{x} = 11,4$ ($s = 2,7$)	$\bar{x} = 11,2$ ($s = 2,7$)
	Sicherheitswahrn.	$\bar{x} = 11,4$ ($s = 2,9$)	$\bar{x} = 11,9$ ($s = 2,6$)	$\bar{x} = 12,2$ ($s = 2,2$)

Beim Einfluss der fahrfremden Tätigkeit und damit des Ablenkungsgrades ergab sich kein gleichermaßen einheitliches Bild. Die Einflussrichtung der fahrfremden Tätigkeit auf die Zielgrößen ist demnach nicht bei allen Probanden übereinstimmend. Da der Effekt eines höheren Ablenkungsgrades bei einigen Probanden bei D3 zu einem erniedrigten Komfortempfinden führt, andere dies allerdings als angenehmer wahrgenommen haben, lässt sich am Mittelwert keine signifikante Veränderung zu D1 ablesen. Durch den Anstieg der Standardabweichungen von D1 zu D3 bei allen Tätigkeiten über alle Zielgrößen hinweg, lässt sich eine individuelle Dynamikwahrnehmung mit einer unterschiedlichen Akzeptanzschwelle der Probanden begründen. Während die weniger dynamische Ausprägung des Verzögerungsmanövers mit weniger Streuung (s klein) beurteilt wurde, geht die Bewertung des Komfort- und Sicherheitsempfindens sowie des Wohlgefühls bei einer höheren Dynamik stärker auseinander.

Wohingegen 12 Probanden (37%) die subjektive Sicherheit von D1 bei T3 besser als bei T1 bewerteten, fühlten sich 12 (37%) bzw. 8 (25%) gleich bzw. sogar weniger sicher. Zum Beispiel reicht bei D1 die Abweichung der Bewertung der subjektiven Sicherheit von T2 bzw. T3 im Vergleich zu T1 von -4 bis +4. Acht (25%) der Probanden gaben bei mind. einem Manöver an, dass das Verzögerungsmanöver beim Ausüben der fahrfremden Tätigkeit störend war oder ihre Konzentration dadurch beeinträchtigt wurde.

Darüber hinaus lassen sich Bewertungstendenzen in Anhängigkeit der persönlichen Merkmale und Voraussetzungen identifizieren, die allerdings nicht signifikant sind. So führt beispielsweise eine zu Beginn der Studie selbst eingeschätzte, positivere **Stimmung** der Probanden zu einer im Mittel erhöhten Bewertung des Komfort- und Sicherheitsempfindens. Mit höherem **Alter** zeigt sich eine gegenläufige Tendenz, also eine niedrigere Bewertung der beiden Zielgrößen. Eine weitere Bewertungstendenz geht mit den **Witterungsbedingungen** einher. Bei Sonnenschein wurde im Mittel besser bewertet als bei bewölktem Himmel, am schlechtesten fiel die Bewertung bei Regen aus. Dies ist auf die einhergehende Verschlechterung der Sichtverhältnisse zurückzuführen.

Nach den im Rahmen des Versuchs gesammelten Erfahrungen wurden die Probanden befragt, welche der Versuchstätigkeiten sie während einer hochautomatisierten Fahrt ausführen würden (Mehrfachnennungen möglich). 90% der Versuchsteilnehmer gaben an, den Verkehr zu beobachten. 88% bzw. 82% teilten mit, sich mit der fahrfremden Tätigkeit „Artikel lesen“ bzw. „Schreiben“ auf einem fahrzeugfesten Tablet zu beschäftigen, sofern dies keine sicherheitsrelevanten Auswirkungen hat. Insgesamt gaben 36% der Probanden an, keine Störeinflüsse bei der Ausführung der Tätigkeiten erlebt zu haben. Die Übrigen merkten neben den störenden Vibrationen des Tablets vor allem den abrupten Beginn des Manövers (Ruck), die Stärke der Bremsung (Maximalbeschleunigung) sowie die Unkenntnis über den Grund der Verzögerung als negativ beeinflussende Faktoren an.

Durch die Studie war es den Probanden möglich, erste Erfahrungen mit fahrfremden Tätigkeiten während einer hochautomatisierten Fahrt zu sammeln. Im Abschlussfragebogen konnten sie die ihrer Meinung nach wichtigsten Voraussetzungen für ein angenehmes Ausüben von Tätigkeiten bei HAF festzuhalten. Mit 22 Nennungen (67%) wurde dem Fahrkomfort hierbei mit Abstand der größte Stellhebel zugeschrieben. Das bedeutet, dass mit einer angemessenen Trajektorienwahl und dem damit verbundenen Verlauf der Längsbeschleunigung das Wohlfühl positiv beeinflusst werden kann. Bei durchgehender Beobachtung des Verkehrs während einer hochautomatisierten Fahrt wird der eingehaltene Sicherheitsabstand mit 88% als sehr relevant eingeschätzt [15]. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde dieser, begründet durch die Ablenkung, mit 3% allerdings weit weniger wichtig bewertet.

5. Diskussion und Ausblick

Zusammenfassend lässt die Studie den Bedarf einer Adaptionsfähigkeit der Dynamikausprägung hochautomatisierter Fahrfunktionen deutlich werden, um das Wohlfühl einschließlich des wahrgenommenen Komforts und des subjektiven Sicherheitsgefühls der Fahrer und Passagiere zu erhöhen. Da die Beeinträchtigung durch die Fahrzeuglängsdynamik beim Ausführen fahrfremder Tätigkeiten sehr individuell empfunden wird, ist eine einheitliche Dynamikausprägung für alle Fahrsituationen und Ablenkungsgrade suboptimal. Diese könnte durch eine manuelle Einstellbarkeit besser auf die Bedürfnisse des Fahrers abgestimmt werden und dadurch den Kundennutzen einer automatisierten Fahrfunktion erhöhen. Aus den Ergebnissen können im ersten Schritt Gestaltungsempfehlungen in Form von Grenzwerten für Beschleunigung und Ruck für einen speziellen Use-Case abgeleitet werden. Bedingte Abhängigkeiten zu anderen Einflussfaktoren können allerdings noch nicht detailliert dargestellt werden.

In zusätzlichen Studien sollten neben weiteren relevanten Längsführungsmanövern (z.B. Beschleunigung aus mittleren Geschwindigkeiten), auch querdynamische Einflüsse (z.B. Spurwechselmanöver) auf das Wohlfühl analysiert werden. Hierbei ist auf ein möglichst reales Setting der Versuchsbedingungen zu achten, um Störeinflüsse auf die Zielgrößen zu minimieren. Eine Untersuchung im Realverkehr, bei der die Probanden die fahrfremden Tätigkeiten auf einem realitätsnahen Infotainment-System vom Fahrersitz ausführen können, ist zweckmäßig. Um das komplexe Netz an Wechselwirkungen der Einflussfaktoren für eine gesamthafte Bewertung abbilden zu können, bieten sich für die weitere Forschungsarbeit Methoden des maschinellen Lernens an.

6. Literaturangaben

- [1] Silberg, G.; Wallace, R.; Matuszak, G.; Plessers, J.; Brower, C.; Subramanian, D.: Self-driving cars: The next revolution. KPMG und Center for Automotive Research CAR, 2012.
- [2] The Boston Consulting Group: Revolution in the Driver's Seat. The road to autonomous vehicles. Unter Mitarbeit von Mosquet, X.; Dauner, T.; et al., 2015.
- [4] Elbanhawi, M.; Simic, M.; Jazar, R.: In the Passenger Seat: Investigating Ride Comfort Measures in Autonomous Cars. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine 7(3) 2015 S. 4-17.

- [3] Gasser, T. M.; Arzt, C.; Ayoubi, M.; Bartels, A.; Bürkle, L.; Eier, J.; Flemisch, F.; Häcker, D.; Hesse, T.; Huber, W. (BASt): Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Fahrzeugtechnik (83) 2012.
- [5] Braun, C.: Revolution in der Automobil-Industrie. Finanz und Wirtschaft, Unternehmen/Industrie, 2015. <http://www.fuw.ch/article/die-revolution-in-der-automobilindustrie-beginnt-jetzt/>
- [6] Bundesministerium für Verkehrswesen und digitale Infrastruktur: Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren. Leitanbieter bleiben, Leitmarkt werden, Regebetrieb einleiten. Berlin, 2015.
- [7] Bellem, H.; Schöneberg, T.; Krems, T.; Schrauf, M.: Objective metrics of comfort: Developing a driving style for highly automated vehicles. Transportation Research Part F 41, 2016, S. 45-54.
- [8] Griesche, S.; Dotzauer, M.: Soll mein Auto so fahren wie ich? – Welchen Fahrstil präferieren Fahrer für die Auslegung automatisierter Fahrzeugfunktionen? DLR, Braunschweig 2016.
- [9] Engelbrecht, A.: Fahrkomfort und Fahrspaß bei Einsatz von Fahrerassistenzsystemen. Dissertation. Hamburg, Disserta Verlag 2013.
- [10] Albrecht, M.: Modellierung der Komfortbeurteilung aus Kundensicht am Beispiel des automatisierten Anfahrens. Dissertation. Institut für Produktentwicklung am KIT, Karlsruhe, Forschungsberichte Band 18, 2005.
- [11] Resch, S.; Mast, R.: Engineered Emotion. In: Becker, K. (Hrsg.): Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen III. Haus der Technik Fachbuch 56. Renningen: Expert Verlag 2006, S. 118-126.
- [12] Müller, T.: Ermittlung vestibulärer Wahrnehmungsschwellen zur zielgerichteten Gestaltung der Fahrzeug-Längsdynamik. Dissertation. Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, 2016.
- [13] Holzinger, J.; Schöggel, P.; Schrauf, M.; Holzinger, J.; Bogner, E.: Objektivierung der Fahrbarkeit beim automatisierten Fahren. ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift 116(12) 2014, S. 48-53.
- [14] Kunin, T.: The Construction of a New Type of Attitude Measure1. Personnel psychology 8(1), 1955, S. 65-77.
- [15] Scherer, S.; Dettmann, A.; Hartwich, F.; Pech, T.; Bullinger, A. C.; & Wanielik, G.: How the driver wants to be driven - Modelling Individual Driving Styles in Highly Automated Driving. 7. Tagung Fahrerassistenz, 25.-26-11.2015, München 2015.

Konzeptionelle virtuelle Absicherung von automatisierten Fahrfunktionen anhand eines SAE Level 3 Fahrstreifen-wechselassistenten

B. Rogic, S. Samiee, A. Eichberger,
Institut für Fahrzeugtechnik, TU Graz;
S. Bernsteiner, C. Payerl, MAGNA Steyr Engineering AG & CO KG

Kurzfassung

Die Vielzahl an möglichen Fahrsituationen stellt die Absicherung von automatisierten Fahrfunktionen in der Fahrzeugentwicklung vor eine große Herausforderung.

In dieser Arbeit wird eine Methode zur Erstellung einer strukturierten und systembezogenen Testreihe für gezielte Absicherung von automatisierten Fahrfunktionen vorgestellt. Die Testmanöver werden durch das systematische Ausführen von drei Schritten erstellt. Lediglich der Funktionszweck des zu prüfenden Systems (z.B. Abstandhalten, Spurhalten, Fahrstreifenwechseln etc.) ist notwendig um die Testreihe in einer frühen Entwicklungsphase zu definieren. Nach Bedarf können jederzeit neue Szenarien und/oder neue Variationsparameter der Szenarien hinzugefügt und die Testreihe durch wiederholtes Ausführen der Arbeitsschritte erweitert oder modifiziert werden.

Die Innovation des vorliegenden Beitrags liegt in der systematischen Generierung von systemrelevanten Absicherungsszenarien welche über den gesamten Entwicklungsprozess verwendet werden kann.

1. Einführung

Eine große Herausforderung bei der Entwicklung und Integration von automatisierten Fahrfunktionen ist die unendliche Anzahl an möglichen Verkehrssituationen, die während des Betriebs des Systems auftreten können und abgesichert werden müssten [1]. Um den Aufwand für die Funktionsentwicklung und Absicherung gering zu halten, versucht man über den gesamten Entwicklungsprozess möglichst viele Schritte durch virtuelle Methoden abzudecken. Jüngste Forschungsarbeiten versuchen durch verschiedenste Methoden diese große Anzahl der Szenarien Schritt für Schritt in die Simulation zu implementieren, z.B. [2-4]. Zusätzlich ist es notwendig, dass gerade am Anfang der Entwicklung einer automatisierten Fahrfunktion auf Gesamtfahrzeugebene, eine einfache und auf die Funktion abgestimmte virtuelle Testumgebung (Entwicklerwerkzeug) inkl. zu testender Manöver (Testreihe) zur Verfügung steht. Mit dieser wird sichergestellt, dass das System die funktionalen Anforderungen erfüllt. Die in dieser Arbeit vorgestellte Testerstellungsregeln, bilden die Methode zu ei-

ner strukturierten Erstellung von funktionsrelevanten „Use-Case“ Szenarien. Durch das Einfließen der funktionalen Anforderungen in die Erstellungsregeln soll die Relevanz der Szenarien gewährleistet werden. In der vorliegenden Arbeit wird die Methode anhand eines Fahrstreifenwechselassistenten (Lane Change Assist, LCA) demonstriert.

2. Methode

Am Anfang der Entwicklung eines automatisierten/autonomen Fahrerassistenzsystems (FAS) steht zunächst die Funktion im Mittelpunkt. Um ein funktionales Konzept auf die technischen Anforderungen auf Gesamtfahrzeugebene zu validieren, wird ein Testwerkzeug benötigt, das die Erfüllung dieser Anforderungen abprüfen kann. Diese Methode soll mithilfe klar definierter Schritte, die die funktionalen Anforderungen als Erstellungskriterien beinhalten, die Testszenarien definieren.



Bild 1: V-Modell zur Entwicklung und Integration von FAS [5]

Bild 1 zeigt ein aus der Softwareentwicklung abgeleitetes V-Modell [6], dass zur konzeptionellen Absicherung ein zweites V verwendet [5]. Dieser Entwicklungsprozess wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes erarbeitet und wird vom Industriepartner Magna Steyr Engineering eingesetzt.

Die Methode wird anhand eines innovativen Fahrstreifenwechselassistenten (Lane Change Assist, LCA), welcher in [7] und [8] beschrieben ist, validiert. Dieser LCA dient als Testobjekt zur Absicherung. Bild 2 zeigt eine schematische Darstellung dieses mehrschichtigen Fahrstreifenwechselassistenten.

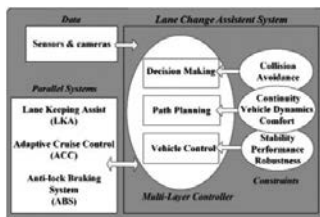


Bild 2: Schematische Darstellung des mehrschichtigen LCAs [8]

Die Fahrfunktion besteht dabei aus 3 Ebenen, in der ersten Ebene *Decision Making* wird basierend auf den Sensordaten entschieden ob ein Fahrstreifenwechsel möglich ist, in der zweiten Ebene *Path Planning* wird unter Berücksichtigung des dynamischen Verkehrs und der Fahrerpräferenzen die Trajektorie geplant und in der dritten Ebene *Vehicle Control* die Fahrzeugführung unter Ausnützung der vorhandenen Assistenzfunktionen ausgeführt.

Die hier vorgestellte Methode beinhaltet die Erstellung einer auf das System abgestimmte und automatisiert erstellte Testreihe in einer Simulationsumgebung, die dem Entwickler als Werkzeug dient. Diese steht schon in der frühen Konzeptphase zur Verfügung. Sie ermöglicht eine schnelle und übersichtliche Bewertung des untersuchten FAS und kann Fehlauselegungen im funktionalen Konzept rechtzeitig aufzeigen.

Die Erstellung der Testreihe erfolgt in den folgenden drei Schritten:

- 1) Definition der Grundszenarien
- 2) Identifikation der relevanten Parameter
- 3) Definition der Variationsbereiche der Parameter

In den nächsten Kapiteln werden die einzelnen Schritte im Detail beschrieben.

1) *Definition der Szenarien.* Der betrachtete LCA wurde für den Einsatz auf Autobahnen für das Linksüberholen entwickelt. Aus der Funktionsdefinition (LCA) und den definierten Randbedingungen (gerade Autobahn und Fahrstreifenwechsel nach links) wurden „Grundszenarien“ identifiziert. Im Bild 3 sind diese für das untersuchte LCA System mit einem (Bild 3a), zwei (Bild 3b und Bild 3c) und drei (Bild 3d) Targetfahrzeugen dargestellt.

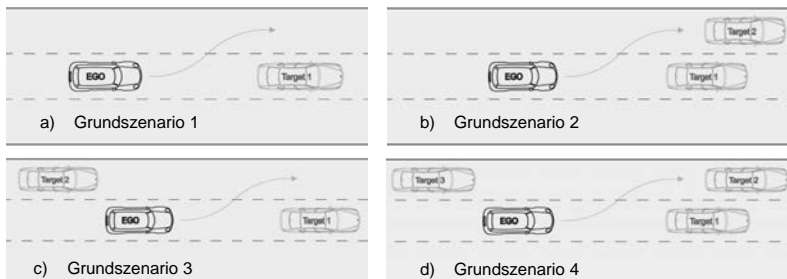


Bild 3: LCA Grundszenarien

2) *Identifikation der relevanten Parameter.* Die Grundszenarien nach Bild 3 enthalten keinerlei Informationen über die Dynamik des Verkehrs und ob ein sicherer Fahrstreifenwechsel möglich ist. Aus dem funktionalen Konzept werden nun die Parameter abgeleitet, die die dynamischen Zusammenhänge zwischen den Targetfahrzeugen bestimmen und dadurch direkt die Funktionsweise des LCA Systems beeinflussen. Die Zustandsgrößen der Targetfahrzeuge T_i sind die Geschwindigkeit v_{T_i} und Position x_{T_i} und die Steuergröße ist die Be-

schleunigung a_{T_i} , diese stellen die relevanten Parameter für die Erstellung der Testreihe dar, wobei der Index i die Nummer des Targetfahrzeugs beschreibt. Die Kombination dieser drei Größen definiert das Testmanöver, in der der LCA Algorithmus entscheidet, ob ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt wird und wie die Solltrajektorie hierfür aussehen soll mit dem dann das Fahrzeug geführt wird.

3) *Definition der Variationsbereiche der Parameter.* Schon bei der Variation von diesen drei Parametern wird die Anzahl der möglichen Manövriervariationen sehr hoch. Um eine effiziente Durchführung der virtuellen Versuche zu gewährleisten, werden Regeln für die Bestimmung von sinnvollen Variationsbereichen der Anfangszustände eingeführt. Beim gegenständlich untersuchten LCA System ist die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs konstant. Obwohl dies keine Voraussetzung für die Funktion des Systems ist, ist diese Einschränkung durch die häufige Kombination mit einem Abstandsregeltempomaten und dessen geringer Dynamik akzeptabel. Somit wird als erste Testszenario-Annahme die konstante Ego-Fahrzeug Geschwindigkeit mit $v_{ego} = 130 \text{ km/h}$ definiert. Aus den funktionalen Anforderungen, die im Lastenheft des Systems beschrieben sind, wird festgelegt, dass die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Ego-Fahrzeug und den umgebenden Targetfahrzeugen maximal 50 km/h betragen dürfen. Damit ergibt sich ein Variationsbereich für die Geschwindigkeiten der Targetfahrzeuge zwischen $80 \text{ und } 180 \text{ km/h}$. Dieser Variationsbereich umfasst weitgehend die auf deutschen Autobahnen zu erwartenden Geschwindigkeitsbereiche im fließenden Verkehr.

In der Simulation ist das Egofahrzeug mit virtuellen Sensoren ausgestattet. Diese stellen die für das LCA notwendigen Eingangsgrößen der anderen Verkehrsteilnehmer zur Verfügung. Für die Definition der Variationsbereiche ist der Fernbereichsradar nach vorne bzw. der rückwärtsgerichtete Heckradarsensor relevant, siehe Bild 4.

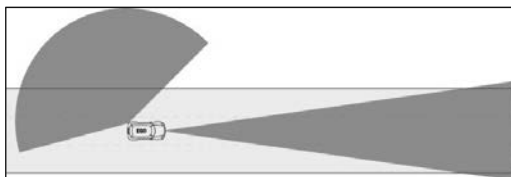


Bild 4: Relevante Sensoren für die Definition der Variationsbereiche

Die Definition der Sensorparameter (Positionierung, Öffnungswinkel, Reichweiten etc.) wird aus den Systemanforderungen abgeleitet und decken sich mit den Parametern von am Markt verfügbaren LCA Systemen, wie z.B. in [9] beschrieben. Für den Frontbereich wird ein

Fernbereichsradar mit 250 m Reichweite und einem Öffnungswinkel von $\pm 10^\circ$ und für den hinteren Bereich ein Mittelbereichsradar mit 80 m Reichweite und einem Öffnungswinkel von $\pm 15^\circ$ eingesetzt. Die Anfangsposition der Targetfahrzeuge wird relativ zum Egofahrzeug auf die Sensorreichweiten der Sensoren beschränkt. Im Lastenheft des untersuchten LCA Systems wurde die maximale Relativbeschleunigung in Bezug auf das Ego Fahrzeug mit 2 m/s^2 begrenzt. Zusammenfassend ergeben sich aus obigen Überlegungen die Variationsbereiche der Testparameter, Tabelle 1:

Tabelle 1: Variationsbereiche der Testparameter

Geschwindigkeit v_{T_1}	Position x_{T_1}	Beschleunigung a_{T_1}
80 bis 180 km/h	0 bis 80 m (Target 2, Bild 3d) 0 bis 250 m (Target 1 und 2 in Bild 3d)	-2 bis 2 m/s^2

Die Variationsbereiche stellen allgemeine Beschränkungen für die Parametervariation dar, durch schrittweise Änderungen dieser Parameter wird die Anzahl der Szenarien definiert, wobei bei entsprechender Wahl der Schrittweite diese noch immer sehr hoch sein können. Um die Kombinationsanzahl weiter zu reduzieren werden weitere funktions- und szenariobezogene Überlegungen herangezogen.

Im Lastenheft des LCAs wurde definiert, dass bei einer vorhergesagten Kollision mit dem langsamer fahrenden Target 1, $TTC_{T_1} = 6 \text{ s}$ (Time to Collision, TTC), der Fahrstreifenwechsel ausgelöst wird. Abstände zwischen Egofahrzeug und Target 1, die höheren TTC_{T_1} ergeben, können somit vernachlässigt werden. Um die Zeit zu berücksichtigen die der LCA für die Entscheidung und Trajektorienplanung benötigt, wurde eine zusätzliche Sekunde beispielhaft addiert. Die Anfangsabstände für das erste Grundszenario (Bild 3a) werden mit

$$s_{\text{rel}} = v_{\text{rel}} * TTC + \frac{a_{\text{rel}}}{2} * TTC^2 \quad (1)$$

ermittelt, wobei s_{rel} , v_{rel} und a_{rel} den Relativabstand, die -geschwindigkeit und die -beschleunigung, kennzeichnen. Für die Parameter $TTC_{T_1} = 7 \text{ s}$ und $v_{T_1} = 120 \text{ km/h}$ setzt sich die Testreihe für das erste Grundszenario wie in der Tabelle 2 zusammen.

Tabelle 2: Szenarioparameter für $v_{T_1} = 120 \text{ km/h}$

s_{ego} [m]	v_{ego} $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	s_{T_1} [m]	v_{T_1} $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	a_{T_1} $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$
100	130	119,5	120	0
		144		-1
		156,5		-1,5
		168,5		-2

Tabelle 2 zeigt die verwendeten Schritte für die Variation der Beschleunigung. Gleiches Beschleunigungsvariationsschema wird für alle Geschwindigkeiten von Target 1 verwendet. Um die Zahl der Variationen zu begrenzen wird diese Geschwindigkeit von 130 bis 80 km/h in Zehnerschritten variiert. Somit ergeben sich für die 6 Geschwindigkeitsgruppen mit jeweils vier Beschleunigungsvariationen insgesamt 24 Testvariationen des Szenarios in Bild 3a.

Um die Anzahl der Variationen für das zweite Grundszenario aus Bild 3b zu reduzieren, müssen weitere Annahmen getroffen werden. Es werden zunächst die Geschwindigkeit und die Beschleunigung von Target 1 konstant mit 100 km/h bzw. 0 m/s^2 gehalten. Aus demselben Grund wie beim ersten Grundszenario wird $TTCT_1 = 7 \text{ s}$ gesetzt, weshalb die Parameter für Target 1 nicht variiert werden. Sollte es Unterschiede in der Funktionsweise bezüglich Geschwindigkeit und Beschleunigung von Target 1 geben, werden diese mit der ersten Testreihe detektiert.

Weiter wird angenommen, dass kein Rechtsüberholen zulässig ist und dass die Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen stets schneller als das Egofahrzeug sind. Die Geschwindigkeitsvariation von Target 2 erfolgt in Zehnerschritten zwischen 130 und 180 km/h. Das Target 2 startet auch immer mit dem Abstand von 0 m relativ zum Egofahrzeug (vordere Ego-Stoßstange zur hinteren Stoßstange von Target 2). Diese Startposition stellt den „schwierigsten“ Fall dar, da jeder größere Abstand zu Target 2 nach vorne, unter gleiche Variation der Bewegungsparameter, zusätzliche Zeit für ein Fahrstreifenwechsel bedeuten würde und somit für die LCA Funktion „leichter“ zu meistern wäre. In Tabelle 3 wird die Testreihe für das zweite Grundszenario beispielhaft für $v_{T_2} = 160 \text{ km/h}$ aufgelistet.

Tabelle 3: Szenarioparameter für $v_{T_2} = 160 \text{ km/h}$

s_{ego} [m]	v_{ego} $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	s_{T_1} [m]	v_{T_1} $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	s_{T_2} [m]	v_{T_2} $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	a_{T_2} $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$
100	130	158.5	100	104	160	0
						1
						1.5
						2

Für das zweite Grundszenario ergeben sich damit insgesamt auch 24 Testvariationen.

Beim dritten Grundszenario aus Bild 3c ist die Anfangsposition von Target 2 stets 80 m hinter dem Egofahrzeug und entspricht somit der Reichweite des Heckradarsensors. Die Testvariation mit der „schwierigsten“ Parameterkombination, $v_{T_2} = 180 \text{ km/h}$ und $a_{T_2} = 2 \text{ m/s}^2$, verkürzt nach (1) die mögliche Dauer des Fahrstreifenwechsels auf 3,4 s. Durch die Verschiebung der Startposition von Target 2 lassen sich die Variationen für die getestete Funktion

weiter reduzieren. Da es sich hier um ein komfortbezogenes System handelt, wird der Anfangsabstand mit 80 m begrenzt. Für das dritte Grundszenario ergeben sich 24 Testvariationen. In der Tabelle 4 wird die Testreihe für das dritte Grundszenario beispielhaft für $v_{T_2} = 160 \text{ km/h}$ dargestellt.

Tabelle 4: Szenarioparameter für $v_{T_2} = 160 \text{ km/h}$

$s_{\text{ego}} [\text{m}]$	$v_{\text{ego}} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	$s_{T_1} [\text{m}]$	$v_{T_1} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	$s_{T_2} [\text{m}]$	$v_{T_2} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	$a_{T_2} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$
100	130	158.5	100	20	160	0
						1
						1.5
						2

Das vierte Grundszenario aus Bild 3d zeigt die höchste Anzahl an Targetfahrzeugen und damit auch die meisten Parametervariationen. Zunächst werden alle bisherigen Annahmen aus den vorherigen drei Grundszenarien übernommen. Um die Anzahl der Testvariationen überschaubar zu halten, wird hier der Begriff der *Lücke* eingeführt. Statt die Szenarien aus Kombinationen aller vorkommenden Fälle der letzten zwei Grundszenarien zu wiederholen, wird das Verhalten des LCA Systems hinsichtlich der Lücke zwischen Target 2 und 3 untersucht. Die Absolutgeschwindigkeiten, das Vorzeichen der Relativgeschwindigkeiten und Relativbeschleunigungen der Fahrzeuge definiert die Lücke. Aufgrund der Annahme, dass sich die Fahrzeuge im linken Fahrstreifen stets schneller als das Egofahrzeug bewegen, werden die Szenarien für die Geschwindigkeiten zwischen 130 (mit positiver Beschleunigung) und 180 km/h generiert. Tabelle 5 listet die Testreihe für das vierte Grundszenario beispielhaft für $v_{T_{2,3}} = 160 \text{ km/h}$.

Tabelle 5: Szenarioparameter für $v_{T_{2,3}} = 160 \text{ km/h}$

$s_{\text{ego}} [\text{m}]$	$v_{\text{ego}} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	$s_{T_1} [\text{m}]$	$v_{T_1} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	$s_{T_3} [\text{m}]$	$v_{T_2} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	$a_{T_2} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	$s_{T_3} [\text{m}]$	$v_{T_3} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	$a_{T_2} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$
100	130	158.5	100	104	160	0	20	160	0
						1			0
						1.5			0
						2			0
						0			1
						0			1.5
						0			2

Das vierte Grundszenario setzt sich aus 38 Testszenarien zusammen (bei $v_{\text{ego}} = 130 \text{ km/h}$ nur drei Szenarien mit beschleunigter Bewegung von Target 2).

Die Annahme einer Lücke reduziert einerseits stark die Anzahl möglicher Szenarien, andererseits wird durch den klar definierten Zusammenhang der beiden Targetfahrzeuge ein überschaubares und leicht vergleichbares Testwerkzeug geschaffen. Durch Verwendung

dieses Werkzeugs sollen neben einem Überblick über das Systemverhalten, auch mögliche Fehler, Schwachstellen oder kritische Manöver für die Funktion identifiziert werden. Weitere Entwicklungsschritte können sich dann auf diese Fehler konzentrieren.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Die Zielsetzung der vorgestellten Methodik liegt in einer systematischen, für die jeweilige Fahrfunktion abgestimmte Erstellung einer Testreihe, die schon in der frühen Phase aber auch während des gesamten Entwicklungsprozesses einer automatisierten Fahrfunktion zur Verfügung steht.

Sie besteht aus drei nach einander folgenden Erstellungsschritten. Innerhalb jedes Schritts werden systemspezifische Überlegungen durchgeführt, die die große Anzahl der möglichen Szenarien reduzieren, gleichzeitig aber die Relevanz der Testreihe für die betrachtete automatisierte Fahrfunktion sicherstellen. Das Ergebnis der drei Erstellungsschritte sind relevante Fahrmanöver und die Variationsbereiche ihrer Testparameter für die Konzeptphase. Für die Verwendung der Simulationsumgebung in weiteren Entwicklungsschritten nach der Konzeptphase müssen die Modellierungstiefe des Ego-Fahrzeugs, dessen Komponenten, andere Verkehrsteilnehmer und die Umwelt den Anforderungen angepasst werden.

Ausblickend soll in weiteren Forschungsarbeiten die für die virtuelle Absicherung notwendige Bewertungsmetrik erarbeitet werden. Dabei sollten vor allem sicherheits- und komfortrelevante Aspekte wie z.B. Abstände zur Targetfahrzeuge, Stabilität, Querschleunigung aber auch regelungstechnische Aspekte wie z.B. Folgegüte des Reglers, im Vordergrund stehen. Für die Berücksichtigung der subjektiven Bewertung durch menschliche Fahrer sollen Probandenversuche auf der öffentlichen Straße und im Fahrsimulator durchgeführt werden, mit denen qualitative Bewertungskriterien abgeleitet werden sollen.

Die Bewertungsmetrik könnte somit über den gesamten Entwicklungsprozess von den ersten Konzeptsimulationen bis zur Gesamtfahrzeugvalidierung im Realversuch zur Anwendung kommen.

- [1] H. Winner, "Absicherung automatischen Fahrens", 6. *FAS-Tagung München*, 2013.
- [2] S. Prialé Olivares, N. Rebernik, A. Eichberger and E. Stadlober, "Virtual Stochastic Testing of Advanced Driver Assistance", *Lecture Notes in Mobility*, Heidelberg, 2015.
- [3] J. Bach, K. Bauery, M. Holzäpfely, M. Hillenbrand and E. Sax, "Control based driving assistant functions' test using recorded in field data", 7. *Tagung Fahrerassistenzsysteme*, München, November 2015.
- [4] M. R. Zofka, R. Kohlhaas, T. Schamm and J. M. Zöllner, "Semivirtual simulations for the evaluation of vision-based ADAS", *Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, IEEE 2014., DOI: 10.1109/IVS.2014.6856593.
- [5] S. Bernsteiner, Z. Magosi, D. Lindvai-Soos and A. Eichberger, "Radarsensormodell für den virtuellen Entwicklungsprozess", *ATZ Elektronik 02*, S. 73., 2015.
- [6] *V-Modell XT*. Verfügbar unter: http://www.cio.bund.de/DE/Architekturen-und-Standards/V-Modell-XT/vmodell_xt_node.html; Zugriff am 11.09.2016
- [7] S. Samiee, A. Shahram, K. Reza and A. Eichberger, "Towards a Decision Making Algorithm for Automatic Lane Change Maneuver Considering Traffic Dynamics", *Promet - Traffic and Transportation*, vol. 28, 2016.
- [8] S. Samiee, A. Eichberger, S. Azadi and R. Kazemi, "A novel approach for a collision avoiding lane change system in a dynamic traffic environment", *IAVSD Conference*, Graz, Austria, August 2015.
- [9] T. Binder, A. Wedel, M. Bühren and C. Herget, "Die neue E-Klasse von Mercedes-Benz, Assistenzsysteme in neuer Dimension", *ATZ Extra*, Mai 2016.

Ein neuartiger Systemansatz zum Schutz von schwächeren Verkehrsteilnehmern

Technologie und Konzeptansatz

Michael Schulmeister, Klaus Rink, Jonas Herzfeld,
Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt am Main;
Dr. Stephan Zecha, Daniel Westhofen, Olga Tessier,
Continental Safety Engineering International GmbH, Alzenau

Kurzfassung

Die umfangreichen Maßnahmen der passiven Sicherheit und die Schutzsysteme der aktiven Sicherheit haben zu einer wesentlichen Verbesserung des Insassenschutzes geführt. Derartige Maßnahmen bringen für den Schutz der schwächeren Verkehrsteilnehmer (Vulnerable Road Users = VRUs) jedoch keinen vergleichbaren Mehrwert. Entsprechend konnte die Zahl der getöteten schwächeren Verkehrsteilnehmer nur mäßig reduziert werden, die deshalb verstärkt in den Fokus der Fahrzeugsicherheitsentwicklung rücken.

Ein weiterer Einflussfaktor ist der demografische Wandel, bei dem sich zeigt, dass es vermehrt zu Unfällen mit z.B. älteren Fahrradfahrern kommt. VRUs sind Teil des Verkehrs und obwohl zumindest Fahrradfahrer immer öfter einen Schutzhelm tragen, haben sie keine "Crash Zone".

Aktive Fußgängerschutzsysteme, basierend auf Radar-, Kamera- und Anprallerfassung, helfen die Verkehrsunfälle mit VRUs zu reduzieren und Unfallfolgen zu mildern; sie können aber nicht alle VRU-Standardsituationen in der Innenstadt lösen: Fußgänger bewegen sich, im Vergleich zu Fahrzeugen, normalerweise nicht auf der Straße und können unvermittelt auf der Fahrbahn auftauchen. Fahrradfahrer bewegen sich anders als PKWs oder LKWs - sie fahren zwischen Autos, überholen von rechts oder befahren Einbahnstraßen. Bei Geschwindigkeiten über 30 km/h können kritische Fahrsituationen mit VRUs (auch Gruppierungen), welche bei nicht optimalen Sichtverhältnissen (z. B. in der Nacht, bei Regen oder Verdckungen etc.) zu spät oder gar nicht erkannt werden, mit der derzeitigen Technologie nicht sicher verhindert werden.

Für das Automatisierte Fahren in höheren Automatisierungsgraden (z. B. Stadtfahrt) wird eine Einbindung der sich in relevanter Reichweite befindlichen VRUs in die Fahrstrategie und in Sicherheitssysteme ein essentieller Bestandteil.

Die heutigen Assistenzsysteme sind auf Sichtverbindung zum VRU und ausreichende Sichtverhältnisse angewiesen. Kooperative Sensortechnologien, wie z.B. die Vehicle-to-X (V2X) Technologie, bieten die Möglichkeit, diese Einschränkungen zu überwinden.

Integriert in das neue kooperative Sicherheitsnetzwerk könnten die VRUs erkannt werden, obwohl sie noch nicht im Sichtbereich des Fahrers befinden. Speziell bei Geschwindigkeiten über 30 km/h und schlechten Sichtverhältnissen könnte der Fahrer früher gewarnt und autonome Fahreingriffe rechtzeitig ausgelöst werden, um eine drohende Kollision zu vermeiden. Dabei können die kooperativen Sensoren im nahtlosen Übergang zu den vorhandenen Umfeldsensor-basierten Systemen eingesetzt werden und zur Verbesserung der Objekterkennungs-Zuverlässigkeit und Robustheit beitragen.

Forschungsprojekte wie Ko-FAS, simTD und AMULETT haben bereits den positiven Nutzen einer kooperativen Einbindung in das Netzwerk aller Verkehrsteilnehmer klar gezeigt. Dabei kann der Bewegungspfad des VRUs erkannt werden und aus dem Weg und der Bewegungsrichtung können maßgeschneiderte Handlungskonzepte für das ankommende Fahrzeug, aber auch für den VRU, umgesetzt werden. Dies setzt jedoch eine genaue und robuste Lokalisierung von VRUs und die Kommunikation zum Fahrzeug, welches die Schutzhandlung ausführt, voraus.

Für Fahrzeuge gibt es leistungsfähige Eigenlokalisierungslösungen, wie zum Beispiel den Motion Information to X Provider (M2XPro), welche die Absolutposition und weitere Bewegungsgrößen verschiedenen Systemen, wie z.B. Vehicle-to-X (V2X) zu Verfügung stellt – Fußgänger und Radfahrer weisen aber komplett andere Rahmenbedingungen auf, welche eine Übertragbarkeit solcher Ansätze verhindern. Auch sind Eigenlokalisierungslösungen z. B. selbst durch die aktuell leistungsfähigsten Smartphones ungeeignet, weil sie zu ungenaue, zu unsichere und unzuverlässige Positionsinformationen für diesen Anwendungsfall liefern.

Einen zielführenden und für eine wirksame Schutzfunktion geeigneten Systemansatz gab es bislang noch nicht.

1. Unfallzahlen im Überblick

Aus dem globalen Statusbericht über Verkehrssicherheit der Weltgesundheitsorganisation (WHO) aus dem Jahr 2015 geht hervor, dass die Anzahl an Verkehrstoten im Bereich schwächerer Verkehrsteilnehmer wie zum Beispiel Fußgänger, Fahrradfahrer und Motorradfahrer intolerabel hoch ist und fast die Hälfte aller Verkehrsopfer ausmacht [1]. In Bild 1 ist dieser Zusammenhang ersichtlich.

Auch die Europäische Union (EU) befasst sich mit dieser Situation und hat sich als Ziel „Null Verkehrstote – Vision Zero“ bis 2050 gesetzt. Hierfür gibt es Etappenziele, die z. B. für den Zeitraum 2011 bis 2020 eine Halbierung der Zahlen vorgeben – der Rückgang an Verkehrstoten stagniert aber und zeigte zum Teil auch wieder eine ansteigende Tendenz.

Das Bild 2 zeigt den Verlauf der Jahre 2000 bis 2014 der im Straßenverkehr Verunglückten nach Art der Verkehrsbeteiligung in Deutschland.

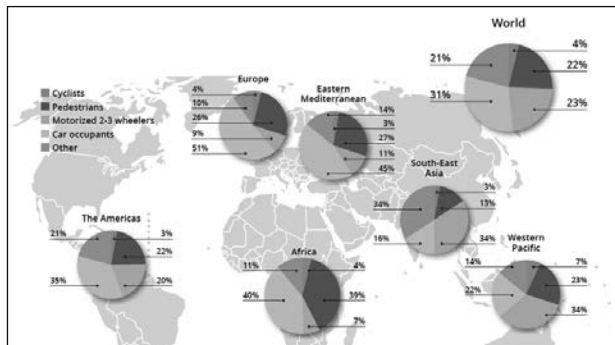


Bild 1: Verkehrstote nach Verkehrsteilnehmer, aufgeteilt in WHO Regionen [1]

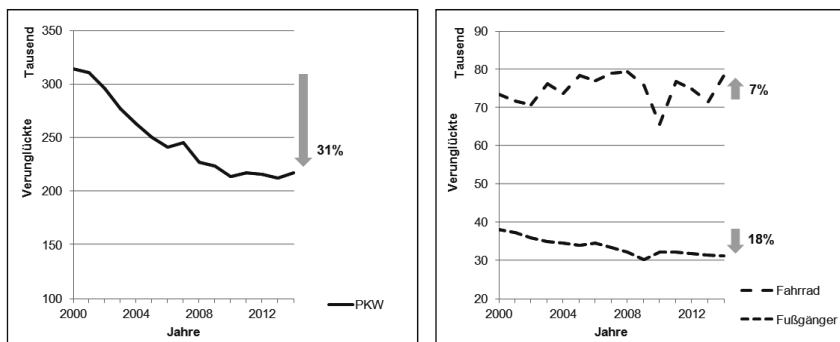


Bild 2: Verunglückte nach Art der Verkehrsbeteiligung in Deutschland: PKW (links), Fahrrad und Fußgänger (rechts) [2]

Daraus ergibt sich im Vergleich zum Jahr 2000 ein Rückgang der Verunglückten bei PKW's um 31 Prozent, bei Fußgängern um 18 Prozent und bei Fahrradfahrern ein Anstieg um sieben Prozent. Dieser Trend zeigt, dass die bisherigen Maßnahmen der passiven Sicherheit

und die ersten Schutzsysteme der aktiven Sicherheit im Bereich Fahrzeuginsassen zwar Wirksamkeit zeigen, aber vor allem die Zahl verunglückter, schwächerer Verkehrsteilnehmer konnte in der Vergangenheit nur unzureichend reduziert werden und rückt damit mehr und mehr in den Fokus.

Ein weiterer Einflussfaktor ist der demografische Wandel und die zunehmende Verbreitung von Pedelecs, bei dem sich zeigt, dass es vermehrt zu Unfällen mit älteren Fahrradfahrern kommt, die trotz Schutzhelm keine "Crash Zone" haben.

2. Stärken und Schwächen heutiger Systemlösungen

In den vergangenen 15 Jahren wurden wertvolle Schutzmaßnahmen an den Fahrzeugen zur Verbesserung der Sicherheit schwächerer Verkehrsteilnehmer mit besonderem Schwerpunkt auf dem Fußgängerschutz eingeführt.

Ein Teil der Maßnahmen bestand in der besseren konstruktiven Gestaltung der Aufprallzonen und dem Einbau von Dämpfungselementen bis hin zum Einbau von aufstellbaren Motorhauben. Diese sogenannten passiven Sicherheitsmaßnahmen verbessern die Verletzungssituation in bestimmten Aufprallsituationen im Fahrzeugfrontbereich. Das adressiert ungefähr 30 bis 40 Prozent der schweren Fußgängerunfälle. Für den Sekundäraufprall des schwächeren Verkehrsteilnehmers auf dem Straßenbelag, der ca. 30 Prozent der Unfälle mit schweren Verletzungsfolgen umfasst, bieten passive Sicherheitssysteme aber keine wirksame Abhilfe.

Über präventiv eingreifende (aktive) Schutzsysteme können schwächere Verkehrsteilnehmer umfassender geschützt werden. Mittels Umfeldsensoren im Fahrzeug können Fußgänger oder Radfahrer vor einer drohenden Kollision erkannt werden. Durch einen autonomen Bremsingriff als präventive Schutzmaßnahme, kann der Unfall vermieden oder zumindest die Aufprallgeschwindigkeit wesentlich reduziert werden.

Bordgebundene Sensorsysteme können damit die Kollisionsenergie reduzieren und ein wesentlich breiteres Spektrum an Unfallszenarien adressieren als die passiven Schutzmaßnahmen.

Voraussetzung für die Erkennung der schwächeren Verkehrsteilnehmer durch die Umfeldsensoren ist aber eine ausreichende Sichtverbindung zu dem anderen Verkehrsteilnehmer. Eine optimal abgestimmte Wirkkette von der physikalischen Abbildung der Situation bis hin zur wirkungsvollen Bremsung setzt die Möglichkeiten bestmöglich um; ist die Sichtverbindung nicht gewährleistet, dann kann das Schutzsystem nicht rechtzeitig aktiviert werden. Mangelhafte Sichtverbindung wird hervorgerufen durch „klassische“ Verdeckungen (siehe Bild 3), sowie ungünstige Witterungsbedingungen. In ungefähr 30 Prozent aller Fuß-

gängerunfälle liegt nach aktuellen Unfallstatistiken eine derartige Sichtbehinderung vor. Ein Lösungsansatz zur Erkennung der schwächeren Verkehrsteilnehmer vom Fahrzeug aus sind



kooperative Sensortechnologien, welche nicht auf eine direkte Sichtverbindung angewiesen sind. Diese und weitere mögliche Ansätze für ein kooperatives Lokalisierungssystem werden nachfolgend diskutiert.

Bild 3: Unfallsituation mit Sichtverdeckung [4]

3. Kooperative Sensorsystemlösungen

Bei der Frage nach möglichen Systemansätzen zur Lokalisierung von schwächeren Verkehrsteilnehmern und folglich zur Erweiterung der Schutzmaßnahmen dieser Gruppierung, ergeben sich die in Bild 4 dargestellten grundsätzlichen Szenarien.

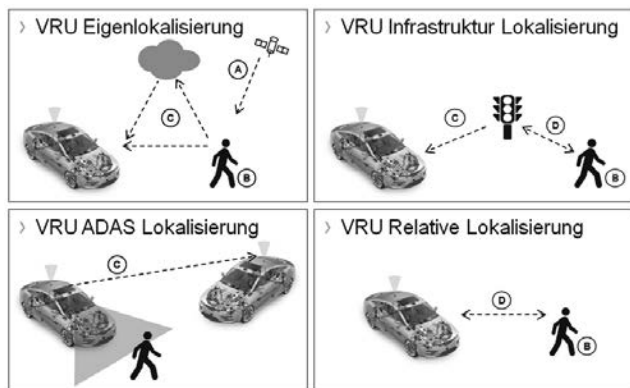


Bild 4: Lokalisierungsansätze; A: Eigenlokalisierung; B: Kontext-Informationen;
C: Positionsübermittlung; D: relative Lokalisierung

Der bekannte Ansatz der Eigenlokalisierung basiert auf der Ortung mittels GNSS-Daten. Diese absolute Position kann dann entweder direkt per Ad-hoc Kommunikation an das Fahrzeug übermittelt werden oder die Positionsdaten werden in ein Backend-System in eine entsprechende Cloud geladen und von dort dem Fahrzeug zur Verfügung gestellt. Problematisch bei der Positionsbestimmung über GNSS-Daten ist die Ungenauigkeit von bis zu

20 Metern insbesondere in Stadtszenarien, die für die Anwendung zum Schutz von schwächeren Verkehrsteilnehmern nicht ausreichend ist. Die Anforderungen liegen hier im Submeterbereich. Hinzu kommen noch höhere Latenzzeiten bei der Aktualisierung der Positionsdaten und bei der Übermittlung der Positionsdaten an das Fahrzeug.

Die Lokalisierung über die Infrastruktur im urbanen Stadtgebiet stellt eine weitere Möglichkeit dar. Verkehrsanlagen im Bereich von Straßenüberquerungen sind zum Beispiel mit Kameratechnik ausgestattet und können somit andere Verkehrsteilnehmer lokalisieren und diese Information über ein Ad-hoc Netzwerk mit relevanten Fahrzeugen teilen. Für dieses Szenario ist eine großflächige Ausstattung der Infrastruktur (Verkehrsanlagen) notwendig. In absehbarer Zeit ist mit einer flächendeckenden Umrüstung der Verkehrsanlagen jedoch nicht zu rechnen, weshalb diese Variante ihre Wirksamkeit nicht ausreichend schnell entfalten wird. Statt über die Infrastruktur kann das Verkehrsgeschehen direkt mit Fahrzeugen und deren ADAS Sensoren aufgenommen werden. Sicherheitskritische Informationen, solange sie im Sichtbereich der ADAS Sensoren sind, könnten so zum Beispiel an andere Fahrzeuge im V2X-Kontext übermittelt werden. Nachteilig an diesem Szenario ist, dass wieder nur Informationen über sichtbare Verkehrsteilnehmer – aber zumindest aus anderen „Blickwinkeln“ – mit anderen Fahrzeugen geteilt werden können.

Die relative Lokalisierung von schwächeren Verkehrsteilnehmern setzt sich nun aus folgenden wesentlichen Komponenten zusammen: Die zu schützenden Verkehrsteilnehmer besitzen einen Transponder, auch aktiver TAG genannt. Im einfachsten Fall ist ein weiterer Transponder in jedem Fahrzeug verbaut. Durch Ausnutzen einer geeigneten Funktechnologie kann dann über ein entsprechendes Lokalisierungsverfahren der schwächere Verkehrsteilnehmer ausreichend präzise detektiert werden. Über die gleiche Funktechnologie oder ein weiteres Ad-hoc Netzwerk können weitere Informationen zum Verkehrsteilnehmer wie Klassifikation, Bewegungsintension, Geschwindigkeit u.v.m. anonym übertragen werden. Anhand dieser Informationen können dann intelligente Fahrerassistenzfunktionen mit möglichen Warnkaskaden entwickelt werden. Ein solches System wird auch kooperatives VRU Schutzsystem genannt.

Continental hat sich im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben mit der Entwicklung kooperativer Schutzsysteme für den präventiven Schutz schwächerer Verkehrsteilnehmer beschäftigt.

Im Rahmen des bayerischen Forschungsprojektes AMULETT wurde in Zusammenarbeit mit den Partnerfirmen ein erstes Fußgängerschutzsystem auf Transponderbasis entwickelt. Dieses Transpondersystem war in der Lage Fußgänger auch in Teilverdeckungen zu orten und

mit geeigneten Schutzmaßnahmen auf einen, aus der Verdeckung hervorkommenden Passanten zu reagieren. Mit diesem System konnten zeitgleich 25 Verkehrsteilnehmer geortet werden.

Im Rahmen der Forschungsinitiative Ko-FAS erfolgte eine komplette Neuentwicklung des Transpondersystems. Das System wurde kompatibel zu dem vorliegenden WLAN 802.11p Protokoll für V2X Systeme entwickelt. Ein proprietäres Protokoll ermöglichte es, mehrere Hundert Verkehrsteilnehmer gleichzeitig zu orten und zu verfolgen, um auch komplexe Verkehrssituationen im Innenstadtbereich bearbeiten zu können.

Auf Basis dieser Vorarbeiten wurden von Continental verschiedene Anforderungen als zwingend notwendig für die Umsetzung eines relativ lokalisierenden Sicherheitssystems festgelegt. Für die Übertragung von Positions- und Kontextinformationen vom VRU zum Fahrzeug wird ein hohes Maß an **Datensicherheit** benötigt. Es muss sichergestellt werden, dass keine fehlerhaften Daten in das System eingespeist werden, aber auch, dass Daten nicht von Dritten abgegriffen werden können. Dies ist auch wichtig in Hinblick auf die **Privatsphäre** des VRUs, der nur so viel von sich preisgeben soll, wie es für die Lokalisierung nötig ist. Anforderungen an die Lokalisierung sind auch die **Verlässlichkeit** und die **Genauigkeit** im Submeterbereich, mit denen die Position ermittelt wird, sowie die **Verfügbarkeit** einer Positionsinformation, welche sich unter anderem aus **Reichweite** und **Timing** zusammensetzt. So geht aus Forschungsergebnissen eine angestrebte Reichweite von maximal 100 m hervor, um sowohl Fußgänger als auch Fahrradfahrer ausreichend zu schützen, während die Latenzzeit in zeitkritischen Situationen unter 100 ms liegen sollte. [5]

Um die Verlässlichkeit zusätzlich zu stützen, sollte auf Fahrzeug- wie auch auf VRU-Seite ein **Failsafe**-Mechanismus implementiert werden, welcher Ausfälle und Fehlinformationen des Systems erkennt und diese an den jeweiligen Nutzer kommuniziert. Weiterhin sollte die Kommunikation nicht auf einen VRU beschränkt, sondern **Multi-User** tauglich sein. Das heißt das System soll mit einer Gruppe von VRUs kommunizieren können und aus dieser Gruppe diejenigen erkennen, für den eine Warnung im Fahrzeug (oder ggf. auf VRU-Seite) notwendig ist.

Um die Interoperabilität und Verbreitung eines solchen Systems zu erzielen, ist es zwingend notwendig, eine **Standardisierung** dieser Schnittstelle zu ermöglichen.

4. Simulation relevanter Unfallszenarien

Bei Continental wurde ein Simulationstool entwickelt, um einen direkten Vergleich zwischen Umfeldsensoren, die auf eine Sichtverbindung angewiesen sind und zukünftig möglichen kooperativen Sensoren für den aktiven Fußgängerschutz anzustellen.

Es lassen sich beliebige Verkehrssituationen modellieren und beliebig häufig simulieren. Am Anfang steht die Trajektorienplanung, bei der beliebig viele Objekte mit konfigurierbaren Abmaßen und individuellen Trajektorien geplant werden können. Um statistisch belastbare Ergebnisse erzielen zu können, werden diese dann in der tatsächlichen Simulation der Verkehrssituationen stochastisch variiert. Für jede Variation erfolgt zunächst ein sogenannter Referenzdurchlauf ohne Systemreaktion. Danach wird die Situation unter Berücksichtigung der Sensormodelle mit deren jeweiliger Systemreaktion durchlaufen.




Dazu wurden drei verschiedene Sensormodelle verwendet:

- Idealer Sensor: Minimale Latenzzeiten, andere Verkehrspartner werden zuverlässig hinter Verdeckungen geortet
- Kooperativer Sensor: Verkehrspartner werden hinter Teilverdeckungen mit einer eingeschränkten Zuverlässigkeit geortet. Das Sensormodell wurde auf Basis der Ortungsqualität des Ko-TAG Systems aus der Forschungsinitiative Ko-FAS modelliert.
- Kamera Sensor: Modellierung entsprechend dem Stand der Technik von objekterkennenden Kamerasystemen

Die berechneten Simulationsdaten werden gespeichert und anschließend ausgewertet. Für eine ausführliche Beschreibung des Simulationstools und der Annahmen bei den Sensormodellen und den jeweiligen Systemreaktionen wird auf die Veröffentlichung [6] verwiesen.

Im Folgenden wird ein beispielhaftes Szenario und dessen Ergebnisse vorgestellt.

Tabelle 2: Abbiegeszenario

	Sensormodelle	Ideal	CoopVRU	Camera
	 Durchschnittlicher Geschwindigkeitsabbau / km/h Abbiegen links mit 20 km/h	-20	-20	-0,1
	 Durchschnittlicher Geschwindigkeitsabbau / km/h Abbiegen rechts mit 15 km/h	-15	-13,5	0

Ein großer Vorteil eines kooperativen Systems ist der größere Öffnungswinkel des Sensors und die Möglichkeit der Kommunikation - sprich Vergrößerung des Field of Views (FoVs) durch ergänzende Sensordatenfusion, z. B. gestützt durch infrastrukturgebundene Sensorik. Dies wird beispielsweise in Abbiegeszenarien (siehe Tabelle 2) deutlich.

Das Egofahrzeug biegt mit 15 oder 20 km/h in eine Seitenstraße ein, welche von einem Fußgänger überquert wird. Wegen der Orientierungsänderung des Eigenfahrzeugs kommt der Fußgänger erst sehr spät in den Sichtbereich der nach vorne schauenden Sensoren. Je kleiner der Sichtbereich, desto später wird der Fußgänger detektiert.

Im Fall der Abbiege-Manöver ergibt sich das kritischere Szenario, wenn sich der Fußgänger ursprünglich in gleicher Richtung wie das Eigenfahrzeug bewegt. Um diese Situationen bestmöglich zu entschärfen, werden Sensoren mit einem großen Sichtbereich zur möglichst frühen Detektion des Fußgängers, kurze Latenz- und schnelle Zykluszeiten benötigt. Die heutige Generation der nach vorne schauenden Sensoren kann diese Situationen kaum bis gar nicht lösen. In beiden Szenarien ist die Systemleistung des kooperativen Sensors nahezu identisch mit dem idealen Sensor. Es kann im Gegensatz zu den konventionellen Sensoren nahezu die komplette Geschwindigkeit abgebaut werden. Diese besonders kritischen Fahrmanöver werden voraussichtlich nicht mit der nächsten Generation an vorausschauenden Sensoren abgedeckt werden können, da ein extrem großes FoV notwendig ist. Selbst zukünftige Weitwinkel-Kameras können dies noch nicht vollständig abdecken.

5. Technologien und ausgewählter Konzeptansatz

Ein neuartiger Systemansatz zum Schutz schwächerer Verkehrsteilnehmer beinhaltet zwei Schlüsselfragen:

- Welche kooperative Technologie kann zur ausreichend präzisen relativen Lokalisierung von schwächeren Verkehrsteilnehmern in Verdeckungsszenarien verwendet werden?
- Wie kann das kooperative Schutzsystem effizient in das Fahrzeug integriert werden?

Verschiedene kooperative Technologien bieten die Möglichkeit, eine relative Lokalisierung durchzuführen, jedoch sind manche Standards durch ihre Definition in der erzielbaren Genauigkeit oder Verfügbarkeit eingeschränkt. Ein wesentliches Kriterium bei der Auswahl der passenden Technologie ist oft Zeit - wie Latenzzeit, Verbindungszeit oder erreichbare Zeitauflösung. Um den hoch komplexen Vorgängen im städtischen Straßenverkehr Rechnung zu tragen, müssen Informationen in Bruchteilen einer Sekunde übertragen und die Situation erkannt werden, damit im Gefahrenfall eine Aktion im Fahrzeug eingeleitet und der VRU geschützt werden kann.

Bluetooth Low Energy hat im Gegensatz zum klassischen Bluetooth eine deutlich verringerte Latenz- und Verbindungszeit. Zusammen mit einem verringerten Energieverbrauch deckt die Technologie einen Teil der Anforderungen für die relative Lokalisierung ab. Doch gerade für zeitbasierte Lokalisierungsverfahren wie Roundtrip Time of Flight (RTof) oder Time Difference of Arrival (TDoA) ist die geringe Bandbreite von Bluetooth ein Ausschlusskriterium (siehe auch Erläuterung zu Bild 10). Mit nur 2 MHz pro Kanal ist keine genaue Aufnahme des Zeitstempels möglich und somit auch keine genaue relative Ortung mit den oben genannten Verfahren.

Eine größere Bandbreite ermöglicht zum Beispiel der WLAN Standard **IEEE 802.11ac**. Bis zu 160 MHz können die 20 MHz breiten Kanäle des Standards kombiniert werden und bieten damit eine Basis, um deutlich genauere Zeitstempel aufzunehmen als es mit Bluetooth Low Energy möglich wäre. Der große Nachteil, der bei diesem Standard zum Tragen kommt, ist die Verbindungszeit. In städtischer Umgebung müssen hunderte Verbindungen mit VRUs in kürzester Zeit auf- und abgebaut werden, um mit allen nötigen VRUs in Kontakt treten zu können. Wie viele andere WLAN Standards, vertraut 802.11ac auf einen Association und Authentification Prozess, welcher den Datenaustausch von mehreren Paketen benötigt. Sollten Pakete bei diesem Prozess verloren gehen, muss er von vorne starten, was die Verbindungszeit nicht deterministisch und den Standard unbrauchbar für Lokalisierungsapplikationen macht. [7] [8]

Dieses Problem wurde bei **IEEE 802.11p** gelöst, indem der Zwang eines Verbindungsaufbaus in diesem Standard aufgehoben wurde. Viel mehr befinden sich die Geräte in einer Art Broadcasting-Modus und können - ohne bei der Verbindung Zeit zu verlieren - die Position des VRUs ermitteln. Die in der EU auf 30 MHz für Straßensicherheitsapplikationen begrenzte Bandbreite schränkt zwar die mögliche örtliche Auflösungsfähigkeit stark ein, dennoch ist im Gegensatz zu den anderen Standards diese Bandbreite dediziert für die V2X-Kommunikation gesichert und wird nicht von anderen Applikationen genutzt. Dadurch ist eine Störung der Kommunikation unwahrscheinlicher. [9] [10]

Kurz- oder mittelfristig werden weitere WLAN Standards veröffentlicht werden, welche auch interessante Eigenschaften für eine relative Lokalisierung aufweisen. So operiert der Anfang 2016 vorgestellte **HaLow** Standard im 900 MHz Band, was besonders interessante physikalische Eigenschaften hinsichtlich der Beugung um Straßenecken und Fahrzeuge sowie eine geringere Dämpfung durch Materie impliziert, verglichen mit anderen Standards, die im 2,4 GHz (BLE) oder 5-6 GHz (11ac, 11p) Spektrum operieren. Dadurch können Entfernungen von bis zu 1.000 Metern erreicht werden. Sollte der Association und Authentification Pro-

zess übernommen werden, ruft das allerdings die gleichen Nachteile hervor wie bei 802.11ac. [11] [12]

Ebenfalls Anfang 2016 wurde die Standardisierung am **802.11az** Standard gestartet, welcher als „Next Generation Positioning“ propagiert wird, mit verbesserter absoluter und relativer Lokalisierung und besserer Zeitmessung. Ob diese Anforderungen in genügendem Maße für die relative Lokalisierung von VRUs erfüllt werden können, bleibt abzuwarten. [13]

Eine vielversprechende Funktechnologie mit der Bezeichnung Ultra-Wideband, kurz UWB genannt, etabliert sich derzeit in der drahtlosen Nahbereichskommunikation, begünstigt durch die fortschreitende Integration in der Halbleiter-Technologie, die eine kostengünstige Umsetzung möglich macht. Die UWB Technologie basiert auf dem Standard IEEE 802.15.4 [14]. Dabei werden impulsförmige Funksignale mit sehr hohen Bandbreiten ≥ 500 MHz aber geringen Sendeleistungen übertragen. Die Regulierung schreibt einen Grenzwert für die spektrale Leistungsdichte von $-41,3$ dBm/MHz bei einer maximalen Spitzenleistung von 0 dBm/50 MHz vor (dies entspricht etwa -15 dBm Kanalleistung, vergleichbar mit der Sendeleistung eines gewöhnlichen Funkschlüssels). Durch diese Eigenschaften soll gewährleistet werden, dass primäre Funkdienste im gleichen Frequenzbereich nicht gestört werden.

Durch die hohe Bandbreite bietet die Technologie das Potenzial einer sehr hohen Ortsauflösung von bis zu ± 10 cm und ist dadurch robust gegen Mehrwegausbreitungen wie reflektierte Signale, welche im Vergleich zu schmalbandigen Funktechnologien einfach detektiert und unterschieden werden können. Dieser Sachverhalt ist in Bild 5 dargestellt.

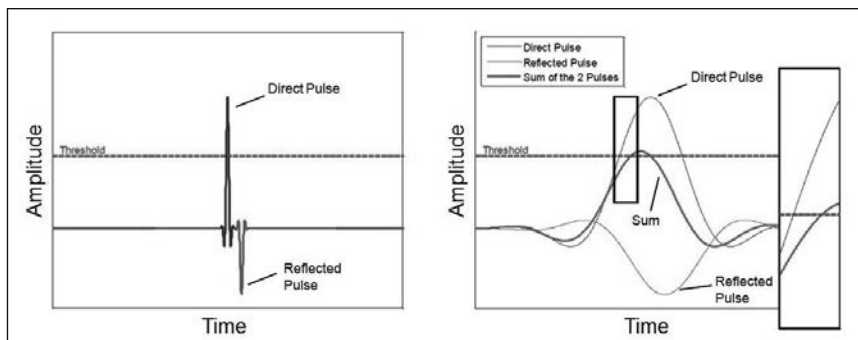


Bild 5: UWB Signal mit Reflexionen (links) und schmalbandiges Signal mit Reflexionen (rechts) [15]

Das UWB Signal, welches aus 2 ns breiten Pulsen aufgebaut ist, wird nicht vom reflektierten Signal beeinflusst. Hingegen ist das schmalbandige Signal sehr empfindlich gegen die Reflektion und verändert somit das direkte Signal resultierend in der Summe aus beiden Signalen in Amplitude und Zeit. Bei Anwendung einer Laufzeitmessung (RTof) zur Lokalisierung geht hier die Präzision verloren.

Aufgrund dieser Eigenschaften ist die UWB Technologie prädestiniert für die Lokalisierung von schwächeren Verkehrsteilnehmern, weil eine Lokalisierung auch in stark reflektierenden Umgebungen oder gar bei verdeckten Objekten, die das Signal des direkten Pfads im Vergleich zum reflektierten Pfad stark dämpfen, noch möglich ist.

Jedoch gibt es auch bei dieser Technologie Herausforderungen, denen man sich stellen muss; in erster Linie die durch die geringe Sendeleistung bedingten Grenzen bei der Leistungsübertragungsbilanz. Trotzdem ist in für die VRU-Funktion benötigten Bereichen mit einer ausreichend bis guten Verfügbarkeit zu rechnen, da besonders die dynamische Änderung des Umfelds einem dauerhaften Signalausfall entgegenwirkt.

Erste Versuchsreihen im Automotive Umfeld bei einer Frequenz von 4 GHz und einer Bandbreite von 500 MHz zeigen bereits vielversprechende Ergebnisse bezüglich der Genauigkeit und Reichweite.

Neben der eigentlichen Auswahl einer geeigneten Funktechnologie zur Realisierung der VRU Ortung und Übertragung von Kontextinformationen spielt die effiziente Realisierung einer Systemarchitektur im Fahrzeug, mit der z. B. die Sende- und Empfangsfunktionalität realisiert werden kann, eine große Rolle.

Bei der Vielzahl an existierenden und geplanten Sende- und Empfangssystemen empfiehlt sich, kein weiteres System zu ergänzen, sondern die Nutzung oder Erweiterung eines bestehenden Systems zu prüfen. Grundsätzlich können dies alle jetzigen und zukünftigen funkbasierten Fahrzeugsysteme sein.

So gewinnt z. B. im Bereich der passiven Fahrzeugzugangssysteme die Lokalisierung des Funkschlüssels mittels einer Laufzeitmessung mehr und mehr an Bedeutung. Bei der aktuellen Lösung, die auf Lokalisierung mittels Niederfrequenz (NF)-Kommunikation (125 kHz) per Feldstärkemessung und Rückkanal mittels Hochfrequenz (HF)-Kommunikation (434 MHz / 868 MHz) basiert, zeigt sich eine unvermeidbare Sicherheitslücke: Das NF- und/oder HF-Signal lassen sich unbemerkt durch eine sogenannte Relais-Attacke verlängern; damit wird dem Fahrzeug der Aufenthalt des Funkschlüssels in Fahrzeugnähe suggeriert und es lässt sich von fremder Hand öffnen.

Als einzige „100%-Lösung“ für diesen Relais-Angriff wird eine Signal-Laufzeitmessung betrachtet, wie sie beispielsweise mit UWB umsetzbar ist. Die Nähe des Nutzers mit seinem Funkschlüssel zum Fahrzeug kann zuverlässig und nicht verfälschbar ermittelt werden, was diese Art der Sicherheitslücke schließt. Etliche OEMs bereiten die nächste Generation von Zugangssystemen bereits für die Integration der UWB-Technologie vor. Um eine hohe Zuverlässigkeit der Zugangs-Funktion unter allen Bedingungen (Umgebung, Körperabschattungseffekte usw.) zu ermöglichen, werden mehrere UWB-Einheiten im Fahrzeug verbaut sein. Aktuell geht man von zwei bis fünf dieser Einheiten aus.

Darüber hinaus wird untersucht, inwiefern sich die zunächst rein für Sicherheits-Aspekte genutzte UWB-Technologie („Distance Bounding“) zu einer echten Ortungs-Technologie für den Anwendungsfall „Keyless Entry“ ausbauen lässt. Die Ortungs-Genauigkeit hierfür soll dabei soweit optimiert werden, dass damit die Ortung für Fahrzeug-Zugang und -Start (also insbesondere die Innen-/Außenraum-Unterscheidung, sowie Zonen-Detektion rund um das Fahrzeug) mittels UWB-Technologie möglich ist und ggf. die derzeitige NF-Ortung ersetzt werden kann. Dieser Ansatz ist auch vor dem Hintergrund einer erwarteten Integration der UWB-Technologie in Smartphones reizvoll.

Somit ergibt sich ein hohes Synergie-Potential für die Anwendungsfälle „Keyless Entry“ und „kooperativer Schutz von VRUs“,

- da eine UWB basierte Lokalisierung erweitert werden könnte,
- und da eine gemeinsame UWB-Sende- und Empfangsinfrastruktur genutzt werden könnte.

Wenn dieser Übertragungsstandard bereits in das Smartphone integriert sein wird, dann könnte dieses gleichzeitig als VRU-Tag fungieren. Aber auch als kleine, separate Einheit ist der VRU-„Tag“ vorstellbar, so wären z.B. Kleinkinder einfacher und sicherer geschützt.

Der Systemansatz für das kooperative VRU Schutzsystem knüpft also an das beschriebene zukünftige passive Fahrzeugzugangssystem an, welches sich die Eigenschaften der UWB-Technologie zu Nutze macht. Für eine ortsgenaue Fernlokalisierung des VRU-„Tags“ ist eine Kombination einer reinen Abstandsmessung und einer Winkelmessung notwendig, um einen Schnittpunkt, also die Position eines VRU, zu erhalten.

Im Fahrzeug befinden sich damit die vom Zugangssystem erforderlichen zwei bis fünf Empfangseinheiten sowie eine zusätzliche Funktionseinheit, welche die Algorithmen zur Ortung der VRUs und Errechnung von Wahrscheinlichkeiten der Gefährdung sowie der Auslösung von Sicherheitsfunktionen (Warnkaskaden, Bremsen, Lenken...) realisiert.

Somit wird ein zukünftig bestehender Ansatz erweitert um damit eine wichtige Sicherheitsfunktion für die schwächeren Verkehrsteilnehmer durch neue Kommunikationstechnologien wirksam umzusetzen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Schwächere Verkehrsteilnehmer haben keine „Crash Zone“ und müssen aktiv geschützt werden. Die Maßnahmen der passiven Sicherheit und die Schutzsysteme der aktiven Sicherheit zeigen dabei zwar Wirksamkeit, aber vor allem die Zahl getöteter schwächerer Verkehrsteilnehmer konnte in der Vergangenheit nur unzureichend reduziert werden. Der demografische Wandel, die zunehmende Anzahl an u. a. Radfahrern und Pedelecs und die Anforderungen des Automatisierten Fahrens an die umfassende Sensierung des Umfelds erfordern Lösungen, welche technologische Barrieren der auf Sichtverbindung angewiesenen derzeitigen Umfeldsensoren überwinden. Kooperative Sensortechnologien bieten die Fähigkeit, verdeckte Verkehrsteilnehmer und Objekte zu erfassen. Aber im Gegensatz zur Vehicle-to-Vehicle Kommunikation, bei der jeder Teilnehmer u. a. eine Eigenlokalisierung bereitstellt, ist diese bei schwächeren Verkehrsteilnehmern mit den bekannten Mitteln der Fusion aus GNSS und Bewegungssensoren nicht mit der notwendigen Leistungsfähigkeit realisierbar.

In Forschungsprojekten wurden bereits Ansätze zur Nutzung der Kommunikationstechnologie von Fahrzeug zu schwächerem Verkehrsteilnehmer erarbeitet, um deren relative Ortung zu realisieren; nun bietet die UWB-Technologie das Potenzial, dies mit einer standardisierten und sehr geeigneten Übertragungstechnologie umzusetzen. Zudem ergibt sich ein weiterer großer Vorteil des Konzeptes: Es wird bereits an einem Fahrzeugsystem – dem zukünftigen Konzept für Keyless Entry der nächsten Sicherheitsstufe – gearbeitet, dessen Infrastruktur ideal genutzt und erweitert werden kann. Es bietet ein umfassendes Schutzsystem für schwächere Verkehrsteilnehmer, welches bisherige Umfeldsensor-basierte Systeme ideal ergänzt.

7. Literaturangaben

- [1] World Health Organisation (WHO), Global status report on road safety 2015, Schweiz 2015
- [2] Verkehrs- und Unfalldaten Deutschland, bast, Sept. 2015
- [3] Vorausschauender Fußgängerschutz mit Hilfe von Transpondersystemen und Umfeldsensoren, Stephan Zecha, Verlag Dr. Hut, 2015
- [4] Forschungsprojekt AMULETT, Abschlusspräsentation, Aschaffenburg, 2009
- [5] Moerman, Kees, et. al.: Improving the safety and mobility of vulnerable road users through ITS applications (VRUITS) (2014),
http://www.vruits.eu/themes/bamboo/deliverables/VRUITS_D42_141029_wm.pdf,
Zugriff 04.08.2016.
- [6] Tessier, O., Zecha, S., et. al.: Additional protection value due to cooperative pedestrian protection systems, Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Gladbach, 2016
- [7] Xirrus: Whitepaper 802.11ac Demystified (2013), http://www.xirrus.com/cdn/pdf/802-11ac_Demystified.pdf, Zugriff 02.08.2016.
- [8] Intel: Understanding IEEE* 802.11 Authentication and Association (29.4.2016),
<http://www.intel.com/content/www/us/en/support/network-and-i-o/wireless-networking/000006508.html>, Zugriff 02.08.2016.
- [9] Teixeira, Fernando, Macedo, Daniel, Nogueira, Jose: Vehicular networks using the IEEE 802.11p standard: An experimental analysis, published in: Vehicular Communications April 2014, S. 91 -96.
- [10] ETSI: ETSI EN 302 663 (2012),
http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302663/01.02.00_20/en_302663v010200a.pdf, Zugriff 02.08.2016.
- [11] Kenney, John: Dedicated Short-Range Communication (DSRC) Standards in the United States, published in: Proceedings of the IEEE, Vol. 99, No. 7, July 2011, S. 1162 – 1182.
- [12] Adame, T., et. al.: Capacity Analysis of IEEE 802.11ah WLANs for M2M Communications, published in: MACOM 2013, LNCS 8310, S. 139 – 155.
- [13] IEEE: Status of IEEE 802.11az Next Generation Positioning (o. D.)
http://www.ieee802.org/11/Reports/tgaz_update.htm, Zugriff 02.08.2016.
- [14] IEEE: IEEE Std 802.15.4™-2011, „IEEE Standard for Local and metropolitan area networks — Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs);
<https://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2011.pdf>
- [15] Connell, Ciaran: What's The Difference Between Measuring Location By UWB, Wi-Fi, and Bluetooth (2015), <http://electronicdesign.com/communications/what-s-difference-between-measuring-locationuwb-wi-fi-and-bluetooth>, Zugriff 10.08.2016.

Sensorfusion zum Verständnis des Innenraumkontexts

Ein wichtiger Schritt zum intelligenten Fahrzeug

Benedikt Brück, Prof. Dr. **Klaus Bengler**, TU München, Garching;
Sebastian Wieland, **Martin Lang**, BFFT GmbH, Gaimersheim

Kurzfassung

Heutige Fahrzeuge haben nur ein sehr begrenztes Wissen über das Geschehen im Fahrzeuginnenraum. Aus diesem Grund wurde ein Serienfahrzeug um Zusatzsensorik erweitert, um ein erweitertes Verständnis über den Innenraum zu erlangen. Die Zusatzsensorik orientiert sich dabei an vorhandener aber anderweitig genutzter Seriensenorik. Durch eine Fusion von Time-of-Flight-Kamera (Gestensteuerung), 2D Kamera (Tablet), Busdaten (Tür-, Fahrwerks-, Belegungssensor), Thermo Kamera (Nachtsicht) und Mikrofon können die Insassen klassifiziert, sowie der Lautstärkepegel im Fahrzeug geschätzt werden. Diese Informationen bieten die Grundlage für erweiterte Fahrzeugfunktionen.

1. Einleitung

Der aktuelle Forschungsschwerpunkt zum automatisierten Fahren liegt auf der Umfeldmodellierung und der Erkennung des Fahrerzustands. Allerdings wird es immer wichtiger zu erkennen, wie die aktuelle Situation im Fahrzeug selber ist. Dabei ist bereits die simple Fragestellung interessant, welche Plätze sicher belegt sind. Heutige Fahrzeuge gehen davon aus, dass Sitzplätze ab einer bestimmten Gewichtsschwelle belegt sind. Dies kann aber schon durch schweres Gepäck erreicht werden. Diese Unterscheidung wird insbesondere bei nicht vermeidbaren Unfällen interessant. Ein Seitenaufprall kann beispielsweise durch eine leichte Beschleunigung vom belegten Beifahrerplatz auf einen nicht belegten Platz hinten rechts verlagert werden, um Verletzungen zu reduzieren.

Weiterhin ist auch für heutige Assistenzsysteme eine Erkennung des Innenraumkontexts sinnvoll. So kann eine Erkennung der Personen und ihres Verhalten eine mögliche Ablenkung des Fahrers beschreiben. Warngrenzen und Systemeingriffe können in diesem Fall weiter nach vorne gezogen werden. Als Beispiel können hier laute Kinder auf der Rücksitzbank angeführt werden.

Daher stellt sich die Frage, wie eine sichere Erkennung möglich ist. Da ein einzelner Sensor allein nicht ausreichend ist, ist eine Fusion von mehreren Sensoren nötig. Hierzu wird Sensorik analog zu aktueller Seriensenorik verwendet.

2. Stand der Technik

Im Fahrzeuginnenraum konzentriert sich die aktuelle Forschung auf dem Fahrer und dessen Zustand und Verhalten. So werden intensiv die Übernahmebereitschaft während des automatisierten Fahrens [1], die Ablenkung durch Fahrzeugsysteme [2] und die Aufmerksamkeit auf die aktuelle Fahrsituation [3] untersucht.

Zur sicheren Belegungserkennung auf allen Plätzen gibt es bereits Ansätze, die auf der Fusion von Sensordaten beruhen [4,5]. Die verwendeten Sensoren sind allerdings auf Seriensensorik im Fahrzeug beschränkt, sodass die verwendeten Ansätze mittels Zustandsmaschine [4] oder maschinellem Lernen [5] zwar im Regelfall gut funktionieren, allerdings Probleme in Grenzfällen haben.

Eine erweiterte Betrachtung des Fahrzeuginnenraums wird im Forschungsprojekt „InCarIn“ untersucht [6]. Hier werden u.a. auch die Sitzpositionen von Fahrzeuginsassen mittels 3D Kamera bestimmt, sowie deren Größe [7]. Allerdings wird hier das Vertrauen in jeweils einen Sensor gesetzt, sodass Verdeckung oder Sensorausfall nicht kompensiert werden können.

3. Grundlagen

Als Basis der Untersuchungen wurde ein Audi A8 um Zusatzsensorik im Fahrzeuginnenraum erweitert. Dabei wurde bei der Auswahl der Sensoren den aktuellen Entwicklungen Rechnung getragen. Außerdem wurde darauf geachtet, dass die Sensoren jeweils unterschiedliche Informationen erfassen können. Folgenden Sensoren wurden dafür auf dem Sitzplatz hinten rechts integriert oder waren schon serienmäßig vorhanden:

- **Time-of-Flight Kamera:** Die Time-of-Flight (ToF) Kamera ist eine im Nah-Infrarotlicht arbeitende Kamera, die auf dem Prinzip der Lichtlaufzeit beruht. Hierbei wird durch eine aktive Infrarot LED modulierte Licht ausgesendet. In der Kamera selber wird das reflektierte Licht eingefangen und die Phasenverschiebung ermittelt. Dadurch kann die Entfernung zur Reflektionsstelle für jeden einzelnen Pixel bestimmt werden. Hieraus resultiert ein Distanzbild, welches eine 3D Repräsentation der Umgebung darstellt. Zusätzlich kann die Menge des reflektierten Lichts bestimmt werden, wodurch ein Amplitudenbild, ähnlich wie ein Graustufenbild, erstellt werden kann. Ein beispielhaftes Amplituden und Distanzbild sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Technologie wird seit Ende letzten Jahres serienmäßig im 7er BMW zur Erkennung von Gesten eingesetzt [8]. Im verwendeten Fahrzeug wurde eine abgewandelte Form eingesetzt, die eine Auflösung von 320x240 Pixeln besitzt und den Sitzplatz hinten rechts von vorne erfasst.

- **RGB Kamera:** Bei der RGB Kamera handelt es sich um eine HD Kamera mit einer Auflösung von 1280x720 Pixeln, die ein Farbbild der Umgebung aufnimmt. Der Verbauort ist analog zur Time-of-Flight Kamera an der Rückseite des Beifahrersitzes gewählt. Das serienmäßige Äquivalent ist das Audi Tablet, welches über eine integrierte Kamera verfügt und ebenfalls den Sitzplatz hinten rechts beobachten kann [9]. Ein Referenzbild zu den Bildern der Time-of-Flight Kamera ist ebenfalls in Abbildung 1 dargestellt.
- **Thermo Kamera:** Zur Erfassung von Wärmestrahlung im Fahrzeuginnenraum wurde eine Thermo Kamera verbaut, die eine Auflösung von 64x62 aufweist. Die Kamera erfasst Fern-Infrarotstrahlung und kann durch eine vorherige Kalibrierung so jedem Pixel einen Temperaturwert zuweisen. Ein Beispiel ist in Abbildung 1 zu sehen. Serienmäßig werden Wärmebildkameras heutzutage bereits im Außenraum für Nachtsichtfunktionen verwendet [10].
- **Drucksensoren:** Sensoren im Beifahrersitz zur Belegungserkennung sind heutzutage serienmäßig verbaut [11]. Allerdings sind im europäischen Raum in vielen Fällen Einschränkungen vorhanden. So wird lediglich ab einer Gewichtsschwelle der Zustand von nicht belegt in belegt geändert. Im Versuchsfahrzeug wird hingegen ein Drucksensor verwendet, welcher bei Druckerhöhung seinen Widerstand verringert. Dadurch können Rückschlüsse auf die verwendete Kraft und somit das Gewicht gezogen werden.
- **Feuchtigkeitssensor:** In der Rückenlehne der Rücksitzbank wurden für den rechten und linken Sitz jeweils ein Feuchtigkeitssensor verbaut, der die aktuelle relative Luftfeuchtigkeit misst. Feuchtigkeitssensoren werden heutzutage bereits im Innenspiegel verbaut, um ein Beschlagen der Scheibe zu verhindern [12].
- **Seriensensorik:** Als Seriensensorik wird im weiteren Verlauf das Zusammenspiel folgender Sensoren bezeichnet: Türschloss, Gurtschloss, Fahrwerk (Dämpfer) und Fensterheber. Diese geben Aufschluss darüber, ob die Tür geöffnet oder geschlossen ist, der Gurt gesteckt ist, das Fenster gerade verfahren wird und in welcher Position sich die Dämpfer befinden. Ein Beispiel über den Datenverlauf während Ein- und Aussteigen ist in Abbildung 1 dargestellt.
- **Mikrofon:** Zusätzlich wurde ein Mikrofon verbaut, welches Audioinformationen über den Sitzplatz aufzeichnet.

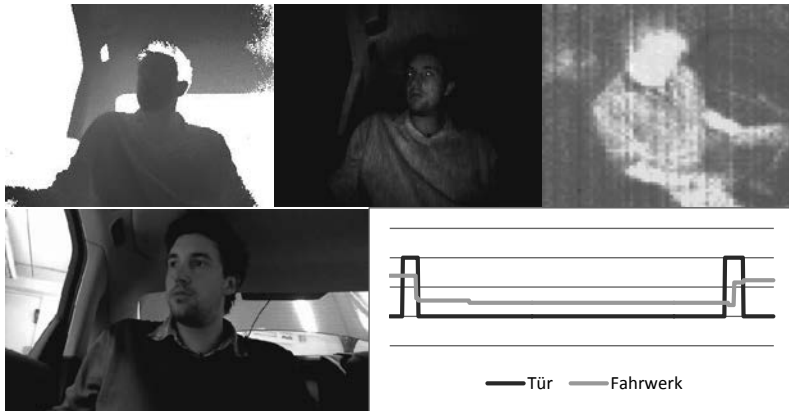


Bild 1: Oben v.l.n.r.: Distanz und Amplitudenbild der ToF-Kamera, sowie Thermobild
Unten v.l.n.r.: Referenzbild der RGB-Kamera, sowie Seriensensorik beim Ein- und Aussteigen

Durch die verwendeten Sensoren können jeweils unterschiedliche Eigenschaften über den Innenraum erfasst werden. Allerdings haben sämtliche Sensoren auch Einschränkungen, wodurch eine hundertprozentige Erkennung nicht gewährleistet werden kann. Die Eigenschaften und Einschränkungen werden im Folgenden erläutert:

- **Time-of-Flight Kamera:** Durch Auswertung der Distanzbilder der Time-of-Flight Kamera können Formen von Objekten im Sichtfeld bestimmt werden. Dadurch ist es möglich Personen von Objekten zu unterscheiden. Allerdings kann durch Verdeckung die Erkennung eingeschränkt sein.
- **RGB Kamera:** Durch Analyse des Farbbildes können Merkmale und das Aussehen von Objekten bestimmt werden. Dabei können Gesichtsmerkmale erkannt werden und das Alter von Personen bestimmt werden. Probleme ergeben sich hier ebenfalls durch Verdeckung oder durch bewusste Täuschung des Algorithmus z.B. durch aufgedruckte Gesichter.
- **Thermo Kamera:** Durch Analyse des Temperaturbildes können Personen von Objekten unterschieden werden, da die Oberflächentemperatur in vielen Fällen variiert. Problematisch ist hier eine Umgebungstemperatur, die der Hauttemperatur von Menschen entspricht. Außerdem erwärmt sich der Sitz, sodass nach langen Fahrten nach dem Aussteigen nicht sofort ein Temperaturunterschied zu erkennen ist.

- **Drucksensoren:** Durch die Drucksensoren kann die Druckverteilung und –intensität auf dem Sitz gemessen werden. Diese unterscheidet sich in fast allen Fällen zwischen Personen und Objekten. Dieses ist in Abbildung 2 dargestellt. Problematisch sind hier zusätzliche Objekte auf dem Sitz, wie z.B. Kindersitze, die eine Erkennung erschweren.
- **Feuchtigkeitssensor:** Über den Feuchtigkeitssensor lassen sich Feuchteinformationen über Objekte und Personen aufzeichnen, die sich auf dem Sitz befinden. Auch hier gibt es Unterschiede zwischen Personen und Objekten. Problematisch ist hierbei die verzögerte Erkennung wie in Abbildung 2 dargestellt. Dadurch können Funktionen, die eine Statusänderung unmittelbar nach Zustieg benötigten nicht bedient werden.
- **Seriensensorik:** Durch die Seriensensorik kann eine Interaktion mit dem Fahrzeug erkannt werden. Zwar können Fenster auch versehentlich durch falsch verstaute Objekte betätigt werden, allerdings ist die Wahrscheinlichkeit eher gering. Problematischer ist, dass die Sensoren in vielen Fällen (z.B. Fenster im Winter) nicht betätigt werden. Auch kann es sein, dass Personen sich nicht anschnallen oder stattdessen Objekte gegurtet werden.
- **Mikrofon:** Mittels der Audioverarbeitung kann die Lautstärke auf dem Platz bestimmt oder eine Spracherkennung durchgeführt werden. Die Lautstärke kann in Kombination mit der Belegungserkennung auf eine Ablenkung des Fahrers hindeuten. Zusätzlich ist eine Unterscheidung zwischen Personen und Objekten möglich. Einschränkungen entstehen, wenn auf dem Platz gar nicht gesprochen wird oder z.B. ein Radio „künstliche“ Geräusche erzeugt.

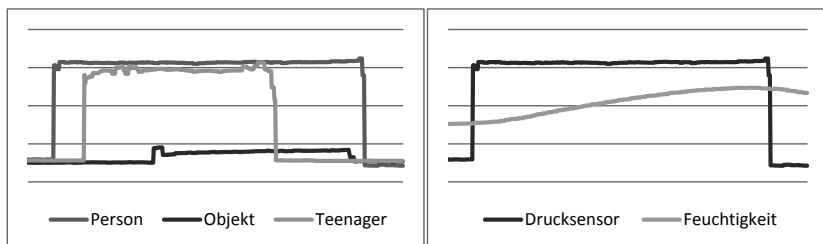


Bild 2: Links: Unterschiedliche Druckintensitäten durch Personen und Objekte
Rechts: Verzögerte Erkennung der Feuchtigkeitsänderung

Diese Sensoren sollen nun dazu verwendet werden, Informationen über den Innenraum zu gewinnen. Da eine Erfassung über einen einzelnen Sensor aufgrund der vorgenannten Probleme nicht gewährleistet werden kann, wird eine Kombination der Sensoren verwendet, um die Informationen zu erfassen.

Diese Informationen wurden zunächst in fünf Klassen unterteilt. Dabei werden Gewichts- und Altersschätzung implizit mit einbezogen:

- **Leer:** Der Sitzplatz ist nicht belegt.
- **Objekt:** Auf dem Sitzplatz befindet sich ein Objekt, das nicht in die nachfolgenden Kategorien klassifiziert werden kann. Beispiele sind Jacken, Taschen oder unbelegte Kindersitze.
- **Kind:** Auf dem Sitz befindet sich ein Kind (Alter 0 – 12). Dieses kann sich in einem Kindersitz befinden.
- **Teenager:** Auf dem Sitz befindet sich ein Teenager (Alter 13 -18), der auch auf einer Sitzerrhöhung sitzen kann.
- **Person:** Auf dem Sitz befindet sich eine erwachsene Person.

Zur Erfassung der Klassen werden die Sensordaten der einzelnen Sensoren zunächst verarbeitet.

4. Vorverarbeitung

Das Farbbild der RGB-Kamera kann wie bereits erwähnt auf Merkmale von Objekten und Personen untersucht werden. Um eine Unterscheidung von Personen und Objekten, sowie eine Alterseinschätzung vorzunehmen, wird das Bild auf Gesichtszüge untersucht. Dafür wird zunächst ein Gesicht im Bild mithilfe der Open Source Bibliothek OpenCV [13] gefunden, sowie die Augen extrahiert. Dies liefert eine erste Indikation, dass sich im Bild eine Person befindet. Wird kein Gesicht im Bild gefunden, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um ein Objekt oder einen leeren Sitz handelt. Anschließend werden die Gesichtszüge analysiert. Diese geben aufgrund der Proportionen einen Hinweis auf das Alter. Zusätzlich wird ein Framework zur Altersschätzung verwendet [14]. Dieses wurde auf einer Datenbasis vortrainiert und liefert für Eingangsbilder anhand verschiedener Kriterien eine Altersschätzung. Diese Informationen wurden in Bild 3 visualisiert. Hier wird das erkannte Gesicht eingezeichnet, sowie die geschätzte Klasse aufgrund der Altersklassifikation angegeben.



Bild 3: Gesichtserkennung und Klassenschätzung

Das Distanzbild der Time-of-Flight Kamera wird zunächst vom Rauschen befreit. Hierzu werden sogenannte „Flying Pixel“ entfernt, die sich an den Kanten von Objekt im Sichtstrahl fälschlicherweise bilden. Zusätzlich werden die Oberflächen durch einen bilateralen Filter geglättet. Somit kann eine klare Trennung von Objekten im Vordergrund und Hintergrund gezogen werden. Dadurch kann die Kontur des Vordergrund Objekts bestimmt werden. Die Kontur wird mit zehn vorher definierte Templates verglichen. Die Templates entsprechen dabei dem typischen Aussehen von Personen, unterteilt in männlich und weiblich, sowie nach Altersstufen. Drei exemplarische Templates sind in Bild 4 dargestellt. Die Güte der Übereinstimmung liefert dann ein Maß dafür, ob es sich um eine Person oder ein Objekt handelt, sowie eine Alterseinstufung.



Bild 4: Templates zur Objekterkennung

Das Wärmebild der Thermo Kamera wird zunächst ebenfalls vom Rauschen befreit. Hierzu wird zunächst ein Medianfilter verwendet, der Ausreißer-Pixel entfernt. Anschließend wird Mathematische Morphologie verwendet, um die Wärmehotspots zu hervorzuheben. Das Verfahren wird in Bild 5 verdeutlicht. Im linken Bild ist das Rohbild zu sehen. Nach der ersten Vorverarbeitung ist das Rauschen entfernt und der Wärmehotspot hervorgehoben, allerdings fließt hier noch Hintergrundstrahlung mit ein, die die Berechnung verfälscht. Anschließend wird auch diese entfernt, sodass nur noch die Person im Bild übrigbleibt. Sollte sich keine Person im Bild befinden, ergeben sich durch das Verfahren zufällige Strukturen, die sich deutlich von einer Person unterscheiden. Dieses ist in den rechten beiden Bilder zu erken-

nen. Der weiße Balken zeigt die Wahrscheinlichkeit an, dass es sich um eine Person handelt.

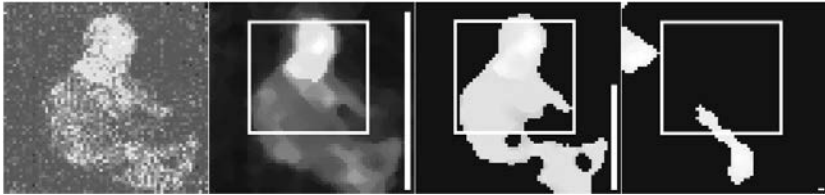


Bild 5: Thermobildverarbeitung

5. Datenfusion

Die vorverarbeiteten Werte aller Sensoren werden anschließend miteinander fusioniert. Hierbei werden verschiedene Verfahren des maschinellen Lernens verwendet und miteinander verglichen.

Als Basis wird der „Random Forest“ verwendet, der als simpelstes Verfahren versucht Schwellwerte zu erlernen, mit denen aufgrund der Informationen der Sensoren kategorisiert werden soll.

Weiterhin wird als Vergleich ein Bayesisches Netz verwendet, welches aufgrund erlernter Wahrscheinlichkeiten versucht die Informationen zu kategorisieren.

Als letztes wird ein Neuronales Netz verwendet. Dieses erzielt in aktuellen Forschungen sehr gute Resultate und kann als State-of-the-Art betrachtet werden. Hierbei werden sogenannte „Hidden Layer“ verwendet, die die Eingangswerte gewichten und so die Klasse bestimmen.

Da während der Aufnahmen zur Evaluation, die im nächsten Kapitel beschrieben wird, sich jeweils nur eine Person im Fahrzeuginnenraum befand und auch die Kinder sich ruhig verhalten haben, ist bei fast allen Aufnahmen die Aussagekraft des Mikrofons gleich null. Daher wurde es für die Kategorisierung vernachlässigt.

6. Ergebnisse

Um das vorgestellte Verfahren zu evaluieren wurde mit 28 Personen Testaufnahmen gemacht. Zusätzlich wurden Leeraufnahmen und Aufnahmen mit Objekten wie Taschen, Jacken und Kindersitzen durchgeführt. Hierbei ergaben sich 73802 Stichproben. Die Verteilung der Aufnahmen ist in Abbildung 5 dargestellt. Ein Großteil der Aufnahmen beinhaltet erwachsene Personen. Dadurch erklärt sich auch der Altersdurchschnitt der betrachteten Personen von 28 Jahren. Diese hatten eine Durchschnittsgröße von 179,5 cm und ein Durchschnitts-

gewicht von 76kg. Aufnahmen mit Teenagern und Kindern sind leider deutlich weniger, wobei das jüngste Kind 5 Jahre alt, 114 cm groß und 23kg schwer war.

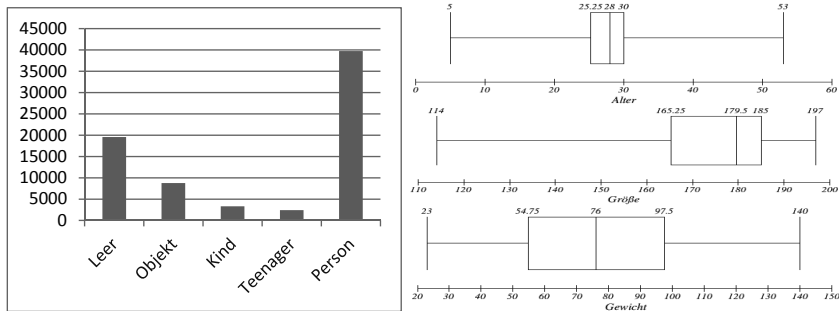


Bild 5: Verteilungen der Aufnahmen

Bei den Aufnahmen wurden mit jedem erwachsenen Probanden fünf Aufnahmen durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Szenarien durchgeführt, die so ausgelegt waren, dass die bereits genannten Schwächen der Sensoren bewusst herbeigeführt werden sollen. So sollte sich der Proband z.B. vom Sitz erheben, um die Drucksensoren zu entlasten oder eine Text lesen, durch den die Time-of-Flight Kamera und die RGB-Kamera verdeckt wurden.

Die Evaluierung erfolgt dabei nach den allgemein verwendeten Gütemaßen Sensitivität (recall) und Genauigkeit (precision) [15]:

$$\text{Sensitivität} = \frac{\sum \text{richtig positiv}}{\sum \text{richtig positiv} + \sum \text{falsch positiv}}$$

$$\text{Genauigkeit} = \frac{\sum \text{richtig positiv}}{\sum \text{richtig positiv} + \sum \text{falsch negativ}}$$

Die Gesamtanzahl der Aufnahmen wurde dafür von doppelten Einträgen (bei denen die Sensorwerte und Klassen identisch sind) befreit und mittels 10-facher Kreuzvalidierung trainiert und evaluiert. Hierzu wird die Gesamtmenge in zehn gleich große Blöcke unterteilt, bei denen die Verteilung der Klassen, wie in Abbildung 5 dargestellt, annähernd identisch ist. Daraufhin wird zehnmal mit neun Blöcken das Modell trainiert und gegen den verbleibenden Block evaluiert. Daraus ergeben sich die in Tabelle 1 dargestellten Erkennungsraten. Hierbei wird ersichtlich, dass der Random Forest und das Bayesische Netz signifikant schlechter

klassifizieren. Insbesondere der Random Forest konnte die Teenager nicht von Erwachsenen unterscheiden. Das Neuronale Netz hingegen zeigt sehr gute Unterscheidungen, die mit einer verbesserten Vorverarbeitung vermutlich noch weiter ansteigen können.

Tabelle 1: Ergebnis der Kreuzvalidierung mit unterschiedlichen Klassifikatoren

Klasse	Neuronales Netz		Random Forest		Bayes Netz	
	Sensitivität	Genauigkeit	Sensitivität	Genauigkeit	Sensitivität	Genauigkeit
Leer	99.09%	94.55%	97.25%	86.92%	87.27%	91.86%
Objekt	89.39%	96.66%	38.00%	95.14%	78.05%	67.35%
Kind	95.12%	97.07%	4.42%	91.94%	93.26%	75.99%
Teenager	97.40%	98.01%	0.00%	0.00%	94.07%	95.36%
Person	99.53%	99.68%	99.37%	79.02%	96.00%	99.61%

Um die Robustheit des Systems zu testen und die Abhängigkeit von einzelnen Sensoren zu evaluieren, wurde mit dem Neuronalen Netz ein weiterer Test durchgeführt. Hierzu wurde ein Sensorausfall simuliert, bei dem ein Sensor durchgängig falsche Werte sendet. Das Ergebnis ist in Tabelle 2 dargestellt. Hierbei wird ersichtlich, dass die Abhängigkeit von der Time-of-Flight Kamera und den Drucksensoren erheblich ist, bei der eine sichere Erkennung nicht mehr gewährleistet werden kann. Somit müssen die Sensoren selbstdiagnosefähig und der Algorithmus auf Ausfälle vortrainiert sein, da sonst sicherheitskritische Funktionen nicht mehr bedient werden können.

Tabelle 2: Ergebnis der Kreuzvalidierung bei Sensorausfall

Klasse	Time-of-Flight Kamera		Drucksensoren		Thermo Kamera	
	Sensitivität	Genauigkeit	Sensitivität	Genauigkeit	Sensitivität	Genauigkeit
Leer	99.30%	70.57%	99.39%	74.92%	98.21%	94.02%
Objekt	34.85%	40.14%	66.99%	53.05%	87.89%	87.29%
Kind	4.50%	26.85%	1.40%	28.57%	89.15%	87.79%
Teenager	38.92%	61.21%	3.75%	28.57%	82.28%	82.29%
Person	92.84%	96.47%	87.71%	91.52%	97.07%	99.35%

7. Diskussion und weiteres Vorgehen

Das vorgestellte Verfahren zeigt eine sichere Möglichkeit, Belegung von Sitzplätzen zu ermitteln und die Insassen zu klassifizieren. Hierdurch ergeben sich neue Funktionsmöglichkeiten

beim Precrash und durch Kombination mit der Lautstärke auf einzelnen Plätzen eine verbesserte Ablenkungsschätzung.

Im nächsten Schritt sollte das minimale Sensorset zur Erfüllung der Funktionsanforderungen gesucht werden, um nicht nur bei Vollausstattung die Funktionen anbieten zu können. Zusätzlich können weitere Informationen aus dem aufgezeigten Sensorset extrahiert werden, wie zum Beispiel die Sitzposition, um Airbags adaptiv schalten zu können. Dies ermöglicht für alle Insassen ein intelligentes und sicheres Fahrzeug.

8. Literaturangaben

- [1] Gold, C., et al., "Take over!" How long does it take to get the driver back into the loop?, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Vol. 57. No. 1. SAGE Publications, 2013
- [2] Ferris, T., et. al., Investigating the Roles of Touchscreen and Physical Control Interface Characteristics on Driver Distraction and Multitasking Performance, ATLAS-2015-08 (2016)
- [3] Underwood, G., et al., Visual attention while driving: sequences of eye fixations made by experienced and novice drivers., Ergonomics 46.6 (2003): 629-646
- [4] Terroso-Sáenz, F., et al. A complex event processing approach to perceive the vehicular context, Information Fusion (2012)
- [5] Brück, B., & Bengler, K. Sensor fusion and human behavioral pattern analysis for vehicle occupancy detection. In G. Lindgaard & D. Moore (Eds.), Proceedings of the 19th Triennial Congress of the International Ergonomics Association(IEA) 2015
- [6] Insassen- und Innenraumkontextanalyse im Automobil. Forschungsprojekt gefördert durch das BMBF. Abgerufen am 30.8 <http://www.incarin.de/>
- [7] Kamerabasierte Personenerfassung für den Auto-Innenraum, Pressemitteilung, Fraunhofer IAO, Abgerufen am 30.8 <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2016/august/kamerabasierte-personenerfassung-fuer-den-auto-innenraum.html>
- [8] A New Way to communicate, Pressemitteilung, Delphi Automotive, Abgerufen am 30.8 <http://delphi.com/media-old/featurestories/delphi%27s-gesture-control-system>

- [9] Audi connect und Infotainment, Audi Media Center, Audi AG, Abgerufen am 30.8
<https://www.audi-mediacenter.com/de/audi-auf-der-ces-2016-5294/audi-connect-und-infotainment-5298>
- [10] BMW incorporates thermal imaging cameras in its car, Pressemitteilung, Flir, Abgerufen am 30.8
http://www.flir.com/uploadedFiles/CS_EMEA/Application_Stories/Media/Downloads/BMW_A_EN.pdf
- [11] Supplemental Restraint System, Owner's Manual Guide, Volvo, Abgerufen am 30.8
<http://support.volvocars.com/en-CA/cars/Pages/owners-manual.aspx?mc=Y381&my=2015&sw=14w46&article=a0dea25cbe6a1ec4c0a801e800ec65ee>
- [12] Feuchtesensor, Technik-Lexikon, Volkswagen AG, Abgerufen am 30.8
<http://www.volkswagen.de/de/technologie/technik-lexikon/feuchtesensor.html>
- [13] Bradski, G., The opencv library, Doctor Dobbs Journal 25.11 (2000), Seite 120-126
- [14] Klontz, J.C., et al., Open source biometric recognition., Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS), 2013 IEEE Sixth International Conference on. IEEE, 2013.
- [15] Olson, D. L. & Delen, D., Advanced Data Mining Techniques, Springer, 1st edition (February 1, 2008), Seite 138

Herausforderungen, Migrationspfade und Zukunftstechnologien auf dem Weg hin zum vollautomatisierten Fahren

Perspektiven und Sichtweisen aus dem Blickwinkel eines Automobilradars

Dr.-Ing. **Martin Kunert**, Dipl.-Ing. **Frank Meinl**, M.Sc. **Martin Stolz**,
Robert Bosch GmbH, Leonberg

Kurzfassung

Der Übergang vom assistierten zum vollautomatisierten Fahren wird in der Automobilindustrie und den sich gerade bildenden neuen Märkten sehr kontrovers diskutiert. Vom stetigen, evolutionären Übergang der bereits existierenden Fahrerassistenzsysteme bis hin zum disruptiven, komplett revolutionären Wechsel auf autonom fahrende Fahrzeuge in den nächsten Jahren scheint alles möglich zu sein. Sich ändernde Geschäftsmodelle (wie car-sharing) und neue Kundenansprüche (wie ständige Vernetzung und neues Mobilitätsverständnis der Kunden) werden bei der zukünftigen Fahrzeugentwicklung und dem geforderten Automatisierungsgrad eine entscheidende Rolle spielen.

In diesem Vortrag werden aus der Sichtweise von bestehenden Entwicklungen auf dem Gebiet der Automobilradare die technologischen und funktionalen Fortschritte der kommenden Jahre aufgezeigt und detaillierter beschrieben. Mit Blick auf neuartige Fahrfunktionen bis hin zum vollautomatisierten Fahren werden die notwendigen Anforderungen an die Radarsensorik definiert und mögliche Realisierungsformen aufgezeigt.

Ausgehend von den bereits existierenden Fahrerassistenzfunktionen werden aus den bestehenden Anforderungen die entsprechenden Rückschlüsse für zukünftige hochautomatisierte Fahrfunktionen gezogen.

Auf die in jüngster Zeit sich etablierten Verfahren der Radarsignalauswertung mittels Mikro-Doppler wird speziell eingegangen und auf das bisher ungehobene Potenzial für eine wesentlich bessere Umfeld-Wahrnehmung und Situationsinterpretation hingewiesen. In Messergebnissen und Beispielen zur Mikro-Dopplerauswertung unter verschiedenen Verkehrsszenarien mit diversen Verkehrsteilnehmern (Personen, Radfahrer, Autos und Lkws) wird das Potenzial zur Objektklassifikation eindrucksvoll demonstriert. Diese wird neben der notwendigen, noch besseren Winkeltrennfähigkeit und Objektseparationsgüte eine der Hauptvoraussetzungen für das erfolgreiche autonome Fahren sein.

Die nicht weniger wichtigen Aspekte und Herausforderungen der Entwicklung von hochkomplexen Radarsensoren mit speziellen Prototypen-Werkzeugen werden zum Abschluss diskutiert. Das konventionelle Entwickeln auf PC oder Laptop ist wegen der rechenintensiven und immer komplexer werdenden Algorithmen nur noch bedingt möglich. Ein

Ausblick des zukünftigen Zusammenspiels der für die Radarentwicklung grundlegenden Technologiedomänen und den Produktzyklen, die zeitlich sehr stark unterschiedlich sein können rundet den Vortrag ab.

Abstract

The transition towards fully automated driving is currently in deep discussion between the automotive industry and new emerging markets. Everything seems to be possible from a steady, evolutionary changeover up to a revolutionary and very abrupt switchover. New business models like car-sharing and changing customer needs will play an important role in the development of future automation levels.

This paper describes current status and future potential of vehicular radar systems with focus on new driving features and the thereof resulting ambitious specifications. Recently investigated new method like Micro-Doppler analysis are addressed and improvements in environmental perception are shown by evaluating object signature characteristics for road user classification (i.e. pedestrian, bicyclist, car or truck).

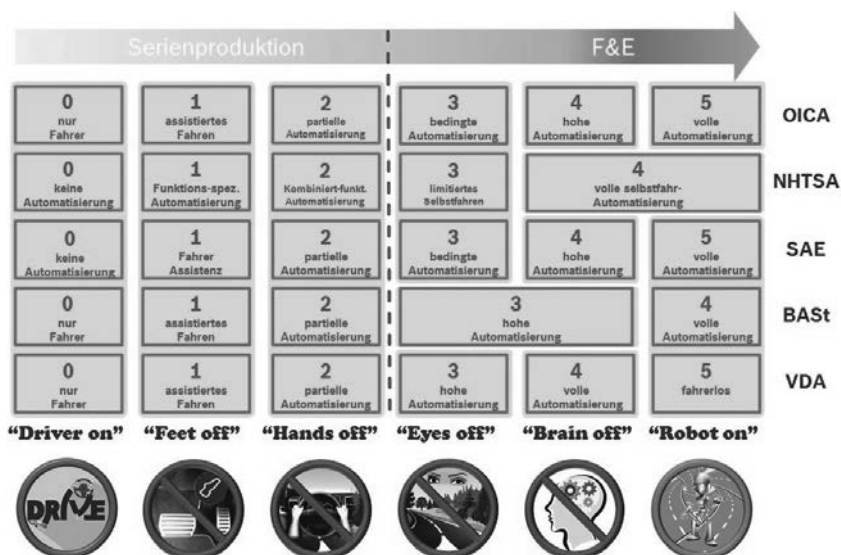
To reach this demanding goals new development concepts and prototyping tools are presented. This paper ends with a coarse forecast how long-lasting technology developments can be streamlined into the multi-generation production process.

1. Einleitung

Die erste funktionierende Ultraschall-Einparkhilfe wurde im Jahr 1982 in der Mittelklasselimousine Toyota Corona auf dem Heimatmarkt Japan unter der Bezeichnung Back Sonar zur Marktreife gebracht [1] und gilt als erstes aktives Fahrerassistenzsysteme mit rudimentärer Umfeld-Erkennung. 77 GHz Radarsensoren wurden erstmals 1999 unter dem Namen Distronic in der Mercedes Benz S-Klasse für die Funktion Abstandsregeltempomat [2] verbaut und eröffneten ein sich rasant entwickelndes Marktsegment im Automobilbereich, das in nicht zu ferner Zukunft in ein voll automatisiertes und unfallfreies Fahren münden wird.

Während das etablierte Sensortechnologie-Portfolio für die Umfelderkennung mit den vier Domänen Video, Radar, Lidar und Ultraschall noch sehr überschaubar ist, gestaltet sich sowohl die Anzahl der potentiellen Anbieter für automatisierte Fahrfunktionen als auch die verschiedenen Niveaus des automatisierten Fahrens noch unübersichtlich.

Erste Ansätze, die verschiedenen Ausprägungsstufen des automatisierten Fahrens besser einzuordnen, sind in Bild 1 dargestellt [3], [4], [5], [6], [7].



BAST: Bundesanstalt für Straßenwesen | F&E: Forschung und Entwicklung | NHTSA: National Highway Traffic Safety Administration | OICA: International Organization of Motor Vehicle Manufacturers | SAE: Society of Automotive Engineers | VDA: Verband der Automobilindustrie

Bild 1: Einteilung der Fahrautomatisierung in bis zu sechs verschiedene Stufen

Auch wenn die einzelnen Bezeichner und Stufen bei den verschiedenen Organisationen noch geringfügig variieren und eine weltweit standardisierte Klassifizierung noch aussteht, so

ist dennoch erkennbar, dass die aktuell im Markt existierenden Assistenzsysteme sich typisch in der Stufe zwei bis drei befinden und der Fahrer bei kritischen Ereignissen kurzfristig das automatisierte System übersteuern muss.

Wie sich der Übergang zum vollautomatisierten Fahren in der Zukunft weiterentwickeln wird ist noch offen und wird hauptsächlich durch die beiden konkurrierenden Lager, den etablierten Automobilherstellern und den hochinnovativen High-Tech und IT-Unternehmen wie Google, Apple, Baidu und Faraday Future, geprägt werden. Während die OEMs auf eine evolutionäre Weiterentwicklung von ADAS (Advanced Driver Assistance System) hin zum automatisierten Fahren setzen, versuchen sich die Internetfirmen im direkten, revolutionären Weg mit disruptiven Technologieansätzen.

Unabhängig wie sich die Zielerreichung des vollautomatisierten Fahrens gestalten wird sind seitens der Umfeldperzeption noch signifikante Anstrengungen notwendig, um die Herausforderungen bezüglich Objekterkennung und Situationsinterpretation erfolgreich zu meistern.

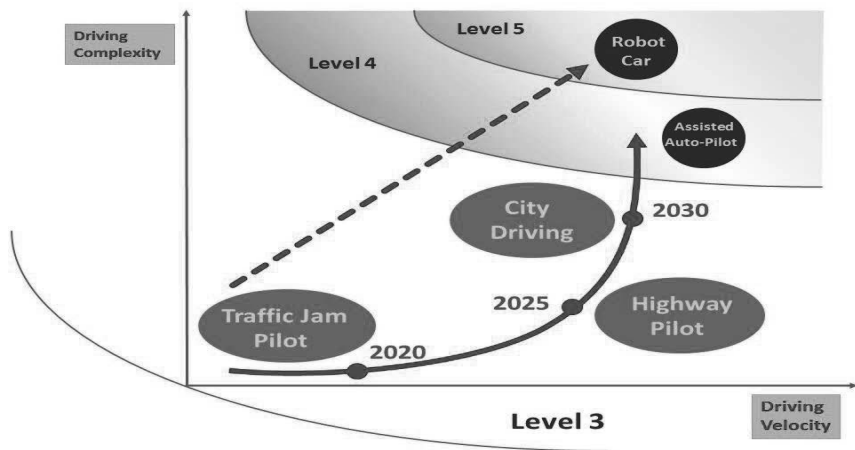


Bild 2: Migrationspfade zum automatisierten Fahren (revolutionär = gestrichelt, evolutionär = durchgezogen) [8]

In den folgenden Kapiteln werden diese Herausforderungen aus der Sicht von Automobilradaren eingehender adressiert.

2. State-of-the-Art: Radar-basierte Fahrerassistenzsysteme im Markt

Das Applikationsportfolio von 77 GHz Radarsensoren hat sich in den vergangenen 17 Jahren seit der Markteinführung von ACC Systemen beträchtlich erweitert. In Bild 3 sind bereits

im Markt eingeführte Fahrerassistenzsysteme, bei denen Radarsysteme zum Einsatz kommen, aufgelistet.



Bild 3: Radarbasierte Fahrerassistenzsysteme in Serienfahrzeugen

Viele dieser Applikationen verwenden entweder einen einzelnen Radarsensor oder einen Cluster aus mehreren Radaren, um den notwendigen Beobachtungsbereich erfassen zu können. Erste Fusionsansätze zwischen Radar und Videosensoren auf Objektebene führen entweder zu einer verbesserten Bereichsabdeckung (komplementäre Fusion) oder zu einer höheren Zuverlässigkeit und Robustheit des Gesamtsystems (redundantes Fusionskonzept), wie in Bild 4 dargestellt.

Mit zunehmendem Automatisierungsgrad wird sich der Schwerpunkt der Sensordatenfusion von komplementären hin zu redundanten Fusionskonzepten verschieben mit nachhaltigen Auswirkungen auf die einzelnen Sensortechnologien und deren Weiterentwicklung.

Alle Radarapplikationen in Bild 3 liefern als primäre Umgebungsinformation den Abstand (Radius und Winkel bzw. x- und y-Ablage) und die relative Geschwindigkeit (radial oder in x/y Komponenten) von den detektierten Objekten. Der Rückstreuquerschnitt (RCS – Radar Cross Section) und in jüngerer Zeit auch der Mikro-Doppler (siehe Kapitel 4.1) sind weitere Parameter, die zu einer verbesserten Interpretation des Verkehrsgeschehens führen.

Die laterale Objektseparation im Bereich von einigen Winkelgraden und der Beobachtungsbereich zwischen $\pm 20^\circ$ bis max. $\pm 45^\circ$ sind für automatisierte Fahrsituationen der Stufe 2 ausreichend, genügen den Anforderungen der höheren Automatisierungsstufen aber bei Weitem noch nicht.

Komplementäre Sensorfusion

Redundante Sensorfusion

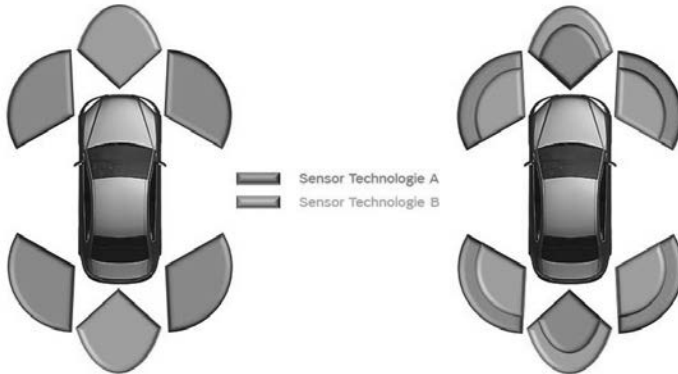


Bild 4: Komplementäres und redundantes Sensorfusionskonzept

Sowohl bei den Radarsensoren als auch bei Video-, Lidar- und Ultraschallsystemen sind für hochautomatisierte Fahrfunktionen noch erhebliche Weiterentwicklungen notwendig um die geforderte Perzeptionsleistung liefern zu können. Wie für die Radartechnik eine Entwicklungs-Roadmap mit den entsprechenden Migrationspfaden aussehen könnte, wird in den folgenden Kapiteln genauer beleuchtet.

3. Neue Anforderungen für hoch- und vollautomatisierte Fahrfunktionen

Die Anforderungen an die sich im Serieneinsatz befindenden Radarsysteme sind auf einfache kinematische Messaufgaben und rudimentäre Situations-Erkennung (z.B. unvermeidbare Kollisionsdetektion) zugeschnitten, was für direkte Fahrzeug-Regeleingriffe in Form von z.B. intelligenter Tempomat (ACC) oder Notbremsassistentz auch ausreichend ist. In gleicher Weise wird die Erkennung von Straßenlinien mit Videokameras zur Querverführung des Fahrzeugs herangezogen. Fehlen die Markierungslinien, dann versagt der Spurhalteassistent seinen Dienst ohne Rückfall-Lösung (fail-operational) oder durch Ersatz von anderen Alternativen zur Spurführung (Redundanz). Mit dem Übergang zum hoch- und vollautomatisierten Fahren nehmen auch die Anforderungen und Aufgaben an die Sensorsysteme zu, wie für den Radar in Bild 5 gezeigt.

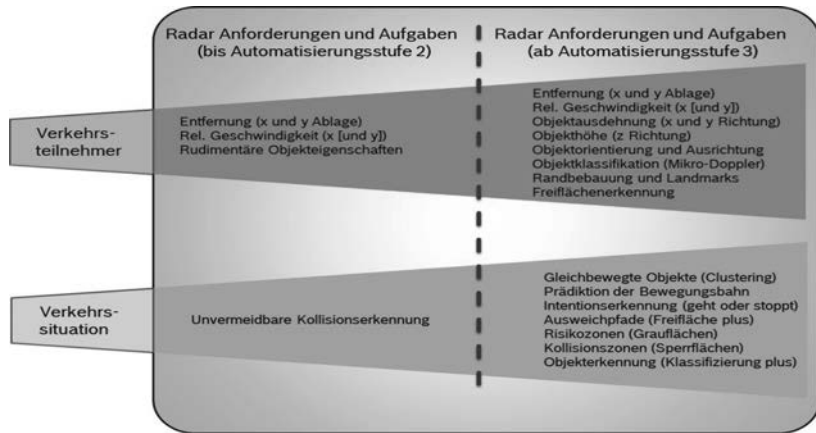


Bild 5: Radar Anforderungen für verschiedene Automatisierungsstufen

Analog zu den höheren Anforderungen an die Perzeptionsleistung wird auch aus der einfachen Fahrzeuglängs- bzw. querregelung ein hochkomplexes, mehrstufiges Entscheidungssystem, das in der Endausbaustufe des vollautomatisierten Fahrens mit jeder erdenklichen Verkehrssituation zurecht kommen wird. In Bild 6 ist die Grundstruktur des automatisierten Fahrens in seinem prinzipiellen Ablauf dargestellt.

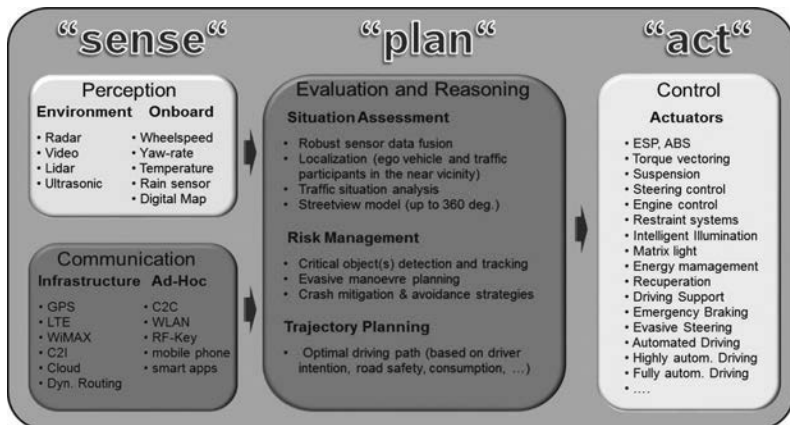


Bild 6: Strukturplan des automatisierten Fahrens [9]

Die mittlere Säule in Bild 6 ersetzt dabei die Expertise und den Erfahrungshorizont des Fahrers beim sicheren und unfallfreien Führen des Fahrzeugs und ist, wie der Mensch auch, auf eine fehlerfreie und detailgetreue Wiedergabe des Fahrzeugumfelds angewiesen. Zur Bewältigung der (unendlichen) Vielzahl an Verkehrssituationen werden aktuell moderne Formen des Maschinenlernens (Deep Learning) mit CNN (Convolutional Neural Network) verwendet, die auch bei der Radar-Signalverarbeitung [10] zum Einsatz kommen. Sind die Eingangsdaten aus der Perzeptions- und Kommunikationseinheit mangelhaft oder unvollständig, dann wird auch die beste Planungs- und Steuerungseinheit versagen. Ein Großteil der „normalen“ Fahraufgaben können die aktuellen Systeme in Form eines intelligenten Fahrassistenten bereits heute zu 100% übernehmen, solange noch ein Fahrer hinter dem Steuer sitzt und bei kritischen Situationen eingreifen kann. Obwohl die Zeitdauer dieser Eingriffsvorgänge verschwindend klein im Vergleich zur gesamten Fahrzeit ist, ist der Aufwand für den Ersatz des Menschen in seiner Funktion als „System-Überwacher“ extrem hoch und kompliziert. Dieser Effekt wird in Bild 7 anhand der wichtigsten Einflussfaktoren beschrieben.

Grad der Automatisierung*	Funktionsbeschreibung	Fahrerbeitrag zur Fahraufgabe	Redundanz der Perzeption	Ausfallsicherheit	Sicherheitsgrad
Stufe 0	keine Automatisierung	hoch	keine	Abschaltausfall (fail-silent)	QM
Stufe 1	Fahrer Assistenz	mittel-hoch	komplementär	Abschaltausfall (fail-silent)	ASIL A oder B
Stufe 2	teil-automatisch	mittel	kombiniert	ausfallsicher (fail-safe)	ASIL B
Stufe 3	bedingt-automatisch	mäßig	teil-überlappend	ausfallsicher (fail-safe)	ASIL C
Stufe 4	hoch-automatisch	selten	größtenteils-überlappend	ausfallsicher EF (fail-operational)	ASIL C oder D
Stufe 5	voll-automatisch	keine	voll-überlappend	ausfallsicher MF (fail operational)	ASIL D

* nach VDA/SAE QM: Qualitätsmanagement ASIL: Automotive safety Integrity Level EF: Einfachfehler MF: Mehrfachfehler

Bild 7: Wichtige Einflussfaktoren und Hürden hin zum vollautomatisierten Fahren

Die Auswirkungen und Konsequenzen dieser essentiellen Faktoren wie Redundanz, Ausfallsicherheit und ASIL Sicherheitsgrad werden bezüglich Aufwand und tatsächlichem Reifegrad oftmals unterschätzt und führen zu falschen Erwartungshaltungen, bis wann und in welcher Ausprägungsform das vollautomatisierte Fahren eingeführt werden kann [11] - [15].

Vollautomatisiertes Fahren nur bei schönem Wetter oder nur auf speziellen Fahrspuren mit der notwendigen Infrastruktur ist genauso unrealistisch wie der unmittelbare Wechsel auf nur

noch fahrerlose Fahrzeuge ohne eine (lange) Übergangszeit mit gemischtem fahrer- und fahrerlosem Betrieb. In Bild 8 sind die geschätzten Reifegrade der für das vollautonome

Reifegrad der FAD-Komponenten (Eigene Schätzwerte)

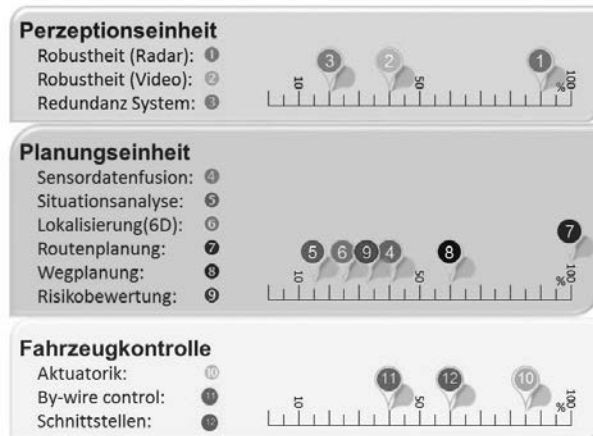


Bild 8: Abschätzung des Reifegrads für vollautomatisiertes Fahren (Bewertung nach Meinung der Autoren)

Fahren notwendigen Komponenten dargestellt. In Sachen Robustheit sind die Radarsysteme bereits sehr gut unterwegs, für eine effiziente Sensordatenfusion und realitätsnahen Situationsanalyse sind jedoch noch umfangreiche Verbesserungsmaßnahmen unabdingbar.

4. Innovationen und Zukunftspotenziale beim Automobilradar

Signifikante Leistungssteigerungen beim Automobilradar sind in den nächsten Jahren in zwei Domänen erkennbar, erstens – der noch besseren Ausnutzung des Mikro-Doppler Effekts, und zweitens – der massiven Auflösungssteigerung in allen drei Raumrichtungen.

4.1 Mikro-Doppler zur besseren Umfeldwahrnehmung und Szenarieninterpretation

In den letzten Jahren hat sich der Einsatz der hochauflösenden Mikro-Doppler Auswertung bei allen kommerziell verfügbaren Automobilradaren durch Einführung des schnellen Chirp-Sequence Verfahrens schlagartig durchgesetzt. Mit der dadurch möglich gewordenen Objektseparation sowohl im Entfernungs- als auch Geschwindigkeitsraum, die beide zusammen als Range-Doppler Matrix bezeichnet werden, wurde der Bereich der Klassifikation und Merkmalsextraktion erschlossen. Viele der aus der Bildverarbeitung bekannten Erkennungs-

algorithmen können mit geringfügigen Modifikationen auch auf die Signaturen der Range-Doppler Matrix angewandt werden. Damit ist, wie in Bild 9 ersichtlich, eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern möglich.

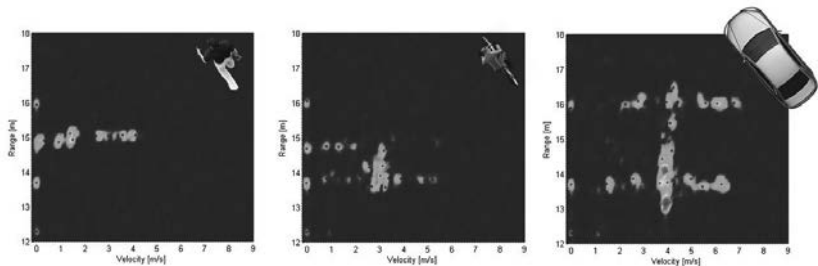


Bild 9: Range-Doppler Profile verschiedener Verkehrsteilnehmer

Durch zeitliche Analyse der Mikro-Doppler Signaturen über mehrere Messzyklen können die spezifischen Bewegungsmuster von Fußgängern oder Radfahrern erkannt und zur Objektklassifizierung verwendet werden [16], [17]. Bei optimaler Messauswertung mit einer FPGA-basierten Echtzeitplattform [18] sind hochaufgelöste, detailgetreue Range-Doppler Signaturen von Verkehrsobjekten erzielbar, die pro Objekt leicht über 100 Einzeldetektionen enthalten können, wie in Bild 10 zu sehen ist.

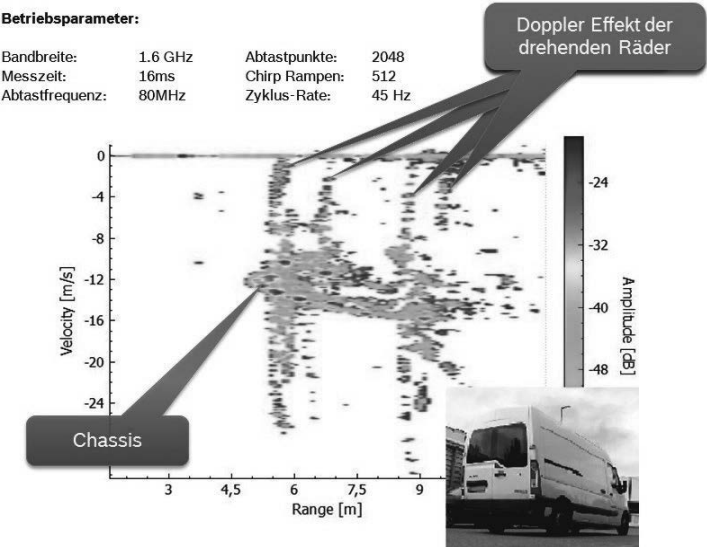


Bild 10: Range-Doppler Profile verschiedener Verkehrsteilnehmer

Durch das hohe Auflösungsvermögen im Geschwindigkeitsraum erleichtert sich die Bestimmung der Winkelablage im X-Y Koordinatensystem wesentlich, da sich die normalerweise in der gleichen Entfernungszelle befindenden Reflektionspunkte wieder trennen lassen.

4.1 Massive Auflösungssteigerung durch MIMO Antennenkonzepte

Die im Mobilfunk verwendeten MIMO (multiple input, multiple output) Antennenkonzepte fanden ebenfalls in den letzten Jahren ihre Verwendung im Automobilsektor, wobei die Beweggründe jedoch mehr in der Reduktion von Hardware und der verkleinerten Apertur durch Faltung der Empfangsantennen lagen. Das Grundprinzip von MIMO Antennen ist in Bild 11 gezeigt.

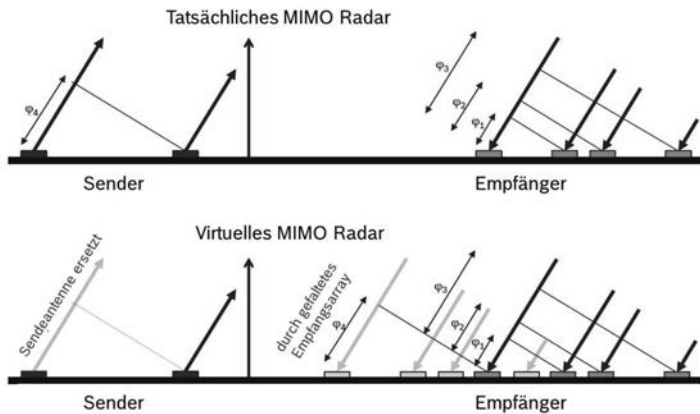


Bild 11: Grundprinzip von MIMO Antennen (Faltungsoperation im Empfangsbereich)

Mit der Anzahl der virtuellen Empfangsantennen steigt die Antennenapertur und damit auch das Auflösungsvermögen zwischen zwei Objekten (i.e. die Trennfähigkeit). Es ist daher wünschenswert, die Antennenapertur möglichst groß zu wählen und durch die Verwendung von vielen Sendeantennen den Hardwareaufwand auf der Empfangsseite niedrig zu halten. Der begrenzte Einbauraum im Fahrzeug limitiert per se die maximal mögliche Ausdehnung des MIMO Radars. Zudem treten unerwünschte Nebeneffekte auf, wie „Range Migration“ oder Doppler Phasenverschiebung, die die erwartete Granularität in Form eines bildgebenden Radars verschlechtern und nachfolgend kurz erläutert werden.

Das Abwandern von Objektdetektionen in benachbarte Zellen während der Entfernung-FFT aufgrund der bestehenden Dimensionen im Antennenarray (d.h. die Annahme einer Punkt-

quelle als Sender ist nicht mehr gültig) kann durch entsprechende Korrekturalgorithmen (z.B. Keystone Transformation [19]) wieder kompensiert werden.

Das Ansteuern der Sendeantennen kann nur sequentiell erfolgen, da sonst eine Zuordnung zu den einzelnen Sendeantennen im Empfangsraum nicht mehr möglich ist. Durch den zeitlichen Sendeversatz bildet sich bei bewegten Zielen eine zusätzliche Phasendrehung aus, die wieder eliminiert werden muss (sogenannte Motion Compensation). Auch hier sind verschiedene Korrekturverfahren bekannt [20], wobei die eleganteste, aber auch Hardware-intensivste Methode das Senden in unterschiedliche Frequenzbereiche (i.e. Frequenz-Multiplexing) ist (siehe hierzu auch die Radar Modulation-Roadmap in Bild 13).

In Bild 12 ist das „Radarbild“ einer Raumdecke, aufgenommen mit 15 (SIMO: 1TX/15 RX) und 120 (8TX/15 RX) virtuellen Empfangskanälen, dargestellt.

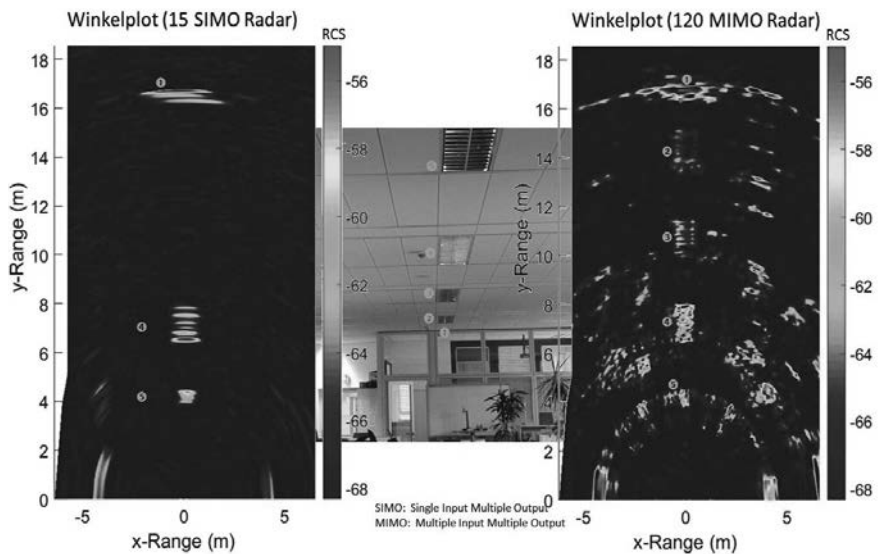


Bild 12: Bildgebendes Radar mit 120 virtuellen MIMO Empfangskanälen

5. Migrationspfade und Technologie-Roadmaps

Eine Verbesserung und Leistungssteigerung bei den Automobilradaren wird sich sehr stark an der Weiterentwicklung von relevanten Kerntechnologien orientieren, die erst den Zugriff auf neue, technisch verfügbaren und marktwirtschaftlich bezahlbaren Basiskomponenten ermöglicht.

In Bild 13 ist die Evolution der verwendeten Radar-Modulationsverfahren über der Zeit dargestellt.

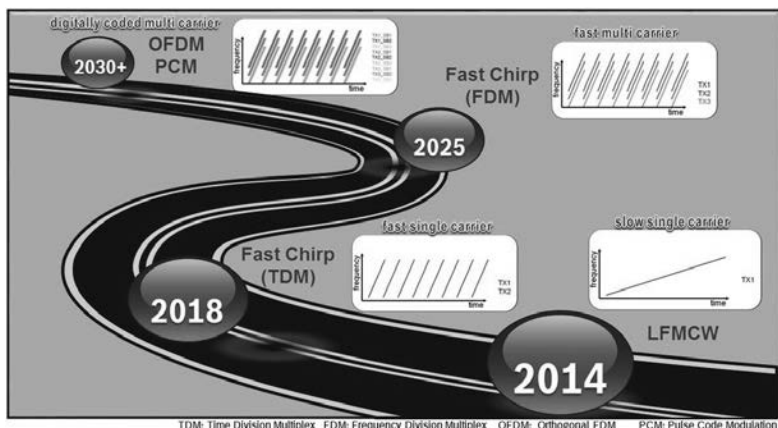


Bild 13: Roadmap der Radar Modulationsverfahren

Die Jahreszahlen für den Übergang zur nächsten Modulationsart dienen nur zur groben zeitlichen Orientierung und werden vom Reifegrad anderer Technologiedomänen beeinflusst und gesteuert.

Eine in dieser Hinsicht entscheidende Technologiedomäne zur Fertigung von MMICs in den verschiedenen nm-Knoten ist in Bild 14 gezeigt.

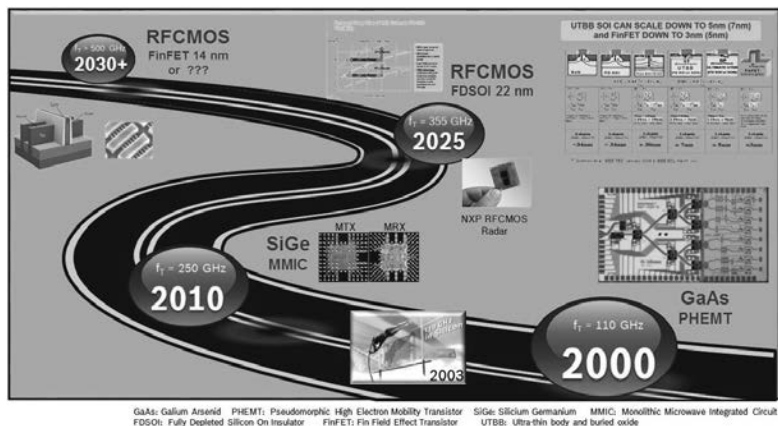


Bild 14: Roadmap der Radar MMICs (Monolithic Microwave Integrated Circuit)

Erst wenn die für den FDM bzw. OFDM/PCM notwendigen „Betriebs“-Komponenten in den jeweiligen MMIC Technologieknoten realisiert worden sind, ist ein Übergang zur nächsten Modulationsart möglich.

6. Ausblick - Neue Entwicklungsmethoden für hochauflösende Radarsysteme

Zur Bewältigung der steigenden Komplexität und der riesigen Datenmengen reichen die konventionellen Entwicklungsmethoden (z.B. nur PC-basiert) bei Weitem nicht mehr aus. Der Einsatz von entsprechenden Hardware-Beschleunigern in Form von FPGAs oder ASIC-Bausteinen der Vorgänger-Produktgeneration, wie in Bild 15 angedeutet, wird sich bei der zukünftigen Produktentwicklung immer mehr durchsetzen. Damit die Entwicklungszeit nicht zu sehr von den Technologiereifezyklen abhängt, werden deren Innovationen nur bei rechtzeitiger Verfügbarkeit, wie in Bild 16 gezeigt, in die aktuellen Produkte einfließen.

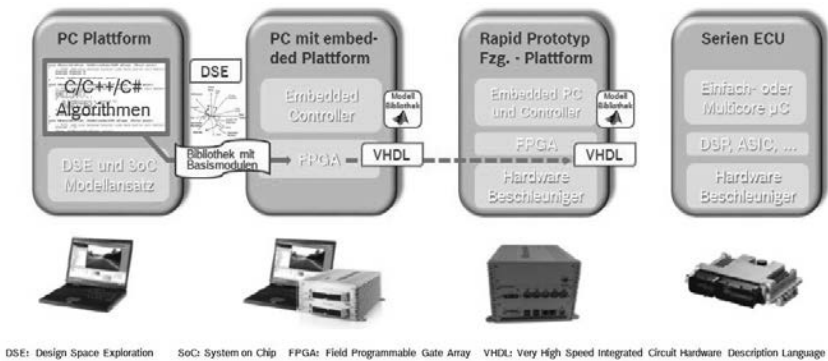


Bild 15: Zukünftiger Entwicklungsprozess für komplexe Fahrerassistenzsysteme [21]

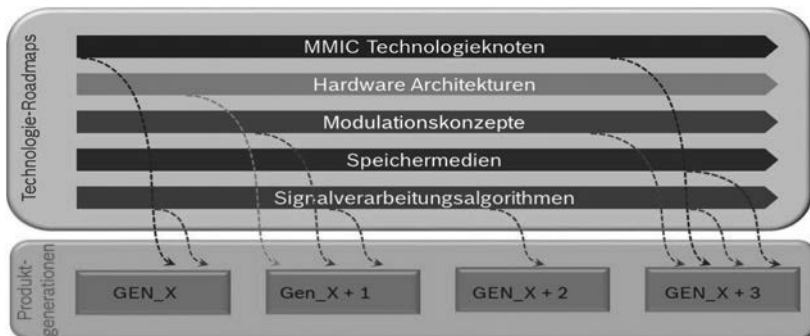


Bild 16: Übernahme von Technologiesprüngen im Produktentwicklungszyklus

Danksagung:

Diese Arbeiten wurden von der EU im Verbundprojekt PROSPECT (Grant: 634149) gefördert.

Literaturverzeichnis:

- [1] Auto, Motor & Sport, Heft 11/1982, Seite 62 - "Nachrichten - Das Neueste aus der Technik"
- [2] David und die Goliaths, Automobil-Entwicklung, Januar 1999
url: <http://www.neue-verpackung.de/ai/resources/09530d02ae4.pdf>
- [3] OICA, Def. for Levels of Automation, Informal document No. WP.29-162-20, 3/2014
- [4] NHTSA Levels of Automation, U.S. DOT press release on May 30, 2013
- [5] New SAE international standard J3016 on automated driving
- [6] URL: <http://www.bast.de/DE/Publikationen/Foko/Downloads/2012-11.pdf>
- [7] URL: <http://www.vda.de/dam/vda/publications/2015/automatisierung.pdf>
- [8] Demand Side Requirements for Autonomous Vehicles, B. Müller, EPoSS 2015
- [9] DESERVE EU Projekt GA. Nr. 295364 – Deliverable D22.1, Seite 12-Figur 1
- [10] J. Dickmann, Development needs on radar for autonomous Driving, IEEE Radar Conference, Philadelphia, United States, 2 - 6 May 2016

- [11] URL: <http://www.valuewalk.com/2015/05/self-driving-cars-2017/>
- [12] URL: <http://tech.firstpost.com/news-analysis/chinas-baidu-to-launch-self-driving-car-later-this-year-report-270195.html>
- [13] URL: <http://www.digitaltrends.com/cars/apple-targeting-2019-for-electric-car-launch/>
- [14] URL: <http://www.car-it.com/mehrheit-erwartet-autonome-autos-bis-2030/id-0043916>
- [15] URL: <http://www.entrepreneur.com/article/253468>
- [16] E. Schubert, F. Meinl, M. Kunert, W. Menzel: High Resolution Automotive Radar Measurements of Vulnerable Road User – Pedestrians & Cyclists, International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility(ICMIM), 27 bis 29 April 2015, Karlsruhe/Deutschland
- [17] E. Schubert, F. Meinl, M. Kunert, W. Menzel: Clustering of High Resolution Automotive Radar Detections and Subsequent Feature Extraction for Classification of Road Users, 16th International Radar Symposium (IRS) , 24 bis 26 Juni 2015, Dresden/Deutschland
- [18] F. Meinl, E. Schubert, M. Kunert, H. Blume: Realtime FPGA-based Processing Unit for a High-Resolution Automotive MIMO Radar Platform, EuMW2015 – European Microwave Week 2015, 9 bis 11 September 2015, Paris/Frankreich
- [19] S. Zhaoqiang: Research on application of Keystone transform in radar, Synthetic Aperture Radar, 2009 - APSAR 2009 2nd Asian-Pacific Conference
- [20] C. Schmid, R. Feger, C. Pfeffer, A. Stelzer: Motion compensation and efficient array design for TDMA FMCW MIMO radar systems, 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 26-30 March 2012
- [21] DESERVE EU Projekt GA. Nr. 295364 – Deliverable D25.8 – The DESERVE Platform

Semantische Netze als Wissensbasis automatisierter Fahrzeuge

Stephan Lapoehn, Paulin Pekezou Fouopi, Christian Löper, Sascha Knake-Langhorst, Tobias Hesse,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,
Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig

Kurzfassung

Situationsverständnis ist eine Grundvoraussetzung, um im Straßenverkehr kollisionsfreie, komfortable und regelkonforme Fahrmanöver durchführen zu können. Ein Fahrer interpretiert permanent, wie die wahrgenommenen Objekte im aktuellen Geschehen zusammenwirken, welche Eigenschaften und Handlungsspielräume diese haben und in naher Zukunft haben werden. Die Interpretation ist dabei maßgeblich vom Vorwissen des Fahrers abhängig. Auf Basis der Situationsinterpretation und seinen aktuellen Zielen trifft der Fahrer Entscheidungen über das folgende Fahrmanöver. Um das Fahren in höheren Automatisierungsgraden ermöglichen zu können, müssen Automationssysteme ebenfalls, analog dem menschlichen Vorbild, vorrausschauend fahren können und situationsabhängig relevantes Vorwissen in die Entscheidungsfindung einbeziehen. In dieser Arbeit wird ein Konzept vorgestellt, in dem das nötige Vorwissen zur Interpretation einer Situation, zur Manöverplanung und der Ansteuerung des Mensch-Maschine Interface in einer Wissensbasis in Form einer Ontologie modelliert und das Funktionsverhalten über prädikatenlogische Regeln gesteuert wird. Zur Abbildung von unsicherem Wissen werden die Konzepte der Ontologie mit *Markov Logic Networks* verknüpft. Die Umsetzung des Konzepts wurde in einer Simulation einer urbanen Verkehrssituation, in der Vorwissen über das Verhalten von Passanten notwendig ist, evaluiert.

1. Einleitung

Im städtischen Umfeld gestaltet sich die Implementierung höherer Automationsstufen schwierig und bleibt auch in der kommenden Dekade ein Forschungsschwerpunkt, da nicht nur eine komplexe Objekterkennung (Fußgänger, Radfahrer, Gegenverkehr, etc.) notwendig ist, sondern auch Wissen über Zusammenhänge zwischen den Einzelobjekten in einer Verkehrssituation und den daraus abzuleitenden Entscheidungen für die Manöverauswahl. In der in Bild 1 gezeigten Situation kann ein menschlicher Fahrer anhand seiner Erfahrung antizipieren, dass eine Person aus der Sichtverdeckung auf die Straße treten könnte und würde daher besonders langsam fahren. Dieser vorsichtige Ansatz des menschlichen Fahrers re-

duziert den notwendigen Bremsweg falls kurz vor Erreichen der Sichtverdeckung eine Person auf die Straße tritt und erhöht somit die Wahrscheinlichkeit, dass das Fahrzeug in diesem Fall rechtzeitig zum Stehen kommt. Durch fehlendes a priori-Wissen würde ein reaktiver Softwareagent in dieser Situation lediglich die Kollisionswahrscheinlichkeit mit dem Ball berechnen und, falls notwendig, seine Geschwindigkeit anpassen, sodass eine Kollision mit dem Ball vermieden wird. Tritt dann plötzlich eine Person auf die Straße würde der Softwareagent auch erst in diesem Moment eine Notbremsung auslösen, durch die ggf. eine Kollision mit der Person nicht mehr vermieden werden kann.



Bild 1: Nutzung von Vorwissen (auf Ball folgt Kind) im Straßenverkehr

Um das a priori-Wissen für solche Situationen abbilden zu können wird in dem hier gezeigten Ansatz eine Ontologie erstellt und mit logischen Regeln sowie *Markov Logic Networks (MLN)* verknüpft. Auf Grundlage der MLN-basierten Situationsinterpretation entscheidet ein Manöverplaner über das auszuführende Manöver. Es wird darüber hinaus gezeigt wie dieser Ansatz zur situations- und automationsangepassten Ansteuerung des Mensch-Maschine Interface (MMI) im Fahrzeug verwendet werden kann. Durch diesen Ansatz soll die Komplexität der Systeme reduziert werden, sodass eine Adaption durch die Erweiterung der Regelbasis möglich ist und nicht den Eingriff in die Prozeduren der Systemmodule bedingt.

Im folgenden Kapitel werden zunächst die technologischen Grundlagen eingeführt. Das dritte Kapitel umfasst den Stand der Technik. Im vierten Kapitel folgt die Beschreibung der Simulation. Kapitel fünf zeigt das Konzept der Arbeit. Darauf folgen die Auswertung sowie ein Ausblick auf künftige Themen.

2. Technologische Grundlagen

Um Begriffe innerhalb einer Domäne (bspw. dem Straßenverkehr), strukturiert zu beschreiben kann eine Faktenbasis in Form einer Ontologie erstellt werden. In einer Ontologie, als Unterart eines semantischen Netzes, wird über eine Taxonomie und partonomische Relationen ein Repräsentationsvokabular erstellt, welches zur Kommunikation zwischen Automaten und/oder Menschen genutzt werden kann [1]. Dieses Vokabular stellt das Expertenwissen über die Domäne dar und soll somit bei der langfristigen Entwicklung von Technologien als Referenz dienen. Ontologien haben in den letzten Jahrzehnten in diversen Bereichen Anwendung gefunden, beispielsweise in der Medizin (SNOMED CT [2]) oder in der Raumfahrt (SWEET [3]). Die zur Situationserfassung, Manöverplanung und MMI-Ansteuerung notwendigen Konzepte werden in dieser Arbeit in einer Ontologie definiert und den Funktionsmodulen als einheitliches Vokabular zur Verfügung gestellt. Dabei werden zwei Regelsysteme verwendet. Für die Situationserfassung werden Regeln über *Markov Logic Networks* ausgewertet da hier über unsicheres Wissen geschlossen werden muss. Für die Manöverplanung und MMI-Ansteuerung werden Regeln in Form der *Semantic Web Rule Language* (SWRL) genutzt. Eine Übersicht über diese Technologien bietet dieses Kapitel.

2.1 Web Ontology Language

Die *Web Ontology Language* (OWL) 2 ist eine formale Beschreibungssprache für Ontologien die 2009 vom *World Wide Web Consortium* (W3C) veröffentlicht wurde [4]. OWL 2 lässt sich auf die Beschreibungslogik *SROIQ* abbilden, welche ein entscheidbares Fragment der Prädikatenlogik erster Ordnung ist¹. In einer Beschreibungslogik wird das Wissen über eine Domäne in die TBox, das terminologische Wissen, und in die ABox, das assertionale Wissen, unterteilt². In der TBox werden Konzepte über die Taxonomie und Partonomie definiert. Beispielsweise kann in der TBox definiert werden, dass eine Lichtsignalanlage ein Infrastrukturelement ist welches genau drei Lichtsignale ausgeben kann, deren Farben ausschließlich rot, gelb und grün sind und für mindestens einen Fahrstreifen gelten (vgl. Formel (1).

¹ Der Sprachumfang einer Beschreibungslogik wird über die Buchstaben im Namen definiert. So steht das *i* in *SROIQ* für die Möglichkeit inverse Rollen zu definieren (*fasterThan* = *slowerThan*⁻)

² Gelegentlich wird die RBox in der Literatur genannt und dient der weiteren Unterteilung der Axiome, um Rollen und deren Eigenschaften zu beschreiben.

$$\begin{aligned}
& \text{TrafficLight} \sqsubseteq \text{Infrastructure} \sqcap \leq 3\text{hasLight}.T \sqcap \geq 3\text{hasLight}.T \sqcap \\
& \forall \text{hasLight}.(\text{red or yellow or green}) \sqcap \exists \text{isReferringToLane}.Lane \sqcap \\
& \exists \text{hasStatus}.(\text{red or yellow or green})
\end{aligned} \tag{1}$$

Die ABox enthält Individuen, der in der TBox beschriebenen Konzepte. Beispielsweise wären alle an einer bestimmten Kreuzung vorhandenen Lichtsignalanlagen Individuen des Konzepts der Lichtsignalanlage, die jeweils unterschiedliche Ausprägungen ihrer Rollen besitzen (aktuelle Signalfarbe, Bezugsfahstreifen, etc.).

2.2 Semantic Web Rule Language

Für die Umsetzung eines „intelligent“ agierenden Systems wird zusätzlich die Fähigkeit benötigt aus dem vorhandenen Wissen und logischen Regeln auf neues Wissen deduktiv zu schließen. SWRL bietet eine Horn-Klausel ähnliche Syntax und kann mit OWL kombiniert werden [5]. Ein einfaches Beispiel für die Syntax findet sich in der Formel (2). Dabei ist linkerhand des Implikationsymbols (\rightarrow) die Prämisse, rechts die Konklusion zu finden.

$$\begin{aligned}
& \text{Vehicle}(\text{? } v) \wedge \text{Lane}(\text{? } ln) \wedge \text{TrafficLight}(\text{? } tl) \wedge \text{isOnLane}(\text{? } v, \text{? } ln) \wedge \\
& \text{isReferringToLane}(\text{? } tl, \text{? } ln) \wedge \text{hasStatus}(\text{? } tl, \text{red}) \rightarrow \text{stopInFrontOf}(\text{? } v, \text{? } tl)
\end{aligned} \tag{2}$$

2.3 Markov Logic Networks

Markov Logic Networks (MLN), in [6] eingeführt, sind eine Kombination von graphischen Modellen und Konzepten der Wahrscheinlichkeitstheorie. Knoten werden durch Zufallsvariablen repräsentiert. Kanten beschreiben probabilistische Abhängigkeiten zwischen diesen Zufallsvariablen. Damit sind diese Modelle zur Modellierung von Vorwissen mit Unsicherheiten gut geeignet. MLN kombinieren Regeln in Form der Prädikatenlogik erster Ordnung mit Wahrscheinlichkeiten. Die Prädikate in den Regeln können aus den Konzepten einer Ontologie generiert werden.

Ein MLN ist durch die endliche Tupelmengemenge $L = \{(F_i, w_i)\}, i = 1, \dots, n; n \in \mathbb{N}$ definiert, wobei F_i eine Formel in der Form prädikatenlogischer Aussagen und $w_i \in \mathbb{R}$ die Gewichtung dieser Formel ist. Je größer die Gewichtung einer Formel ist, desto wahrscheinlicher bzw. sicherer ist die Erfüllung dieser Formel. Formeln mit unendlichen Gewichtungen werden deshalb sichere Formeln genannt. Die Gewichtungen werden Anhand von Trainingsdaten gelernt. Werden alle Variablen in L durch die endliche Menge logischer Konstanten $C = \{C_i\}, i = 1, \dots, m; m \in \mathbb{N}$ ersetzt, wird das Markov-Netz $M_{L,C}$ wie folgt definiert [6]:

1. $M_{L,C}$ enthält einen binären Knoten für jedes Grundatom aus der endlichen Grundatommenge $X = \{X_i\}, i = 1, \dots, m; X_i \in \{0,1\}$ aller Prädikate von L . Das Grundatom X_i ist eine binäre Zufallsvariable mit dem Wertebereich $\{0,1\}$. $X_i = 0$ bedeutet, dass das Grundatom X_i falsch ist. $X_i = 1$ bedeutet, dass das Grundatom X_i wahr ist.
2. $M_{L,C}$ enthält ein binäres Feature für jede Grundinstanz aus der endlichen Grundinstanzmenge $G = \{G_i = f_i(x)\}, i = 1, \dots, p; x \in X, f_i(x) \in \{0,1\}, p \in \mathbb{N}$ aller Formeln F von L . Das Feature $f_i(x)$ nimmt den Wert 0 an, wenn die Grundinstanz G_i für das gegebene $x \in X$ falsch ist und 1 sonst. Die Gewichtung w_i des Feature f_i ist die Gewichtung der entsprechenden Formel F_i .
3. $M_{L,C}$ enthält eine Kante zwischen zwei Knoten, wenn die entsprechenden Grundatome in mindestens einer Grundinstanz vorhanden sind.

Ein MLN kann als ein Template betrachtet werden, womit ein Grund-Markov-Netz für gegebene logische Konstanten aufgebaut wird. Die Wahrscheinlichkeit einer möglichen Welt der Grundatome ist durch Gleichung (3) gegeben, wobei Z der Normalisierungsfaktor ist. Diese Wahrscheinlichkeit sowie den Zustand der Grundatome (Knoten) können anhand von Inferenzalgorithmen für probabilistische graphische Modelle (z.B. „Belief Propagation“ oder „Simulated annealing“) geschätzt werden [6].

$$P(X = x) = \frac{1}{Z} \exp \left(\sum_{i=1}^p w_i f_i(x) \right) \quad (3)$$

3. Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik zur wissensbasierten Situationserfassung und Manöverplanung im Hinblick auf das Gesamtsystem gesondert betrachtet, da sich der Fokus dieser Systemaspekte technologisch unterscheidet.

3.1 Situationserfassung

Wissensbasierte Verfahren zur Situationserfassung verwenden Kontextinformationen über Objekte und Situationen wie z.B. die Existenzwahrscheinlichkeit, die Position und Objektgröße um die Situation holistisch zu modellieren und zu interpretieren [7]. Die Modellierung dieser Kontextinformationen zur Objektklassifikation in einer Ontologie wurde in [8, 9] vorgeschlagen und mit logischen Regeln ergänzt. MLN wurden anhand dieser Regeln gelernt und verwendet, um gegebene Bildregionen zu klassifizieren. In [10, 11] wurden semantische Beziehungen zwischen Objekten wie z.B. die Fahrstreifenzugehörigkeit, die relative Position und die Verkehrsregeln mit einer Ontologie und logischen Regeln modelliert, um die Situati-

on an einer Kreuzung zu analysieren. Die Konzepte aus diesen Arbeiten wurden für die hier vorgestellte Anwendung adaptiert und vereinfacht, um eine echtzeitfähige Situationsinterpretation zu ermöglichen.

3.2 Manöverplanung

Die Modellierung von Manövern in Ontologien fand in der Literatur bisher wenig Beachtung. Manöverbeschreibungen außerhalb von Ontologien lassen sich jedoch bereits unter anderem in [12, 13] finden. Diese wurden großteilig nachmodelliert. In [14] wurde das Fahrer-Modell mit dem Kontext-Modell in einer Ontologie zusammenführt, um eine erweiterte Datenbasis für intelligente Systeme und adaptive Mensch-Maschine Interfaces im Fahrzeug zur Verfügung zu stellen. Konzepte aus diesem Ansatz (Manöver, Fahrzeug- und Event-Beschreibungen) wurden für den Automationskontext adaptiert und in die Fahrzeugautomation eingebunden.

4. Simulation



Bild 3: Betrachtete Verkehrssituation in der Simulation



Bild 2: Links – Information über Bremsung; Rechts - Notbremsung bei Detektion des Kindes

Das in Kapitel 1 beschriebene Szenario wurde in die Simulation überführt, um das Gesamtsystem zu evaluieren. Bild 3 zeigt drei Schlüsselszenen der Simulation. Die Automation muss bei der Erkennung des Balls abbremsen, um in der letzten Szene eine Notbremsung einleiten zu können, die das Fahrzeug vor dem Passanten zum Stillstand bringt. Die Objektdaten wurden aus der Simulation heraus generiert, wobei die Sichtverdeckung durch das am

Seitenrand parkende Fahrzeug über ein Raytracing-Verfahren berücksichtigt wurde. Das MMI bestand aus einer digitalen Nachbildung des Fahrzeugkombiinstrument, das parallel zur Simulation auf einem zweiten Bildschirm ausgegeben wurde (siehe Bild 2). Die Anzeige links zeigt eine Information über eine mögliche Kollision als Auslöser für eine Geschwindigkeitsreduktion. Die rechte Anzeige zeigt die Notbremsung.

5. Konzept

Bild 4 zeigt eine Übersicht des aufgebauten Systems. Zur Modellierung der Wissensbasis wurde eine Ontologie in der Beschreibungssprache OWL 2, eine Regelbasis in SWRL und ein trainiertes *Markov Logic Network* verwendet.

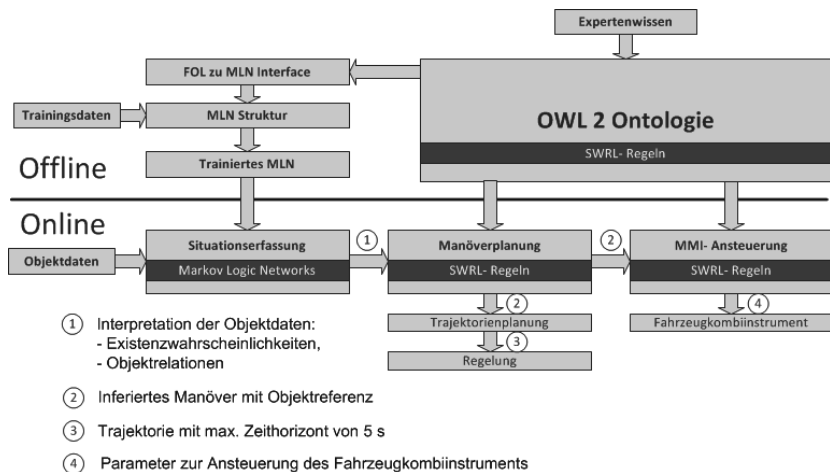


Bild 4: Zusammenspiel der Einzelkomponenten in der wissensbasierten Fahrzeugautomation

Die **Ontologie** umfasst die Beschreibung der drei Domänen Situationserfassung, Manöverplanung und MMI. Die Ontologie wurde anhand von **Expertenwissen** erstellt. Regeln ohne Unsicherheiten, die für die Manöverplanung und MMI-Ansteuerung genutzt wurden, konnten mit SWRL direkt in der Ontologie hinterlegt werden. Für das Lernen der MLN-Struktur wurde ein **First Order Logic (FOL) zu MLN – Interface** entwickelt, welches die Erstellung der Regeln aus den Konzepten und Rollen der Ontologie unterstützt. Die aus den Regeln resultierende MLN-Struktur wurde mit **Trainingsdaten** kombiniert, um die Gewichtungen zu lernen. Die Modellierung der Ontologie, der Regelbasis sowie das Lernen der MLN erfolgten offline. Zur Laufzeit wurden im Situationserfassungsmodul die Wahrscheinlichkeiten der Regeln die

eine Situation beschreiben, abhängig von den eingehenden **Objektdaten**, inferiert. Die resultierende Interpretation wird von dem **Manöverplaner** zur Laufzeit in die Ontologie eingespeist. Über die SWRL Regeln und in der Ontologie definierten Konzept- und Rollen-Definitionen wird das auszuführende Manöver inferiert (2). Auf Basis der Manöverwahl wird die passende **Trajektorie** berechnet (3) und von dem **Regler** umgesetzt. Das Modul zur **MMI-Ansteuerung** inferiert parallel auf Basis des Manövers, wie das **Fahrzeugkombi-instrument** angesteuert werden muss (4).

5.1 Ontologie Design

In Anlehnung an die Arbeit von Bohlken sind alle Konzepte der Ontologie Hyponyme *konzeptueller* oder *physikalischer Objekte* [15]. *Konzeptuelle Objekte* beschreiben domänenabhängige Konzepte die keiner physikalischen Repräsentation in der realen Welt entsprechen (Events, Definitionen). *Physikalische Objekte* beschreiben Objekte, die in einer realen Szene auftreten können (bspw. Infrastrukturkomponenten und Personen). Diese Konzepte sind allgemeingültig und domänenunabhängig (Auszug siehe Bild 5). Konzepte der drei Domänen Situationserfassung, MMI und Automation wurden in die *physikalischen* und *konzeptuellen Objekte* eingegliedert.

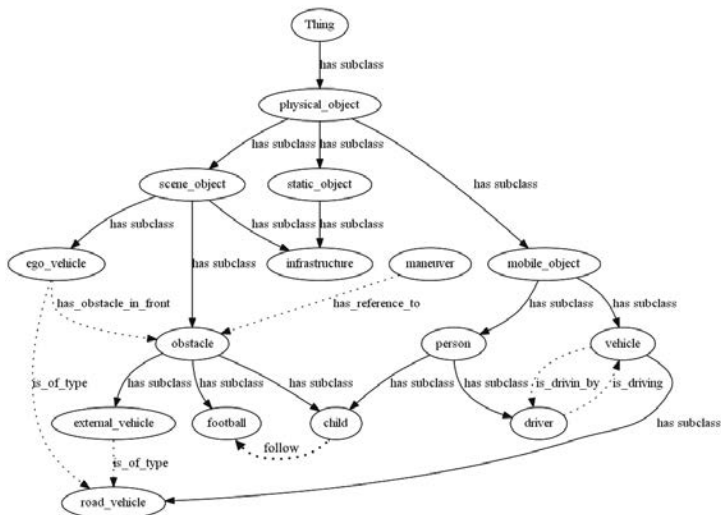


Bild 5: Auszug aus der Beschreibung der physikalischen Objekte.

5.2 Situationserfassung

Die Verhaltensprädiktion hat in dieser Arbeit die Aufgabe zu erkennen, dass ein Kind sehr wahrscheinlich einem Ball folgen wird (hier „Kind folgt Ball“ genannt). Dafür wurden die in [8, 9] beschriebenen wissensbasierten Ansätze übernommen und die Wissensbasis vereinfacht, um die Echtzeitanforderungen zu erfüllen. *Physikalische Objekte*, die für die o.g. Verhaltensprädiktion benötigt wurden, sind in Bild 5 in dem Knoten *scene_object* enthalten. Die Relationen zwischen den für die Verhaltensprädiktion relevanten Objekten $C = \{football, child, hallucinated_object\}$ wird durch das zweistellige Prädikat $follow(c_1, c_2), c_1 \in C, c_2 \in C$ beschrieben, wobei das Prädikat wahr ist, wenn das Objekt c_1 dem Objekt c_2 folgt. *hallucinated_object* ist ein *konzeptuelles Objekt* und findet sich somit nicht unter *scene_object*. Da die Verhaltensprädiktion Unsicherheiten beinhaltet, wurden die Regeln unter Anwendung der Konzepte der Ontologie erstellt und die Wahrscheinlichkeiten gelernt. Die Regeln in Tabelle 1 modellieren die Situation, dass ein Kind einem Ball folgt.

Tabelle 1: Ausschnitt des MLN zur Prädiktion der Situation "Kind folgt Ball".

Gewichtung	Regeln
2,04051	$\forall x_1 \forall x_2 (football(x_1) \wedge hallucinated_object(x_2) \rightarrow child(x_2))$
3,0512	$\forall y_1 \forall y_2 (child(y_1) \wedge football(y_2) \rightarrow follow(y_1, y_2))$

In boolescher Logik würde ein Kind entweder immer oder nie dem Ball folgen. Deshalb wurden die Formeln mit Trainingsdaten kombiniert, um die Gewichtungen zu lernen. Die Gewichtungen haben die Bedeutung, dass die Existenz eines Kindes halluziniert werden soll, sobald ein Ball sichtbar ist (vgl. Tabelle 1). Darüber hinaus wird das (halluzinierte) Kind sehr wahrscheinlich dem Ball folgen. Das zu dieser Tabelle passende Grund-Markov-Netz stellt die Bild 6 dar. Zur Laufzeit wurden die klassifizierten Objekte (football, child) dem gelernten MLN zur Verhaltensprädiktion übergeben. Wurde ein Ball erkannt, wurde über die Existenz eines Kindes halluziniert, das dem Ball folgen wird. Wurde zu dem Ball auch ein Kind erkannt, wurde mit einer hohen Wahrscheinlichkeit inferiert, dass das Kind dem Ball folgen würde.

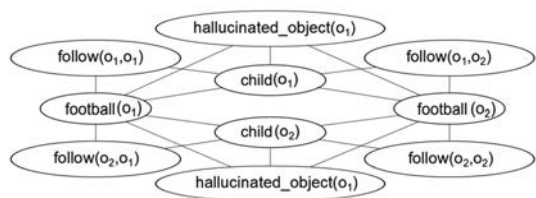


Bild 6: Grund-Markov-Netz des MLN aus der Tabelle 1 für die Konstanten $\{o_1, o_2\}$

5.3 Manöverplanung

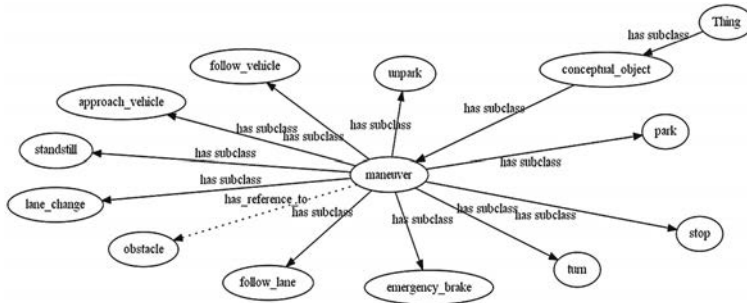


Bild 7: Taxonomie der konzeptuellen Objekte für die Domäne Manöverplanung.

Donges [16] unterteilt in dem 3-Ebenen-Modell die Fahraufgabe in die Ebenen Navigation, Führung und Stabilisierung. Dieses Modell wurde in der Arbeit von Löper et. al [17] weiter modularisiert und die Führungsebene in die Manöver- und die Trajektorienplanungsebene unterteilt. Manöver beschreiben auf natursprachlicher Ebene zeitlich und räumlich zusammenhängende Gruppen von Fahrzeugbewegungen im Kontext einer Verkehrssituation („Überholen“, „Stoppen“, „Notbremsung“, etc.). Innerhalb der *konzeptuellen Objekte* finden sich die Manöverdefinitionen (Bild 7). Manöver können mit Referenzen auf Hindernisse versehen werden (Bsp.: Manöver „Fahrzeug folgen“ benötigt ein Fahrzeug als Referenz). Für die Manöverauswahl wurden SWRL-Regeln definiert. Formel (4) zeigt eine Regel für das Stop-Manöver (Komfortables Abbremsen vor einem Objekt bis in den Stillstand). In der Prämisse beschreibt *o* das Hindernis, *cp* die Kollisionswahrscheinlichkeit, *ep* die Existenzwahrscheinlichkeit des verdeckten Kindes und *caa* die Negativbeschleunigung die notwendig wäre, um vor dem Kind zu halten. In der Konklusion steht *m* für zu klassifizierende Manöver und *v* für das Fahrzeug. Die Regel für die Notbremsung unterscheidet sich von Formel (4) ausschließlich in den numerischen Werten in der Prämisse und dem Nothaltekonzept in der Konklusion. Da die Wahrscheinlichkeiten mit Sichtung des Kindes steigt, wird erst das Stop-Manöver ausgeführt und, falls nötig, bei Sichtung die Notbremsung eingeleitet.

$$\begin{aligned}
 & has_collision_probability(?o, ?cp) \wedge greaterThan(?cp, 0.5) \wedge \\
 & has_existence_probability(?o, ?ep) \wedge greaterThan(?ep, 0.5) \wedge \\
 & has_collision_avoidance_acceleration(?o, ?caa) \wedge is_between(?caa, -1, -6) \rightarrow \\
 & stop(?m) \wedge is_driving_maneuver(?v, ?m) \wedge has_reference_to(?m, ?o)
 \end{aligned} \quad (4)$$

5.1 Mensch-Maschine Interface (MMI)

Unter den *konzeptuellen Objekten* wurden in der Ontologie *vehicle_events* eingeführt. Als *vehicle_events* wurden drei Nachrichtentypen klassifiziert (*alert*, *warning* und *indication*). Die Definition der *alert*-Nachricht wird durch das folgende Axiom beschrieben:

$$\begin{aligned} \text{alert} \sqsubseteq \text{VehicleEvent} \sqcap \exists \text{hasEventTopic}.T \\ \sqcap \forall \text{hasDisplayPriority}.1 \sqcap \exists \text{isFeedbackRequired}.T \end{aligned} \quad (5)$$

Über die Priorität kann gesteuert werden, wann und wo welche Nachricht angezeigt wird. Wolf et al. [18] zeigten, dass die Priorisierung, das Timing und der Informationskanal bei der Übermittlung von sicherheitsrelevanten Nachrichten an den Fahrer berücksichtigt werden müssen, da der Mensch nur 5 – 9 Informationseinheiten gleichzeitig aufnehmen kann und ein Großteil bereits mit Umfeldfaktoren belegt ist. Die Vergabe der Priorität in Formel (5 zeigt wie solche MMI-Anforderungen prinzipiell über wissensbasierte Verfahren abgebildet werden können. Die SWRL-Regeln zur Steuerung des MMI nutzen als Eingabe das aktuell von der Manöverplanung gewählte Fahrmanöver und bilden dieses auf eines der *vehicle_events* ab:

$$\begin{aligned} \text{vehicle_event}(?e) \wedge \text{emergency_brake}(?m) \rightarrow \\ \text{alert}(?e) \wedge \text{has_event_topic}(?e, \text{"Notbremsung!"}) \wedge \\ \text{is_feedback_required}(?e, \text{true}) \end{aligned} \quad (6)$$

6. Resümee



Bild 11: Beispielergebnisse der Verhaltensprädiktion für zwei unterschiedliche Szenen.

Links-Szene 1; rechts-Szene 2

Die Komplexität des MLN, wird durch die Anzahl der Prädikate und Formeln beschrieben. Das MLN wies eine geringe Komplexität auf. Insgesamt wurden 4 Prädikate und 6 Formeln zur Verhaltensprädiktion des (halluzinierten) Kindes verwendet. Prinzipiell sollten kleine MLN für unterschiedliche Aspekte einer Situation erstellt werden, um die Prozessierungsdauer möglichst gering zu halten. Die Objektklassen wurden in dieser Arbeit von der Simulation generiert. Die Ergebnisse der Verhaltensprädiktion für 2 unterschiedliche Szenen ist in Tabelle 2 dargestellt. Die zugehörigen Objektmarkierungen finden sich in Bild 11. In Szene 1 war lediglich der Ball sichtbar (linkes Bild). Die Existenz eines Kindes wurde aufgrund der Existenz des Balls mit einer Wahrscheinlich von 0,76 inferiert, obwohl das Kind noch nicht

sichtbar war. Darüber hinaus wurde mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,752 inferiert, dass das halluzinierte Kind dem Ball folgen wird. Wurde nach der Halluzination in der Szene 1 kein Kind sichtbar, wurde das halluzinierte Kind aus der Objektliste entfernt nachdem das Ego-Fahrzeug die Bahn des Balls überquert hatte. In der Szene#2 wurde zu dem Ball auch das Kind sichtbar (rechtes Bild).

Tabelle 2: Inferenzergebnisse und -Laufzeit des MLN zur Verhaltensprädiktion

Szene	Inputprädikat		Inferenzergebnis		Laufzeit
	Bezeichnung	Werte	Bezeichnung	Werte	
Szene 1: Ball sichtbar	hallucinated_object (o ₂)	1	child(o ₂)	0,76	42 ms
	football(o ₁)	1	follow(o ₂ , o ₁)	0,752	
Szene 2: Ball & Kind sichtbar	child(o ₂)	1	follow(o ₂ , o ₁)	0,897	31 ms
	football(o ₁)	1			

Die Halluzination über die Existenz des Kindes wurde aufgrund des sichtbaren Kindes validiert. Die Tatsache, dass das Kind den Ball folgen wird, wurde mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,897 inferiert. Dieser Wahrscheinlichkeit war deutlich höher als die aus der Szene#1. Die Inferenzzeiten für die Szene#1 und #2 lagen bei 42ms und 31ms. Die Simulation wurde auf einem Notebook mit durchschnittlichen Leistungskennwerten betrieben (Prozessor: i7-5600U, 8 GB DDR3 RAM, Intel HD Graphics 5500).

Tabelle 3: Metrik zur Gesamtontologie (Umfelderfassung, Manöverplanung, MMI)

Axiome	Axiomanzahl
Konzept	183
Subklassen	190
Äquivalente Klassen	17
Disjunkte Klassen	30
Objekt-Rollen	26
Inverse	6
Funktionale	1
Asymmetrische	1
Domain-Angaben	19
Range-Angaben	17
Datentyp-Rollen	30
Funktionale	14
Domain-Angaben	28
Range-Angaben	28
Individuen \emptyset	6
Klassenzuweisungen	6
Objektrollen-Zuweisungen	4
Datenrollen-Zuweisungen	3
Gesamt	609

Die Prozessierungsdauer für die Manöverplanung und MMI-Ansteuerung mit dem Regler auf Basis der SWRL, betrug im Durchschnitt 182 ms (Inferenzmaschine: Pellet [19]). Die Inferenzzeit ist abhängig von der Komplexität der Ontologie (Anzahl Konzepte, Rollen, Rollen-Eigenschaften, etc.).

Tabelle 3 führt die entsprechende Metrik auf. Die Ontologie umfasste vergleichsweise wenige Axiome (vgl. SNOMED CT: ca. 292.000 Konzepte und 62 Rollendefinition [20]). Das Fahrzeug war in der Lage vor dem Kind zum Stehen zu kommen, da bereits bei der Detektion des Balls eine graduelle Reduzierung der Geschwindigkeit durchgeführt wurde. Dennoch ist eine maximal Latenz von 50ms auch für komplexe Situationen, die Zugriff auf viele Axiome einer Wissensbasis benötigen, angestrebt.

Ein offensichtlicher Vorteil des Systems ist die einfache Änderbarkeit und Erweiterbarkeit des Systemverhaltens, indem die Regeln angepasst oder ersetzt werden. Für die Bearbeitung von Ontologien stehen ausgereifte Tools, Inferenzmaschinen und Programmierschnittstellen zur Verfügung. Für regelbasierte Logiksysteme ohne Unsicherheiten ist mit der Verknüpfung von OWL und SWRL eine effiziente Umsetzung gegeben. SWRL ermöglicht die Zeichenkettenverarbeitung innerhalb von Regeln und den Vergleich numerischer Datentypen, Datums- und Zeitangaben. Nachteilig ist, dass weder die logische Negation von Rollen noch die Disjunktion in SWRL Regeln unterstützt wird (Verletzung der Monotonie). Dies führt zu teilweise komplexen oder teil-redundanten Regeln. Ein weiterer Nachteil ist, dass nur Individuen, die in der Prämisse einer Regel vorhanden sind auch in der Konklusion verwendet werden können (DL-Safe Rules). Daraus resultiert, dass das Faktum über das neue Informationen erschlossen werden soll bereits vor der Regelausführung bekannt sein muss (vgl. Formel (6)).

7. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein wissensbasiertes System im Kontext des automatisierten Fahrens vorgeschlagen. Die Wissensbasis, bestehend aus einer Ontologie, einer Regelbasis und einem trainierten MLN, wurde offline erstellt. Zur Laufzeit wurde anhand der Wissensbasis und Evidenzen die Situation interpretiert, sowie die Manöverauswahl und MMI-Ansteuerung inferiert. Die Verhaltensprädiktion war in der Lage die Intention eines Kindes, aus einer Sichtverdeckung heraus einem Ball zu folgen, zu antizipieren und zu validieren. Das prädiizierte Verhalten wurde der Manöverplanung bereitgestellt, so dass potentielle Kollisionen frühzeitig erkannt und durch Stop- und Notbremsmanöver verhindert werden konnten. Über prädikatenlogische Regeln konnte der Manöverplaner und die MMI-Ansteuerung einfach parametrisiert werden, wodurch eine schnelle Adaption des Systems außerhalb der prozeduralen Verarbeitungslogik ermöglicht wurde. Die Evaluation erfolgte in einer Simulation.

8. Ausblick

Künftige Ansätze der Autoren werden sich mit der Segmentierung von Domänenwissen auf Basis der in den Regeln genutzten Konzepte für die Funktionsimplementierung beschäftigen.

Dazu sollen die in den Regeln referenzierten Konzepte zur Übersetzungszeit aus der Ontologie automatisiert extrahiert werden können, um diese den Fahrzeugfunktionen zur Laufzeit zur Verfügung stellen zu können. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Modellierung der Manöver, beispielsweise über die Einführung von Manöverphasen, Start- und Abbruchbedingungen und den zugehörigen Regeln. Mit Fuzzy-Controllern sollen künftig auch vage Konzepte in die Modelle einfließen. Darüber hinaus müssen Methoden zur systematischen Handhabung von Inkonsistenzen, etwa wenn sich die Wissensbasis und die Realität widersprechen, entwickelt werden. Die Erprobung im realen Stadtverkehr steht ebenfalls noch aus.

Literaturverzeichnis

- [1] N. Noy and D. L. McGuinness, "Ontology development 101: A guide to creating your first," *Technical Report SMI-2001-0880, Stanford Medical Informatics*, 2001.
- [2] R. Cornet and N. de Keizer, "Forty years of SNOMED: a literature review.," *BMC medical informatics and decision making* 8, 2008.
- [3] R. G. Raskin and M. J. Pan, "Knowledge representation in the semantic web for Earth and environmental terminology (SWEET).," *Computers & geosciences* 31.9, 2005.
- [4] B. Motik, P. F. Patel-Schneider, B. Parsia, C. Bock, A. Fokoue, P. Haase and M. Smith, "OWL 2 web ontology language: Structural specification and functional-style syntax," *W3C recommendation* 27.65, 2009.
- [5] I. Horrocks, P. F. Patel-Schneider, H. Boley, S. Tabet, B. Grosz and M. Dean, "SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML," *W3C Member submission* 21, 2004.
- [6] M. Richardson and P. Domingos, "Markov Logic Networks," *Machine Learning*, vol. 62, no. 1-2, p. 107–136, 2006.
- [7] C. Galleguillos and S. Belongie, "Context Based Object Categorization: A Critical Survey," *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 114, no. 6, p. 712–722, 2010.
- [8] I. Hensel, "Probabilistisch-logische Inferenz relationaler Situationsbeschreibungen aus Verkehrsbildfolgen," 2013.

- [9] C. Stiller, S. Kammel, I. Lulcheva and J. Ziegler, "Probabilistische Methoden in der Umfeldwahrnehmung Kognitiver Automobile," *Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik*, vol. 56, no. 11, p. 563–574, 2008.
- [10] M. Hülsen, J. M. Zöllner and C. Weiss, "Traffic intersection situation description ontology for advanced driver assistance," 2011.
- [11] B. Hummel, "Description Logic for Scene Understanding at the Example of Urban Road Intersections," Univ, Karlsruhe.
- [12] P. Levi, "Verteilte Aktionsplanung für autonome mobile Agenten," *KI Informatik Fachberichte 181*, 2013.
- [13] H.-H. Nagel, "A vision of 'vision and language' comprises action: An example from road traffic," *Artificial Intelligence Review 8.2-3*, 1994.
- [14] M. Feld and C. Müller, "The automotive ontology: managing knowledge inside the vehicle and sharing it between cars.," *Proceedings of the 3rd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. ACM*, 2011.
- [15] W. Bohlken, Realzeit-Szeneninterpretation mit ontologiebasierten Regeln, Universität Hamburg, 2012.
- [16] E. Donges, "Fahrerverhaltensmodelle," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [17] C. Löper, C. Brunken, G. Thomaidis, S. Lapoehn, P. P. Fouopi, H. Mosebach and F. Köster, "Automated Valet Parking as Part of an Integrated Travel Assistance," *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2013.
- [18] H. Wolf, R. Zöllner and H. Bubb, "Ergonomischer Lösungsansatz für die gleichzeitige Rückmeldung mehrerer Fahrerassistenzsysteme an den Fahrer," in *2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, Munich, 2006.
- [19] E. Sirin, B. Parsia, B. C. Grau, A. Kalyanpur and Y. Katz, "Pellet: A practical owl-dl reasoner," *Web Semantics: science, services and agents on the World Wide Web 5.2*, 2007.
- [20] K. Dentler, R. Cornet, A. Ten Teije and N. De Keizer, "Comparison of reasoners for large ontologies in the OWL 2 EL profile," *emantic Web, 2(2)*, 71-87, 2011.

Intentionen wahrnehmen und Umfeld verstehen: kognitive Prozesse in der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern

Adrian Haar M. Sc., Dr. **Andro Kleen**, **Lina Albrecht** M. Sc.,
Volkswagen AG, Wolfsburg;

Dr. Martin Schmettow, Prof. Dr. **Willem B. Verwey**,
University of Twente, Enschede, Niederlande

Kurzfassung

Die weitreichenden Entwicklungen der Sensortechnologie und Assistenzsysteme entlasten Fahrer in immer mehr Situationen. Eine der nächsten großen Herausforderungen besteht jetzt darin, diese Technologie über die Grenzen des einzelnen Fahrzeugs hinaus nutzbar zu machen und das Zusammenspiel zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern zu verbessern. So können Handlungsempfehlungen, die die Position und wahrscheinliche Trajektorie anderer berücksichtigen, dabei helfen komplexe Szenarien im urbanen Raum (z.B. Bushaltestellenszenarien mit vielen Fußgängern) oder Einfädelsituationen auf Autobahnen besser zu bewältigen. Gerade diese Situationen werden deshalb als schwer erlebt, weil die Intentionen anderer Fahrer oder Fußgänger häufig nicht wahrgenommen oder fehlinterpretiert werden. Für zukünftige Anzeige- und Bedienkonzepte stellt sich damit die spannende Frage, wie solche Informationen sinnvoll an Fahrer vermittelt werden können. Diese Frage gestaltet sich umso interessanter, wenn davon ausgegangen werden muss, dass diese Fahrer sich bereits in sehr komplexer Situation und in Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern befinden.

Um Herausforderungen dieser Art zu lösen, beschäftigt sich der vorliegende Beitrag mit der Frage, welche Art von Informationen an bestimmten Stellen dieser Interaktionsprozesse helfen können. Ziel dieser Überlegungen ist die Ableitung von Gestaltungsempfehlungen zur Umsetzung optimaler HMI-Konzepte. Voraussetzung hierfür ist zunächst das genaue Verständnis der relevanten kognitiven Prozesse. Von besonderem Stellenwert sind dabei die Informationsverarbeitung bzw. die Identifikation der wesentlichen Determinanten, die die Wahrnehmung und Interpretation des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer beeinflussen.

Dieser Beitrag stellt hierzu eine systematische Darstellung der wirkenden Faktoren vor und greift die in der bisher verfügbaren Literatur beschriebenen Zusammenhänge auf. Hierbei wird ein Modell erarbeitet, das eine phasenorientiertere Beschreibung der Informationsprozesse vorschlägt. Dabei werden wesentliche Teilprozesse, wie die Wahrnehmung der Inten-

tion anderer Verkehrsteilnehmer oder die Abwägungen einer subjektiver Kosten-Nutzen-Analyse, einzelnen Schritten der Interaktion zugeordnet und untersucht. Im Unterschied zu bisherigen Ansätzen werden hierbei die kognitiven Prozesse zweier handelnder Akteure berücksichtigt. Der hier vorgestellte Ansatz ist zudem die Grundlage für empirische Untersuchungen und für die Modellierung wesentlicher Interaktionsprozesse.

Abstract

Recent developments on the field of sensor technologies and driver assistance systems lead to great relief of the driver. The next great challenge will be to utilize these technologies beyond the borders of the individual vehicle and enhance the interaction between different drivers and road users. A possible scenario could be specific recommendations for actions, which will include the position and the most likely trajectory of other individuals. This enhancement of information would support the driver in complex scenarios in urban areas (such as bus-stop scenarios) or lane change maneuvers on highways. Today these situations are experienced as difficult, due to perception of the intentions of other drivers or pedestrians that are prone for missing or misinterpretation. For future display and operating concepts, this raises the interesting question of how such information can be provided to the driver. This question will be even more difficult to answer assuming that drivers are already part of very complex situation and in steady interaction with other road users.

To solve challenges of this kind, the present article deals with the question of what kind of information can help during certain stages of the interaction process. The aim of these considerations is the derivation of design guidelines for the implementation of ideal human-machine interface (HMI) concepts. This requires first an exact understanding of the most relevant cognitive processes. This implies the evaluation of the processing of information and the identification of key determinants influencing the perception and interpretation of behavior expressed by road users.

This article presents a systematic account of the acting factors and uses the relationships of cognitive processes described in the literature. The starting point of this model is a phase-oriented description of interaction-processes. Here, key sub-processes, such as the perception of intentions or subjective considerations of costs and benefits, are investigated and assigned to certain phases of interaction. Unlike previous approaches, the cognitive processes of two acting parties are taken into account. The approach presented can act as basis for empirical studies and modeling essential interaction processes.

1. Einleitung

Die Entwicklungen auf dem automobilen Markt weisen in den letzten Jahren eine Besonderheit auf, wie Sie in keinem anderen wirtschaftlichen oder gesellschaftlichen Kontext vorzufinden ist. Auf der einen Seite lässt sich eine bedeutende Zunahme an Komplexität des Straßenverkehrs feststellen. Die stetige Zunahme an zugelassenen Fahrzeugen und des Fahrzeugbestandes führt bei einer nur langsam wachsenden Infrastruktur zu dieser stetig steigenden Komplexität der Fahraufgabe [1]. Die steigende Vielzahl und dadurch wachsende Heterogenität der Fortbewegungsmittel trägt hierbei zusätzlich zum Anstieg der Komplexität bei. Auf Autobahnen können große Geschwindigkeitsdifferenzen auftreten die durch den zunehmenden Straßengüterverkehr noch verstärkt werden [1]. Im städtischen Bereich vermischen sich die von Fußgängern und Fahrzeugen gemeinsam genutzten Wege zunehmend. Hinzu kommen neue öffentliche Verkehrsmittel, intensivere Nutzung von kleinen Leihfahrzeugen und sehr mobile aber nahezu lautlose Nutzer von Elektrofahrrädern. Die schon im zweiten Jahr in Folge gestiegene Anzahl von getöteten Verkehrsteilnehmern [2] kann ein Ausdruck dieser zunehmenden Komplexität sein.

Auf der anderen Seite steigt die Anzahl an Möglichkeiten mehr über das nahe und ferne Umfeld zu erfahren. Dies gilt sowohl für die Beschaffenheit der Infrastruktur (statische Objekte) als auch für die Erkennung von anderen Verkehrsteilnehmern (dynamische Objekte). Grundsätzlich können diese Informationen dem Fahrer durch die Nutzung von vier unterschiedlichen Quellen zur Verfügung gestellt werden. Zunächst kann davon ausgegangen werden, dass die jetzt schon umfangreiche fahrzeugeigene Sensorik immer bessere Details über das jeweilige Umfeld bereitstellen kann. Dies geschieht vor allem durch die Anwendung und Weiterentwicklung verschiedenster Technologien wie zum Beispiel Radar, Ultraschall oder Kameras. Darüber hinaus ermöglicht die heute schon existierende Anbindung an schnelle mobile Netze den Abruf von Server-basierten Daten wie zum Beispiel den Standorten von Haltestellen/Parkhäusern oder Routen von öffentlichen Verkehrsmitteln. In gleicher Weise ermöglicht die Nutzung von „mobile devices“ den direkten (technischen) Kontakt in ein Fahrzeug beziehungsweise zum Fahrer eines Fahrzeugs. Als vierte Quelle können zudem zukünftige C2C Technologien genannt werden, die durch die Nutzung von Industrie-WLAN Standards direkte Verbindungen zwischen Fahrzeugen und Infrastrukturen herstellen können.

Für den automobilen Sektor ergibt sich damit ein hoch interessantes Spannungsfeld das einerseits aus deutlich gestiegenen Anforderungen an Fahrer und andererseits aus neuen

leistungsfähigen Technologien besteht, die ein großes Potential für verbesserte Informationen über die Umwelt liefern.

Da eine große Herausforderung des modernen Straßenverkehrs die Interaktion zwischen vielen verschiedenen Verkehrsteilnehmern ist, liegt es nahe, die oben beschriebenen neuen Informationsquellen zu nutzen um eben diese Interaktion zu unterstützen und zu verbessern.

Damit stellt sich die Frage wie diese Informationen Fahrern vermittelt werden können oder anders ausgedrückt, wie ein ideales HMI-Konzept unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Entwicklungen aussehen kann. Durch die Vielfältigkeit und Quantität der potentiell verfügbaren Informationen welchen dem Fahrer zugänglich gemacht werden können, muss dafür gesorgt werden, dass die richtigen Informationen zu den relevanten Verkehrsteilnehmern im idealen Zeitpunkt auf intuitiv verständliche Weise präsentiert werden. Zum Beispiel hat ein Fahrer im urbanen Kontext durch die hohe Dichte an verschiedenen Fahrsituationen weniger Zeit sich auf interaktive Manöver vorzubereiten als auf der Autobahn. Gerade hier liegt durch diese Problematik viel Potential zur Unterstützung und Verbesserung der Interaktion. Diese Herausforderung bleibt dabei über alle Automationsstufen hinweg bestehen. Gerade die Interaktion während manueller Szenarien aber auch während Misch-Szenarien, wie der Interaktion zwischen manuellen und automatisierten Fahrzeugen.

Um eine sinnvolle Umsetzung und Gestaltung von Mensch-Maschine Schnittstellen zu ermöglichen, ist es zunächst erforderlich ein detailliertes Verständnis der Zusammenhänge von verkehrlicher Interaktion und Kooperation herzustellen. Damit geht zum einen die Kenntnis der ablaufenden (kognitiven-) Prozesse und Phasen einher, zum anderen die Identifikation wesentlicher Faktoren die die kognitiven Abläufe und Prozesse beeinflussen. Erst dieser systematische Zugang ermöglicht die Ableitung effektiver HMI-Konzepte die die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern effektiv verbessert.

1.2 Interaktion und Kooperation im Straßenverkehr

Die Begriffe *Interaktion* und *Kooperation* werden im Kontext Straßenverkehr oft für die Bezeichnung sehr ähnlicher Prozesse verwendet. Im Allgemeinen wird unter Kooperation die Zusammenarbeit an einem gemeinsamen Ziel verstanden [3]. Unter dem Begriff Interaktion wird hingegen lediglich der Austausch zweier Parteien verstanden. Die implizierte positive Valenz des Wortes Kooperation erschwert hierbei jedoch die objektive Auseinandersetzung in unterschiedlichem Kontext. Zum Beispiel fällt es schwer die subjektive Qualität einer kooperativen Situation als schlecht zu bezeichnen wobei jedoch eine Interaktion sehr einfach

als nicht optimal bezeichnet werden kann. Des Weiteren wird der Begriff der Kooperation im Kontext der Verkehrspsychologie auch für die Zusammenarbeit von Menschen und automatisierenden Systemen verwendet. Im Folgenden beziehen sich die Begriffe Interaktion und Kooperation auf das Zusammenspiel unterschiedlicher Parteien im Straßenverkehr. Interaktion meint hierbei den bloßen Austausch von impliziten oder expliziten Nachrichten, Kooperation hingegen, ein gezieltes zusammen agieren um ein gemeinsames Ziel zu erreichen beziehungsweise einen gemeinsamen Plan durchzuführen. Hierbei sollte das Ziel sein, Interaktionen im Straßenverkehr so zu gestalten, dass sie von allen Parteien als Kooperationen und somit implizit als positiv wahrgenommen werden.

1.3 Erste Modellierungsansätze

Eine wichtige Erkenntnis in der Entwicklung von modernen Fahrerassistenzsystemen ist, dass der Verkehr indem der Fahrer agiert mehr ist als die Summe individueller Fahrzeuge. Verkehr lässt sich eher als das Zusammenspiel vieler heterogener Teilnehmer, in komplexer Interaktion untereinander, charakterisieren [4]. Dieses Zusammenspiel wurde bis zum jetzigen Zeitpunkt eher selten in Studien genauer untersucht. Studien zur Kooperation und Interaktion im Straßenverkehr evaluieren hierbei meist bereits voll automatisierte kooperative Systeme und nicht die Interaktion während der manuellen Fahrt. Gerade die Wahrnehmung und Berücksichtigung der Interessen von anderen Verkehrsteilnehmern stellt eine große Herausforderung dar. Die hierdurch entstehenden Entscheidungsprozesse und die Analyse jener sind dabei vergleichbar mit den Prozessen in der mathematischen Spieltheorie [5].

Die Untersuchungen von Benmimoun, Neunzig et al., unter Berücksichtigung von kognitiven Prozessen, im Bereich der Interaktion von Verkehrsteilnehmern zeigen dabei die Komplexität dieses Themenfeldes auf [6]. Hierbei berücksichtigen sie in ihrem Untersuchungskonzept mögliche Ursachen und Folgen von kooperativem Verhalten im Straßenverkehr.



Bild 1: Untersuchungskonzept zu Motivation, Verhalten und Folgen in kooperativen Situationen im Straßenverkehr nach Benmimoun et al. [6]

Hierbei unterscheiden sie unter anderem zwischen personalen, sozio-emotionalen und systemischen Faktoren für kooperatives Verhalten im Straßenverkehr. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass der jeweilige gesetzliche Rahmen und die Sicherheit von entscheidender Bedeutung sind. Des Weiteren wird zwischen individuellen und verkehrlichen Folgen von kooperativem Handeln entschieden (Bild 1).

Auf Grundlage dieser Überlegungen wurde unter anderem Raststätten-Befragungen und eine Simulatorstudie von Benmimoun et al. [6] durchgeführt. Ein wesentliches Ergebnis dieser Untersuchungen zeigt das in Bild 2 dargestellte Modell. Hierbei wird der Interaktionsprozess in Form eines Entscheidungsbaumes vorgestellt (Bild 2).



Bild 2: Stufenmodell zu Beschreibung der Entscheidung zu kooperativem Verhalten im Straßenverkehr nach Benmimoun et al. [6].

In diesem hierarchischen Modell wird davon ausgegangen, dass Fahrer, bevor sie sich kooperativ verhalten, vier voneinander abhängige Bedingungen als erfüllt betrachten müssen [6]. Oberste Priorität hierbei hat die Gewährleistung der Sicherheit. Sollte dies erfüllt sein wägt der Fahrer die für sich entstehenden Kosten durch die Interaktion ab. Wenn diese als gering eingestuft werden, wird die Hilfsbedürftigkeit des anderen Fahrers evaluiert. Sollte eine Hilfsbedürftigkeit vorhanden sein, geht das Modell von einer wahrscheinlichen Kooperation aus. Der Nutzen für die Verkehrseffizienz spielt hierbei, streng genommen, keine entscheidende Rolle.

Diese beiden Ansätze zur formellen Beschreibung von interaktiven und kooperativen Situationen im Straßenverkehr sollten als Ausgangspunkt für die folgenden Überlegungen herangezogen werden. Um die Ursache-Wirkungszusammenhänge von Interaktionen im Straßenverkehr zu beschreiben kann es wichtig sein von weiteren wirkende Faktoren und kognitiven Prozessen auszugehen. Mögliche Ansatzpunkte hierfür könnten unter anderem sein:

- a) Einbindung von Kognitiven Prozessen, wie die Verarbeitung von Informationen [7]
- b) Berücksichtigung von Persönlichen Eigenschaften und Unterschiede zwischen Individuen, die Entscheidung und das Handeln in der betreffenden Situation beeinflussen [6].
- c) Integration von zusätzlichen, im Austausch stehenden, Parteien [8]
- d) Erwägung von Situations- und Umweltfaktoren, die das Verhalten von Fahrern beeinflussen [9] [10]
- e) Vorteilhaft wäre eine Erweiterung der Beschreibung durch unterschiedliche Phasen [11].

2. Erstellung des Modells

Um die obengenannten Punkte zu berücksichtigen schlägt dieser Beitrag vor, im Folgenden, die vorgestellten Ergebnisse durch weitere Ansätze zu ergänzen und in einem Modell zusammenzuführen. Hierbei stehen vor allem die Beschreibung und die Vorhersage von Verhalten verschiedener Verkehrsteilnehmer in kooperativen Situationen im Vordergrund. Diese Modellierung soll als Basis für die weitere Evaluation von interaktiven und kooperativen Szenarien dienen. Mögliche Anwendungsfälle sind hierbei die Quantifizierung von Ursache-Wirkung Zusammenhängen und das Aufzeigen von möglichem Unterstützungsbedarf von Fahrern in verschiedenen interaktiven Szenarien. Hierzu wurden bereits existierende Überlegungen zu Modellen und Faktoren, welche das Verhalten von Fahrern im Straßenverkehr beschreiben, und Erkenntnissen aus anderen wissenschaftlichen Bereichen zum Thema Kooperation, mit der oben genannten Zielsetzung zusammengeführt.

Diese Überlegungen zu wirkenden Faktoren und Prozessen wurden in ein generalisiertes Modell zur Interaktion im Straßenverkehr (Bild 3) übertragen. An Hand dieser Beschreibung lässt sich nun der Ablauf von verschiedenen Szenarien illustrieren.

Eine beispielhafte Anwendung wäre ein Spurwechsel auf einer Autobahn. Ein Fahrer auf der linken Fahrspur nimmt ein vorrausfahrendes Fahrzeug auf der rechten Spur hinter einem langsam fahrenden LKW wahr. Dieser Partner kommuniziert durch den Blinker seine Intention die Fahrspur zu wechseln. Diese wahrgenommene Intention wird unter Einbeziehung verschiedener Faktoren in einer Kosten-Nutzen Analyse bewertet und ein Handlungsplan zur Kooperation entwickelt. Dieser wird im nächsten Schritt durch beispielsweise eine Reduktion der Geschwindigkeit kommuniziert. Dieses Angebot wird auf Seiten des Kooperationspartners wahrgenommen und wiederum bewertet. Fällt diese Bewertung positiv aus wird der verhaltensbasierte Plan angenommen und gemeinsam ausgeführt. Darauffolgend wird die Interaktion implizit oder explizit abgeschlossen und eventuelles Feedback führt zu einem Lernprozess.

Auf die Struktur des vorgeschlagenen Modells und die Rolle der wirkenden Faktoren wird im Folgenden detaillierter eingegangen.

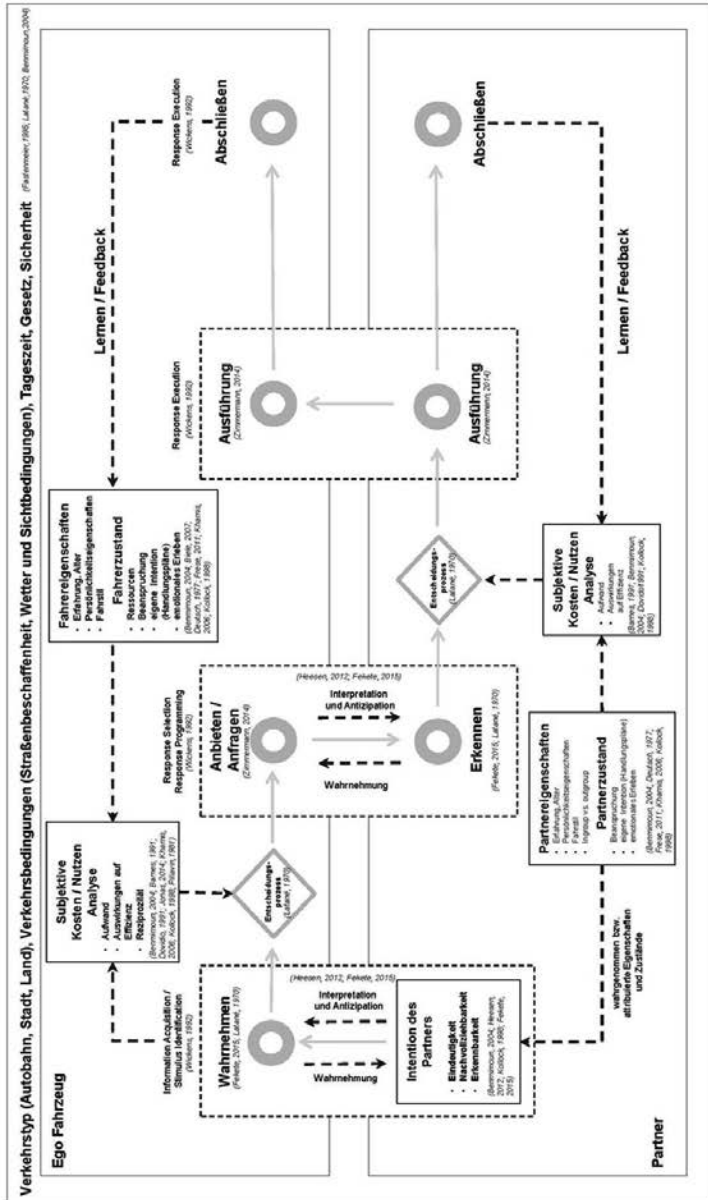


Bild 3: Resultierende strukturierte Prozessbeschreibung zu interaktivem und kooperativem Verhalten im Straßenverkehr.

2.1 Voraussetzungen und Rahmenbedingungen

Damit es überhaupt zu Interaktionen oder Kooperationen im Straßenverkehr kommen kann müssen bestimmte Voraussetzungen, wie das Vorhandensein von mindestens zwei handelnden Parteien, erfüllt sein. Darüber liegen grundsätzliche Rahmenbedingungen vor, die die gesamte Fahrsituation und somit auch über einzelne Phasen der Interaktion hinaus wirken. Beispiele hierfür sind allgemeine Verkehrsbedingungen, wie die Beschaffenheit der Straße, Verkehrsdichte, Geschwindigkeitsniveau, Wetter und daraus resultierende Sichtbedingungen. Allgemeiner hat auch der Verkehrstyp, wie Stadtverkehr, Landstraße oder Autobahn, einen Einfluss auf das Verhalten von Fahrern in allen Verkehrssituationen [6] [9] [10]. Hierbei wird davon ausgegangen, dass Fahrer sich auf einer guteinsichtigen und wenig befahrenen Autobahn kooperativer verhalten verglichen mit einer Situation in einer verregneten und überfüllten Innenstadt. Die Legalität und die Sicherheit des eigenen Verhaltens werden hierbei, wie bereits von Benmimoun et al. (2004) [6] erwähnt, immer vorausgesetzt. Hierbei sollte jedoch nicht nur die Eigensicherheit sondern auch die Unversehrtheit anderer Verkehrsteilnehmer berücksichtigt werden.

2.2 Phasen einer Interaktion

Für eine genauere Betrachtung einzelner Schritte einer kooperativen Interaktion, scheint es sinnvoll den „fließenden Prozess“ in einzelne, abzugrenzende Phasen zu unterteilen. Dies hat den Vorteil, dass so einzelne Phasen unabhängig und somit detaillierter betrachtet werden können. Grundlage für diese Gliederung ist das „Decision Model of Intervention“ vorgeschlagen von Latané und Darley [11]. Dieses Modell (Bild 4) beschreibt die verschiedenen Entscheidungsphasen, die ein Individuum erfolgreich durchläuft um in einer Notsituation einzuschreiten. Das Helfen in einer Notsituation und kooperatives Verhalten im Straßenverkehr ist hierbei sehr ähnlich, da er sich in beiden Situationen um das Unterstützen von Anderen und das Anpassen des eigenen Verhaltens zum Wohl dieser handelt.

Die Autoren formulieren in diesem Modell, dass eine Situation erkannt werden muss (Schritt 1), diese als Notsituation interpretiert werden muss (Schritt 2), persönliche Verantwortung für die Situation empfunden werden muss (Schritt 3), eine Handlungsweise zur Unterstützung verfügbar sein muss (Schritt 4) und diese Handlungsweise schlussendlich umgesetzt werden muss (Schritt 5).

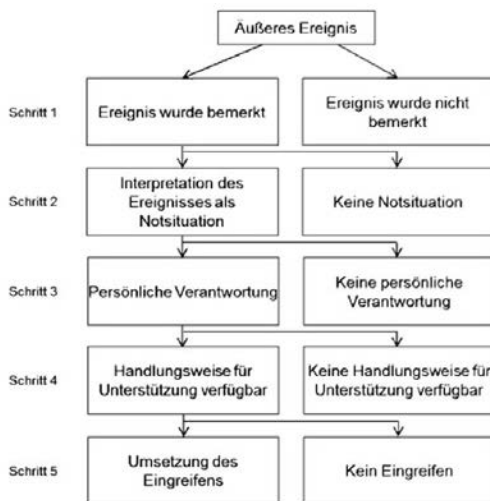


Bild 4: „Decision Model of Intervention“ Latané & Darley (1970) [11] nach Levine & Manning (2014) [12]

Analog hierzu wird davon ausgegangen, dass eine Situation in der eine Interaktion zwischen Verkehrsteilnehmern möglich ist, auch als eine solche erkannt und interpretiert werden muss. Als nächstes muss der Fahrer persönliche Verantwortung für die Situation entwickeln. Im Gegensatz zum Modell von Latane und Darley [11] geht dieser Beitrag, aufgrund der fehlenden Dringlichkeit einer Interaktion im Gegensatz zu einer Notsituation, von einem subjektiven Entscheidungsprozess aus. Innerhalb dieses Prozesses wägt der Fahrer ab, ob er plant eine Kooperation einzugehen. Dies beinhaltet auch das abwägen von verschiedenen Handlungsalternativen. Im Falle einer positiven Entscheidung für eine Kooperation erfolgt in der Regel ein Angebot desjenigen Fahrers der in der entsprechenden Position ist. Dieses, im Wesentlichen nonverbale und verhaltensbasierte, Angebot setzt einen kognitiven Handlungsplan für den sich im Vorhinein entschieden wurde. Da es sich bei einer Interaktion um das Zusammenspiel von zwei gleichgestellten Partnern handelt muss dieser Plan dann vom Gegenüber angenommen und gemeinsam durchgeführt werden [13].

Übertragen auf das zuvor erwähnte Beispiel des Fahrstreifenwechsels, nimmt der Fahrer zuerst den Bedarf des Partners wahr den Fahrstreifen zu wechseln. Wenn sich der Fahrer für eine Kooperation entscheidet, reduziert dieser zum Beispiel seine Geschwindigkeit um den

Partner so nonverbal ein Angebot zu übermitteln. Bei Annahme des Angebotes wechselt der Partner den Fahrstreifen und der Ego-Fahrer passt seinen Abstand auf den ihn nun Vorraus-fahrenden an.

Dieser Prozess zeigt auch deutliche Parallelen zu dem Informationsverarbeitungsmodell nach Wickens [7]. Dieses Modell unterteilt die Informationsverarbeitung in die Wahrnehmung, Verarbeitung via Kognition und Gedächtnis, zur Auswahl einer adäquaten Reaktion und der Ausführung dieser Reaktion [7].

2.3 Einflussfaktoren

Ein Vorteil des phasenorientierten Ansatzes, wie bereits erwähnt, liegt darin die Wirkung einzelner Faktoren in Bezug zu einzelnen Unterprozessen stellen zu können. Diese hier speziell wirkenden Faktoren werden im Folgenden detaillierter beschrieben.

Eine zentrale Rolle unter den wirkenden Faktoren haben hierbei die *Fahrereigenschaften*. Die Untersuchungen von Benmimoun et al. (2004) [6] haben unter anderem eine Unterscheidung in verschiedene Fahrstile hervorgebracht. Sie unterscheiden hierbei zwischen systemischer, egoistischer oder rivalisierender Motivation für eine Kooperation im Straßenverkehr. Neben der Motivation ist es jedoch auch möglich das verschiedene Charaktereigenschaften Einfluss auf das Verhalten in einer Interaktion haben. Zu der objektiven Beschreibung dieser Eigenschaften wird hierbei oft das „Big Five Inventory“ verwendet [14]. Von den fünf Dimensionen ist hier vor allem die Dimension *Verträglichkeit* besonders interessant, da diese durch das zwischenmenschliche Verhalten einer Person definiert ist. Bei einer hohen Ausprägung dieser Charaktereigenschaft beschreiben sich Personen meist als mehr altruistisch und neigen generell zu Kooperationen. Hierbei ist denkbar, dass sich dies auch im Verhalten im Straßenverkehr widerspiegelt. Diese zentrale Rolle der Fahrereigenschaften, insbesondere auf die Entscheidung für oder gegen eine Kooperation wird im oberen Bereich von Bild 3 dargestellt.

Neben den Fahrereigenschaften ist auch der aktuelle *Fahrerzustand* von Einfluss auf sein Verhalten und die Entscheidung für oder gegen eine Kooperation. Unter diesem Begriff fassen dieser Bericht die verfügbaren mentalen Ressourcen, die eigene situative Intention, das emotionale Erleben der Situation und die mentale Beanspruchung des Fahrers zusammen. Im Gegensatz zu den Fahrereigenschaften kann sich der Zustand kurzfristig und von Situation zu Situation ändern. Der Einfluss von Emotionen, insbesondere von Freude und Ärger, aber auch Aggressionen wurde hierbei schon in früheren Studien untersucht [4][6]. Auch die Rolle der kognitiven Ressourcen und der Belastung bzw. Beanspruchung des Fahrers wur-

den als entscheidende Faktoren herausgestellt [6][15]. Zum Beispiel wäre es denkbar, dass, wenn ein Fahrer über keine freien kognitiven Ressourcen durch eine schwierige allgemeine Verkehrssituation verfügt, eine mögliche kooperative Situation nicht als eine solche wahrgenommen werden kann.

Vergleichbar zu den Fahrereigenschaften sind auch die *Eigenschaften des Kooperationspartners* von Einfluss auf die Situation. Zum einen sind die Eigenschaften und der Zustand des Partners relevant für dessen Wahrnehmung der Situation und Akzeptanz eines vorgeschlagenen Planes, ähnlich der Wahrnehmungsprozesse des Ego-Fahrers. Dieser Einfluss auf die Wahrnehmung wird im linken Bereich von Bild 3 deutlich gemacht. Darüber hinaus haben diese Eigenschaften auch Einfluss auf das Verhalten des Ego-Fahrers. Zum einen haben Untersuchungen gezeigt, dass sich das Verhalten in einem interaktiven Prozess permanent dem Verhalten des Partners anpasst [16]. Zum anderen können In-Group vs. Out-Group Prozesse eine Rolle spielen. Vorstellbar wäre, dass sich Fahrer einer speziellen Fahrzeugmarke systematisch kooperativer gegenüber Fahrern derselben Marke verhalten. Auch Fahrzeugtypen wie LKW und PKW oder Motorrad und PKW können hierbei eine Rolle spielen [6].

Neben den Eigenschaften des Partners wird auch dessen wahrgenommene Intention von Einfluss auf die Kooperation sein. Hierbei führen Prozesse, wie zum Beispiel, die Reziprozität der Situation, also die Annahme, dass mit einem selbst in einer ähnlichen Situation auch kooperiert wird, zu einer höheren Bereitschaft zur Kooperation [3][17][18]. Sollte also die Situation sehr nachvollziehbar sein, sodass der Fahrer ähnlich zu dem Partner in der Situation handeln würde, ist eine Kooperation wahrscheinlicher.

Neben diesen Faktoren, ausgehend vom Fahrer und dem Partner, existieren noch weitere Unterprozesse die wiederum als wirkende Faktoren gesehen werden können.

2.4 Subjektive Kosten-Nutzen Analyse

Als wichtige Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Kooperation kann die positive Entscheidung für eine Kooperation der Beteiligten gesehen werden. Als wichtiger Teil dieses Entscheidungsprozesses identifiziert die Literatur unter anderem das Abwägen von Kosten gegenüber der Nutzen der Interaktion [6]. Diese Kosten-Nutzen Analyse ist hierbei deutlich durch die subjektive Wahrnehmung der jeweiligen Kosten geprägt. Hierbei ist denkbar, dass verschiedene Fahrer dieselben Gegebenheiten einer Situation, als unterschiedliche Kosten interpretieren. Dabei sind die persönlichen Kosten, die der Fahrer bei einer Interaktion trägt, am deutlichsten durch den zu investierenden Aufwand, beziehungsweise der nötigen Anpas-

sung des Verhaltens, bedingt. Wenn ein Fahrer zum Beispiel sehr stark Bremsen muss, um einen Spurwechsel eines anderen Fahrers auf der Autobahn zu ermöglichen, impliziert dies einen hohen Aufwand seinerseits für die Interaktion. Der subjektive Eindruck der Kosten beinhaltet hierbei jedoch nicht nur die entstehenden Kosten für das Eingreifen oder Helfen in der Situation sondern auch die Kosten eines nicht-Eingreifens [19].

Im Allgemeinen streben Menschen dazu, Kosten gering zu halten und den Nutzen derweil zu optimieren [20]. Das Vorhandensein eines subjektiven Nutzens einer kooperativen Entscheidung wird von Barnes & Gray sogar als Voraussetzung für kooperative Handlungen gesehen [21]. Benmimoun et al. operationalisieren den Nutzen der Interaktion durch die Voraussetzung des Einflusses auf die verkehrliche Effizienz des Handels auch wenn Sie durch eine Verkehrssimulation gezeigt haben, dass eine objektive Effizienzsteigerung durch Kooperation nicht immer vorhanden ist [6]. Möglich ist jedoch auch die Auswirkung der positiven Bestätigung, helfend und unterstützend handeln zu können [22]. Diese Emotionale Komponente des Nutzens wird in der Entwicklung der Prozessbeschreibung teilweise durch die Anwendung der Reziprozität in der Kosten-Nutzen Analyse als auch dem emotionalen Erleben der Situation als Teil des Fahrerzustandes abgedeckt.

Hieraus folgt, dass eine Kooperation besonders wahrscheinlich ist, wenn die persönlichen Kosten gering sind, ein subjektiver Nutzen der Kooperation vorhanden ist, und der Fahrer ein Gefühl von Reziprozität erfährt.

2.5 Kommunikation

Eine wichtige Zielsetzung bei der Entwicklung des Modelles war die Berücksichtigung von zwei Parteien welche im direkten Austausch stehen. Dieser Austausch impliziert eine wichtige Rolle von direkter, aber auch indirekter Kommunikation. Dies wird auch durch die Definition von Kooperation durch Mataric [8] deutlich: „*Cooperation is a form of interaction, usually based on communication. Certain types of cooperative behavior depend on directed communication. Specifically, any cooperative behaviors that require negotiation between agents depend on directed communication in order to assign particular tasks to the participants.*“ In dieser Definition wird die besondere Rolle der Kommunikation in interaktiven Szenarien dargestellt in welchen zwischen verschiedenen Parteien bestimmte Aufgaben verteilt werden müssen. Dies lässt sich gut auf interaktive Szenarien im Straßenverkehr, wie zum Beispiel Spurwechselszenarien, übertragen. Zum heutigen Zeitpunkt haben Fahrer jedoch lediglich die Möglichkeit indirekt, durch die Benutzung des Blinkers oder Verhalten, wie dem Verrin gern der Geschwindigkeit, zu kommunizieren. Diese indirekte Kommunikation ist natürlich offen für Fehlinterpretationen und Missverständnisse welche zu Konflikten oder im schlimms-

ten Fall sogar potenziell zu Unfällen führen können [4]. Denkbar sind zum Beispiel Unterschiede im Nutzerverhalten des Blinkers als Quelle für Missverständnisse. In der erwähnten Spurwechsel Situation ist es zum einen möglich, den Blinker als Anfrage für eine Kooperation zu gebrauchen, aber auch um auf den genauen Zeitpunkt eines Spurwechsels hinzuweisen. Ergebnis hiervon wäre, dass Fahrer beim ersten Nutzverhalten einen direkten Spurwechsel erwarten, jedoch der Fahrer die Bestätigung seines Verhaltens abwartet. Die zwei wichtigen Facetten der Kommunikation, Plan und Zeitpunkt der Ausführung, können hierbei nicht durch die Ein-Dimensionalität des Blinkers als Kommunikationsmedium erfüllt werden. Schlussfolgernd aus diesen Überlegungen, wurde Kommunikation zwischen beiden Parteien als wichtiger Baustein zwischen den Phasen *Wahrnehmen*, *Anbieten/Anfragen*, *Erkennen* und *Ausführung* aufgenommen (Bild 3, Illustriert durch Pfeile).

2.6 Lernen

Nach einer erfolgreichen Interaktion wird davon ausgegangen, dass beide Parteien die Situation gemeinsam abschließen. Dies geschieht hierbei nur selten durch explizite Handlungen wie das Bedanken durch Gesten. Jedoch fließen Erfahrungen welche im Straßenverkehr gesammelt werden in das Langzeitgedächtnis, folgend der Theorie von Wickens, ein und formen dadurch zukünftiges Handeln [7]. Durch besondere, positive oder auch negative Ereignisse können der aktuelle Fahrerzustand oder auch Faktoren der Kosten-Nutzen Analyse, wie zum Beispiel die wahrgenommene Reziprozität und damit nachfolgende Interaktionen beeinflusst werden. Aufgrund dieser Überlegungen wurde auch ein möglicher Lernprozess in der Modellbeschreibung, auf der Rechte Seite von Bild 3 illustriert, integriert.

3. Diskussion

Durch die Berücksichtigung verschiedener Ansätze und Faktoren soll ein erster Beitrag zur verbesserten Gliederung kooperativer Interaktionen geleistet werden. Das hier vorgestellte Modell vereint dabei theoretische Überlegungen und empirische Erkenntnisse aus der Literatur. Diese Erkenntnisse beziehen sich dabei auf das isolierte Betrachten einzelner oder wenige wirkender Faktoren. Der ganzheitliche Zusammenhang wie formuliert in dem entwickelten Modell (Bild 3) wurde bis jetzt nicht durch empirische Studien überprüft und bestätigt. Aus diesem Grund können zu diesem Zeitpunkt noch keine Aussagen in Bezug auf Reliabilität und Validität des gesamten Modells getroffen werden.

Daher sollte ein Ziel von zukünftigen Studien die empirische Überprüfung der hier entwickelten Ursache und Wirkungs-Zusammenhänge sein. Hierbei wäre die experimentelle Manipulation von wirkenden Faktoren ein Anfangspunkt, um den generellen Einfluss überprüfen zu

können. Ein weiteres Interesse bei der empirischen Überprüfung dieses Modells wäre die experimentelle Identifikation von wirkungsvollen Faktoren, welche durch zukünftige Assistenzsysteme unterstützt werden können. Beispielsweise ist denkbar, dass die Wahrnehmung des Partners als In-Group Peer einen großen Einfluss auf das kooperative Verhalten hat, welches jedoch schwer durch das Fahrzeug zu beeinflussen wäre. Zum anderen wäre auch eine Quantifizierung von den hier vorgestellten Faktoren wünschenswert. Sehr wahrscheinlich wirken die hier besprochenen Faktoren nicht im gleichen Ausmaß auf den Prozess der Interaktion, sondern variieren aufgrund der Fahrsituation oder anderen externen Ursachen.

Eine Schwierigkeit bei der empirischen Überprüfung des Modells ist das Fehlen eines objektiven Maßes zum Messen der Qualität von interaktiven und kooperativen Situationen im Straßenverkehr [13]. Im Gegensatz zu objektiven Maßen der Qualität ließ sich in einer vergangenen Studie bereits zeigen, dass sich das subjektive Erleben von kooperativen Szenarien erfolgreich messen lässt [23]. Den Einfluss von Manipulationen von wirkenden Faktoren oder prototypischen Assistenzsystemen auf die objektive Qualität einer Situation bleibt hingegen bisher nicht valide zu beantworten.

Neben der empirischen Überprüfung des hier vorgestellten Modells sollen diese Zusammenhänge weiter untersucht werden. Durch die Anwendung der hier vorgestellten Überlegungen auf reale Anwendungsgebiete, können Grenzen und Schwachstellen identifiziert werden.

Die hier vorgestellten Ursache und Wirkungs-Zusammenhänge verdeutlichen die hohe Komplexität von kooperativen und interaktiven Szenarien. Generell besteht jedoch weiterhin ein großer Untersuchungsbedarf zum Verständnis und der Entwicklung von kooperationsfördernden Mechanismen [4]. Unbeantwortete Fragen hierbei bleiben: Welche Rolle spielt die wahrgenommene Intention im Detail? Wie wichtig sind einzelne Faktoren wie zum Beispiel die wahrgenommene Nachvollziehbarkeit der Intention? Auch die Frage ob Individuen generell öfter kooperieren, wenn sie in dieser Situation optimal unterstützt werden oder ob hierfür andere Mechanismen nötig sind bleibt weiterhin unbeantwortet.

Die Beantwortung dieser Fragen wird eine wichtige Rolle in der Weiterentwicklung neuer Assistenzsysteme und der HMI-Konzepte einnehmen. Das Ziel hierbei sollte sein, die Komplexität der einzelnen Szenarien, durch eine optimale Unterstützung während der Durchführung zu reduzieren und dadurch Kooperation im Straßenverkehr zu fördern. Das hier entwickelte Modell kann dabei als Werkzeug fungieren um eventuelle Unterstützungsmöglichkeiten von Fahrern in Interaktiven Szenarien zu identifizieren und diese zielgerichtet unterstützen zu können. Dabei erscheint uns ein Fahrer-zentrierter Design Ansatz, basierend auf dem vorge-

stellten Modell, als sinnvoll um Fahrern im richtigen Moment mit den nötigen Informationen oder auch Funktionen unterstützen zu können. Dadurch wird Überangebot oder eine Überforderung der Fahrer verhindert und eine optimale Unterstützung ermöglicht.

5. Literatur

- [1] Hütter, A.: Verkehr auf einen Blick. Statistisches Bundesamt, 2013
- [2] Statistisches Bundesamt: Unfallbilanz 2015: Mehr Unfälle und mehr Verkehrstote. Pressemitteilung vom 12.7.2016
- [3] Khamis, A. M., Kamel, M. S. & Salichs, M. A.: Cooperation: Concepts and generality. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (2006) S. 1499–1505
- [4] Fekete, S., Vollrath, M., Huemer, A. K. & Salchow, C.: Interaktionen im Straßenverkehr: Kooperation und Konflikt. Der Fahrer im 21. Jahrhundert, Düsseldorf: VDI Verlag (2015) S. 325–338
- [5] Kollock, P.: Social dilemmas: The anatomy of cooperation. Annual Review of Sociology 24 (1998), S. 183–214
- [6] Benmimoun, A., Neunzig, D. & Maag, C.: Effizienzsteigerung durch professionelles/partnerschaftliches Verhalten im Straßenverkehr: FAT-Schriftenreihe Nr. 181. Frankfurt/Main: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. 2004
- [7] Wickens, C. D.: Engineering psychology and human performance. New York: Harper Collins 1992
- [8] Mataric, M. J.: Interaction and intelligent behavior. Unveröffentlichte Dissertation. Massachusetts Institute of Technology, Boston. 1994
- [9] Fastenmeier, W.: Autofahrer und Verkehrssituation: Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Strassenverkehrssysteme. Bonn: Deutscher Psychologen-Verlag 1995
- [10] Kölbl, R. & Fuchs, S.: Driver behaviour and user acceptance of cooperative systems based on infrastructure-to-vehicle communication, Human Modelling in Assisted Transportation. Mailand: Springer (2011) S. 263–274
- [11] Latané, B. & Darley, J. M.: The unresponsive bystander: Why doesn't he help? New York: Appleton-Century-Crofts 1970
- [12] Levine, M. & Manning, R.: Prosoziales Verhalten. Sozialpsychologie. Berlin: Springer (2014) S. 357–400

- [13] Zimmermann, M., Bauer, S., Lutteken, N., Rothkirch, I. M. & Bengler, K. J.: Acting together by mutual control: Evaluation of a multimodal interaction concept for cooperative driving. International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS). Bloomington: IEEE (2014) S. 227–235
- [14] Satow, L.: Improvements in Recruitment Processes: Selection of Employees with Online Tests and the Big Five Personality Model. International Business and Economics Discussion Papers (2011) 6
- [15] Biele, G.: No man is an island: Cooperation in groups and social learning. Unveröffentlichte Dissertation. Freie Universität Berlin, Berlin 2007
- [16] Jonas, K., Stroebe, W. & Hewstone, M.: Sozialpsychologie (6. Aufl.). Berlin: Springer 2014
- [17] Myers, D. G.: Sozialpsychologie. Psychologie (S. 595–652). Berlin: Springer. 2014
- [18] Nowak, M.: Five rules for the evolution of cooperation. Science, (2006) 314 (5805), S.1560–1563
- [19] Dovidio, J. F., Piliavin, J. A., Gaertner, S. L. & Clark, R. D: The arousal: cost-reward model and the process of intervention. Prosocial behavior (S. 86–118). Thousand Oaks, CA: Sage. 1991
- [20] Piliavin, J. A., Dovidio, J. F., Gaertner, S. L. & Clark, R. D.: Emergency intervention. New York: Academic Press 1981
- [21] Barnes, D. P. & Gray, J. O.: Behaviour synthesis for co-operant mobile robot control. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Edinburgh: IEEE (1991) S. 1135-1140
- [22] Tuomela, R.: Cooperation: A philosophical study. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers 2000
- [23] Zimmermann, M., Fahrmeier, L., & Bengler, K. J.: A Roland for an Oliver? Subjective perception of cooperation during conditionally automated driving. International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS) (2015) S.57-63

Tiefe neuronale Netze für die Szeneninterpretation anhand von Belegungskarten

André Mueller, Christoph Seeger, Loren Schwarz, Michael Manz,
BMW AG, München

Kurzfassung

Um kollisionsfreies, automatisiertes Fahren zu erreichen, muss jegliche Art von statischen Hindernissen robust erkannt werden. Hierzu werden im Automobilbereich immer häufiger Belegungskarten verwendet. In dieser Arbeit werden die aus der Sensordatenfusion resultierenden lokalen Belegungskarten nicht nur für die Erkennung von statischen Hindernissen zum Bremsen oder Ausweichen verwendet, sondern auch direkt an die Situationsinterpretation des Umfeldmodells weitergeleitet. So wird ein Algorithmus basierend auf Belegungskarten vorgestellt, der ohne Rückgriff auf Kartendaten erkennt, ob sich das Fahrzeug auf einer Autobahn, Bundes- bzw. Landstraße, einem Parkplatz oder in der Stadt befindet. Das Wissen über die Art des Straßentyps kann in Fahrerassistenzsystemen zum einen verwendet werden, um das Fahrzeug und seine Benutzeroberfläche an die aktuelle Situation anzupassen. Zum anderen kann das Wissen über die aktuelle Art der Umgebung verwendet werden, um sowohl Parameter in der Sensorfusion als auch in der Verhaltensplanung auf Fahrzeugebene situativ zu adaptieren. Um die Umgebung anhand von Belegungskarten zu klassifizieren werden verschiedene Ansätze des maschinellen Lernens auf realen Datensätzen mit ungefähr 1000 Beispielen pro Klasse untereinander verglichen. Insbesondere wird auch auf tiefe neuronale Netze (engl. Deep Neural Networks) eingegangen, welche sich in jüngster Vergangenheit in zahlreichen bildbasierten Anwendungen als sehr vielversprechende Klassifikationsmethoden etabliert haben. Die besten Methoden dieser Arbeit erreichen eine Genauigkeit von 94% und stellen einen ersten Schritt dar, um Informationen höherer Ordnung aus Belegungskarten zu erhalten.

Abstract (optional)

With respect to robust obstacle fusion in series production in the automotive industry occupancy grid mapping gains more and more popularity. In this work, local occupancy grids are used in the situation interpretation layer of the environment model for a context classification task. Several approaches are presented to recognize whether the vehicle is driving on a freeway, a highway, in a parking area or on an urban road, without the use of navigation maps or image data. Inspired by the success of deep learning approaches, we compare an

end-to-end Convolutional Neural Network (CNN) classifier to a Support Vector Machine (SVM) trained on hand-crafted features. All approaches were tested on a dataset containing about 700 local occupancy grids per class for training and 150 for testing. The best methods achieve a test accuracy of 94%. We see the proposed work as a first step towards classification of high-level information from occupancy grids and will extend the approach to other situations.

1. Einleitung

Die robuste und detaillierte Wahrnehmung der aktuellen Fahrzeugumgebung, sowie dessen intelligente Interpretation ist ein Schwerpunkt in der Entwicklung moderner Fahrerassistenzsysteme. Vor allem hoch- und vollautonomes Fahren benötigt eine Vielzahl von Sensoren, deren Daten durch anspruchsvolle Algorithmen zur Sensordatenfusion kombiniert werden müssen. Durch die große Menge an Umgebungsinformationen, sowie durch die steigende Komplexität der zu behandelnden Verkehrsszenarien geraten regelbasierte Ansätze zur Sensorfusion, als auch zur Situationsinterpretation an ihre Grenzen. Daher spielen Methoden des maschinellen Lernens eine immer größere Rolle. Gerade in urbanen Gebieten ist eine robuste Situationsinterpretation von Nöten, die sowohl Fahrerassistenzsysteme, als auch die Planungs- und Regelungsmechanismen autonomer Fahrzeuge mit zusätzlichen Information über die Umgebung versorgt. Als ersten Schritt in Richtung einer detaillierten Situationsbeschreibung widmet sich diese Arbeit der Klassifikation von Straßentypen. Lediglich unter Zuhilfenahme der Aussage über den Straßentyp können Algorithmen zur Umgebungswahrnehmung und Sensordatenfusion je nach Straßentyp parametrisiert werden [1]. Weiterhin könnten die Benutzeroberfläche eines Fahrzeugs, sowie dessen Fahrerassistenzfunktionen angepasst werden oder die automatisierten Fahrfunktionen nur auf Straßen erlaubt werden, die eine Trennung von Verkehr und Fußgängern besitzen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Aufgabe der Situationsinterpretation auf Basis von Belegungskarten vorgeschlagen, die normalerweise hauptsächlich zur Sensordatenfusion und Objekterkennung genutzt werden. Vorteile von Belegungskarten gegenüber Kamerabildern bezüglich der Straßentyp-Klassifikation sind vor allem deren Beleuchtungsunabhängigkeit und ihre Fähigkeit verschiedene Sensortypen in einer gemeinsamen, abstrahierten Repräsentation darzustellen. Ziel dieser Arbeit ist die vier Umgebungstypen, Autobahn, Landstraße, Parkplatz und Stadt zu unterscheiden. Eine Autobahn ist, im Gegensatz zu einer Landstraße, durch ihre räumliche Trennung von gegenläufigen Verkehr gekennzeichnet, als auch durch eine geringe Anwesenheitswahrscheinlichkeit von Menschen auf der Fahrbahn. Die

vorliegende Arbeit stellt mehrere Klassifikationsansätze vor, wobei die Klassifikation lediglich auf der Auswertung von Belegungskarten beruht, ohne Hinzunahme von Bild- oder Karteninformationen. Die Belegungskarten werden hierbei wie Bilder behandelt, wodurch man gängige Bildverarbeitungsmethoden, wie zum Beispiel Convolutional Neural Networks (CNN) [16] direkt darauf anwenden kann. Unter der Annahme dass CNN's, im Vergleich zu gängigen Merkmalsextraktoren, viel besser dazu in der Lage sind angepasste Bildmerkmale zu extrahieren, werden die Ergebnisse der CNN-basierten Klassifikation mit Ergebnissen aus Klassifikationen mit Support Vector Machines (SVM's) verglichen. Hierbei verwendet der SVM-basierte Klassifikator gängige bildbasierte Merkmalsextraktoren. Der vorgestellte Ansatz soll einen ersten Schritt in Richtung Situationsinterpretation basierend auf Belegungskarten darstellen, wobei in Zukunft immer mehr Situationen, wie z.B. „Auffahrt“, „Abfahrt“ oder „Kreuzung“ hinzugefügt werden sollen.

Bestehende Arbeiten, die die Klassifikation von Straßentypen thematisieren, fokussieren sich vor allem auf Kamerabilder. Sikiric et al. [2] vergleichen dazu mehrere Bilddeskriptoren, um typische Verkehrsszenarien zu klassifizieren. In Mioulet et al. [3] wird eine Gabor-Filterbank verwendet, die es ermöglicht den aktuellen Straßentyp zu kategorisieren. Zur Bestimmung der aktuellen Straßenumgebung wird in Tang et al. [4] eine Menge an Farb- und Texturmerkmalen in bestimmten Bildregionen verwendet. Im Gegensatz zu den beschriebenen bildbasierten Verfahren wird in Taylor et al. [5] Datamining in Fahrzeugbussignalen betrieben, um den vorherrschenden Straßentypen zu bestimmen oder werden in Hellbach et al. [6] Belegungskarten zur semantischen Klassifikation von Innenräumen verwendet.

2. Erstellung von Belegungskarten

Kartierung anhand von Belegungskarten [7] ist eine gängige Methode zur Fusion statischer Hindernisse. Hierbei wird die 3D Umgebung in ein 2D-Raster überführt, wobei jede Zelle des Rasters eine Belegungswahrscheinlichkeit erhält. Ein inverses Sensormodell wird verwendet, um sowohl die Unsicherheit der Hindernismessungen, als auch den vorhandenen frei befahrbaren Raum zu berechnen. Dieses Modell vergibt eine Belegungswahrscheinlichkeit an jede Zelle, die vom Strahl einer Messung geschnitten wird. In der von uns verwendeten Verarbeitungskette wird für jeden Sensortyp eine Belegungskarte erstellt, deren Hinderniswahrscheinlichkeiten über die Zeit in eine akkumulierte Karte je Sensortyp eingetragen werden. Die akkumulierten Karten der Sensoren werden schließlich in eine einzige Belegungskarte zusammengeführt. Die von uns verwendete Dempster-Shafer-basierte Kartenfusion (Pagac et al. [8]) definiert jede Zelle einer Hinderniskarte als entweder belegt (O) oder frei (F). For-

mal ist diese Unterscheidung durch $\Theta = \{O, F\}$ definiert. Entsprechend der Dempster-Shafer-Theorie ist eine Vertrauensmaß zu jedem Element 2^Θ zugeordnet, anstelle zu den einzelnen Elementen von Θ , wie es in der Bayesischen Fusion von Belegungskarten der Fall ist. Detaillierte Angaben zum Fusionsalgorithmus sind in [9] aufgeführt.

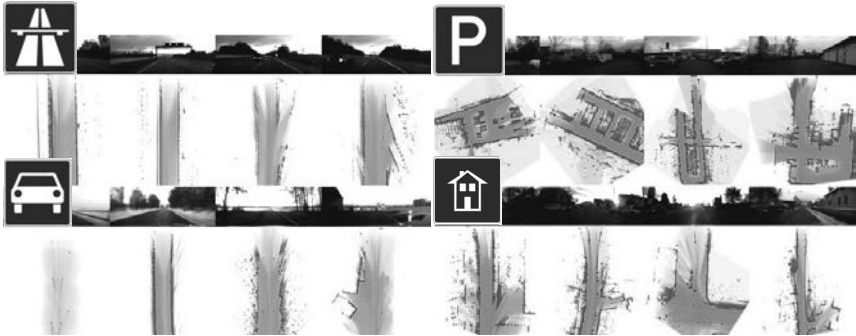


Bild 1: Belegungskarten mit Hindernissen (rot) und Freiraum (grün) in verschiedenen Situationen, beginnend mit Autobahn (links oben), über Landstraße (links unten) und Parkplatz (recht oben) bis innerstädtischen Szenarien (rechts unten).

3. Klassifikation mit SVMs

Zur Unterscheidung von Belegungskarten anhand eines SVM-Klassifikators werden mehrere gängige globale Bildmerkmale verglichen, die im Folgenden kurz beschrieben sind.

3.1. Merkmalsextraktion

Aufgrund der Ähnlichkeit der vorgegebenen Klassifikationsaufgabe zur Bildkategorisierung werden an dieser Stelle Merkmale verwendet, die in diesem Gebiet angewandt werden. Die aus den Belegungskarten erstellten Bilder repräsentieren die Belegungswahrscheinlichkeiten, wie zum Beispiel in Bild 1 dargestellt. Jedes Bild wird als Eingabe zu den verschiedenen Merkmalsextraktoren verwendet.

3.1.1. PCA

Die Hauptkomponentenanalyse (PCA) transformiert die Daten in ihre linear unkorrelierten Komponenten, mit dem Ziel unwichtige Komponenten zu entfernen und damit den Merkmals-

raum zu verkleinern. Die PCA wurde direkt auf alle Belegungskarten des Trainingsdatensatzes angewandt.

3.1.2. CENTRIST

Wie in [10] beschrieben repräsentieren Merkmale des Census Transform Histogram hauptsächlich strukturelle Eigenschaften eines Bildes. Hierbei werden Kantenmuster von örtlich begrenzten Bildausschnitten berechnet.

3.1.3. Gist

Der Gist (dt. Hauptinhalt) Deskriptor [11] wurde entworfen, um die "räumliche Hülle" einer Szene zu beschreiben. Als "räumliche Hülle" beschreiben die Autoren die Natürlichkeit, Offenheit, Rauheit und Ausdehnung einer Szene.

3.1.4. PHOG

Merkmale des Pyramid Histogram of Gradients [12] sind eine Erweiterung der bekannten Histogram of Gradients (HOG) Merkmale. Sie besitzen zusätzlich eine räumliche Kodierung der Merkmalsposition unter Verwendung einer Bildpyramide.

3.2. Klassifikation

In dieser Arbeit werden SVM-Klassifikatoren [13] verwendet, die mit Hilfe von Fehlerkorrektur-Codes [14] zur Mehrklassen-Klassifikation erweitert wurden. Ein Eins-gegen-Eins Schema, dass paarweise getrennte Klassifikatoren generiert, wurde verwendet, um die Klassen zu kodieren [15]. Dies resultiert in $K * (K - 1) / 2$ Binärklassifikatoren, wobei $K=4$ der Anzahl an zu unterscheidenden Klassen entspricht. Das Resultat der Klassifikation ist dann die Klasse, die die Gesamtkosten aller Binärklassifikatoren minimiert.

4. Klassifikation mit CNNs

Im Gegensatz zum zweistufigen Verfahren des vorangegangenen Abschnitts, ermöglichen CNN's [16] sowohl eine automatische Merkmalsextraktion, als auch die Möglichkeit mehr als zwei Klassen voneinander zu unterscheiden. Durch diese beiden Eigenschaften werden CNN's in letzter Zeit bevorzugt zur Bildklassifikation und Spracherkennung herangezogen. Wie schon im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, werden im vorgestellten Algorithmus die Belegungskarten als Bilder interpretiert, wobei die Farbwerte die Wahrscheinlichkeit für eine belegte bzw. freie Zelle widerspiegeln. Die Verwendung eines CNN-basierten Klassifikators beruht auf der Beobachtung, dass Belegungsgitter Informationen beinhalten können, die

schwer von gängigen Merkmalsextraktoren modelliert werden können. Außerdem ist es bei CNN's möglich, dass einfache Merkmale zu Konzepten höherer Ebenen, wie zum Beispiel: "Baum" oder "Leitpfosten", kombiniert werden. Diese können dann wiederum der Unterscheidung der Straßentypen dienlich sein.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Netzwerk-Topologien aus der Literatur (AlexNet [16], GoogLeNet [17], VGG16 [18]), als auch eine eigenkreierte Netzwerk-Topologie evaluiert. Jedes Netzwerk besitzt eine Ausgabeschicht mit vier Neuronen, die die vier Straßentypen repräsentieren. Im Gegensatz zu den Netzwerk-Topologien aus der Literatur, wurde die von uns vorgeschlagene Netzwerkarchitektur so gestaltet, dass kleine Merkmale, wie zum Beispiel einzelne belegte Zellen, repräsentiert werden können und gleichzeitig die Möglichkeit gegeben war die Verbindung der Merkmale auf einer hohen Ebene darzustellen.

Zu diesem Zweck wurde die Gesamtiefe des Netzwerks auf 9 Schichten festgelegt, wobei eine kleine Kernelgröße von 8x8 Pixeln für die erste Faltungsschicht gewählt wurde. Die ersten sechs Schichten beinhalten eine Kombination von Faltungen, Rectangular Linear Units (ReLU), Pooling und Normalisierungen. Die erste Schicht besteht aus 48 Faltungskernen, Schicht zwei bis sechs jeweils aus 256 Faltungskernen. Die finalen zwei Schichten sind voll verbunden, mit 4092 (Schicht sieben) und 2048 Neuronen (Schicht acht). Im Vergleich zu den Netzwerk-Topologien aus der Literatur beinhaltet die erstellte Topologie vergleichsweise wenig Neuronen, was einerseits dem Overfitting entgegenwirken, andererseits geringere Trainingszeiten ermöglichen soll.

5. Resultate

5.1. Datenakquise

Die Sensorkonfiguration unseres Testfahrzeugs umfasste vier Nahbereichs-Radare in den Stoßfängern vorn und hinten, einen Fernbereichs-Radar sowie einen Lidar im vorderen Stoßfänger und ein Stereo-Kamerasystem hinter der Frontscheibe. Die Konfiguration ist schematisch in Bild 2 dargestellt. Für alle Experimente wird ein Belegungsgitter der Größe 100m x 100m, mit einer Auflösung von 0.1m, verwendet. Das Ego-Fahrzeug ist in der Mitte der Belegungskarte zentriert, wobei die Karte in einem Vorverarbeitungsschritt so gedreht wurde, dass das Fahrzeug nach oben zeigt. Die Größe der aus den Belegungskarten erstellten Bilder wurde mit Hilfe bilinearer Interpolation auf 256 x 256 Pixel reduziert, um sowohl Training, als auch Auswertung zu beschleunigen.

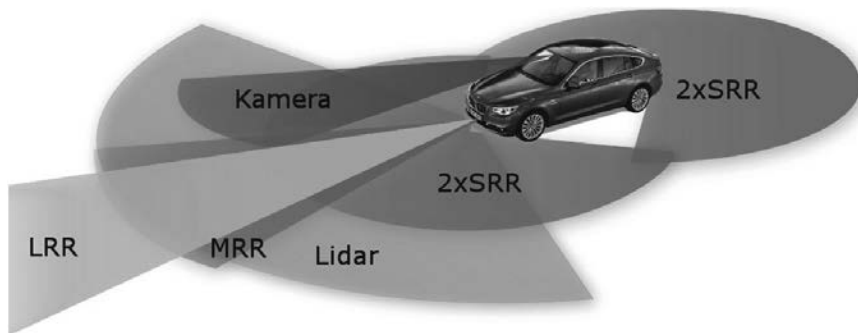


Bild 2: Die Sensorkonfiguration unseres Testfahrzeugs, einschließlich Long-Range-Radar (LRR), Mid-Range-Radar (MRR), Short-Range-Radar (SRR), Lidar und Kamera.

Die Umgebungsbedingungen der aufgenommenen Szenen umfassen sowohl Tag- als auch Nachtfahrten, Sonnenschein, bewölkten Himmel, Regen und sogar Schnee, um eine gewisse Variation zu gewährleisten. Um eine aussagekräftige Menge an Daten zu erhalten, wurden jeweils alle 10m (Parkplatz), 20m (Stadt) bzw. 40m (Autobahn und Landstraße) Bilder aus den Belegungskarten erstellt. Insgesamt wurden pro Klasse 700 Bilder zum Training und 150 Bilder zur Validierung erzeugt. Beispielbilder von Belegungskarten sind in Bild 1 gezeigt.

5.2. Implementierung und Parameter

Die SVM-basierte Klassifikation, als auch die dafür nötige Merkmalsextraktion wurde in Matlab unter Zuhilfenahme der zur Verfügung stehenden SVM- und PCA-Funktionen, durchgeführt. Weiterhin wurden quelloffene Implementierungen der Merkmalsextraktoren Gist, PHOG und CENTRIST verwendet. Alle Merkmale wurden auf Mittelwert Null und Einheitsvarianz normalisiert. Sequentielle Optimierung mit einem Soft-Margin-Parameter von 0,01 wurde verwendet, um die SVM zu trainieren. Die Größe des PCA Merkmalsraums beträgt 100 Dimensionen und stellt damit den kleinsten verwendeten Merkmalsraum dar. CENTRIST verwendet 256 Dimensionen mit einem 8 Bit Histogram. Gist implementiert eine Gabor-Filter-Bank mit 4 Skalen und 8 Orientierungen in einem 512 Dimensionen großen Merkmalsraum. PHOG stellt mit 680 Dimensionen den größten Merkmalsraum dar und wurde mit 3 Pyramiden und 8 Bins, die den Winkel zwischen 0° und 360° beschreiben, initialisiert.

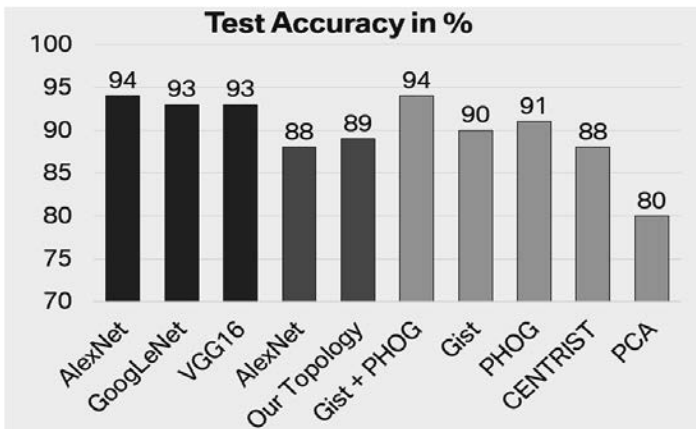


Bild 3: Testgenauigkeit (in Prozent) der Klassifikation mit SVM's (hellblau), zufällig initialisierten Netzen (blau) und vortrainierten Netzen (dunkelblau).

Die CNN's wurden unter Zuhilfenahme von Caffe [19] modelliert, trainiert und evaluiert. Die gesammelten Trainingsdaten wurden entweder dazu verwendet eine untrainierte Topologie mit zufällig initialisierten Gewichten zu trainieren oder bereits auf ImageNet-Daten trainierte Netzwerke an die Klassifikationsaufgabe anzupassen (fine-tuning). Bedingt durch die eher geringe Menge an Trainingsdaten (700 pro Klasse) hat sich die Optimierung mit AdaDelta [20] als erfolgsversprechend herausgestellt. Die Lernrate wurde bei zufällig initialisierten Netzen auf 0,01 und bei bereits trainierten Netzwerken auf 0.001 festgelegt. In beiden Fällen wurde eine Batchgröße von 50 und ein Momentum von 0.9 verwendet.

5.3. Auswertung

Für einen allgemeinen Vergleich der vorgeschlagenen Methoden wurde die Test-Genauigkeit der erlernten Klassifikatoren evaluiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 zusammengefasst. Sowohl die SVM-basierte als auch die CNN-basierte Variante waren dazu in der Lage, 94 % der Test-Daten korrekt zu klassifizieren. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Fusion von Gist und PHOG-Merkmalen auf Merkmals-Ebene für den SVM-Ansatz die besten Resultate erzielt. Andere Ansätze für die Fusion von Merkmals-Ebenen haben die Klassifizierungs-Genauigkeit nicht verbessert und sind daher in der Abbildung nicht berücksichtigt. CNN-Topologien, die auf ImageNet vortrainiert wurden und lediglich über fine-tuning der Klassifikationsaufgabe angepasst wurden, übertrafen zufällig initialisierte Netzwerke, obwohl sich die in ImageNet enthaltenen Daten fundamental von den verwendeten Bildern der Hindernis-

karten unterscheiden. Dies kann größtenteils auf die vergleichsweise kleine Menge von Trainings-Beispielen zurückgeführt werden, die es nicht erlaubt hat eine ausreichende Menge starker Merkmale zu erlernen. Typischerweise ist ein Trainings-Set mit 10000 Proben pro Klasse für ein zufällig initialisiertes Netzwerk dieser Größe erforderlich. In der Menge von Netzwerken, die wir von Grund auf trainierten, verhielt sich das selbst-erstellte Netzwerk marginal besser als ihre Konkurrenten. Aufgrund der geringen Anzahl von Trainings-Bildern kann die verbesserte Performance jedoch nicht eindeutig der veränderten Netzwerk-Struktur zugeschrieben werden.

Während die allgemeine Performance der besten SVM-basierten und CNN-basierten Klassifizierungs-Methoden vergleichbar zu sein scheint, enthüllen die Konfusions-Matrizen in Abbildung 4 leichte Unterschiede zwischen deren pro-Klassen Performance. Die Klassen Landstraße, Autobahn und Parkbereich haben eine höhere Erkennungs-Genauigkeit in dem CNN-basierten Ansatz. Hingegen besitzt die SVM-basierte Methode eine höhere Genauigkeit hinsichtlich der Klasse Stadt. Bemerkenswerterweise war die CNN-Methode dazu in der Lage eine so hohe Genauigkeit (100% der Bilder wurden korrekt klassifiziert) für die Klasse Autobahn zu erzielen, was darauf hinweist, dass unser Test-Set noch zu klein ist. Die im Vergleich zu SVM geringe Genauigkeit des CNN in Bezug auf die Klasse Stadt kann ebenso auf eine zu geringe Trainingsmenge zurückgeführt werden. Anscheinend konnte das CNN nicht genügend Merkmale zur Unterscheidung einer Stadtszene lernen.

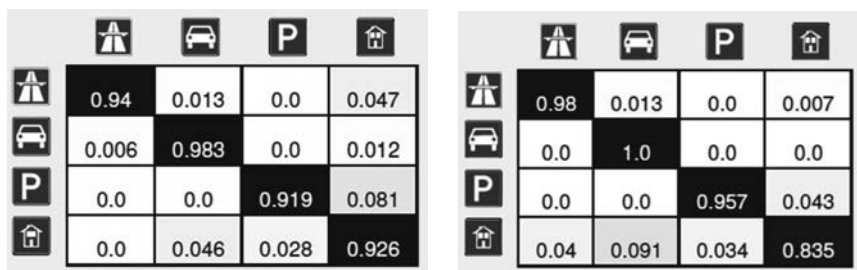


Bild 4: Konfusionsmatrizen der SVM-basierten Klassifikation (links) und der Klassifikation basierend auf tiefen neuronalen Netzen (rechts).

6. Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben unterschiedliche Methoden für die Klassifizierung von Straßen-Typen auf der Basis von fusionierten Belegungskarten vorgestellt. Unser Leitgedanke war es, dass Problem

von zwei Seiten anzugehen: aus der Perspektive des maschinellen Lernens mit eindeutig getrennter Merkmals-Extraktion und –Klassifizierung, und aus der Perspektive des Deep Learnings. Wir haben erwartet, dass ein CNN-basierter Klassifikator sein SVM-basiertes Gegenstück übertreffen würde. In Bezug auf diese Klassifikationsaufgabe haben wir jedoch festgestellt, dass der SVM Klassifikator bei einer sinnvollen Auswahl von handgefertigten Merkmalen ebenso leistungsfähig ist wie tiefe neuronale Netzwerke. Offenbar können typische Bild-Merkmale mit großem Erfolg direkt auf Belegungskarten angewendet werden. Da Belegungskarten jedoch nicht genau die gleichen Eigenschaften besitzen wie fotografische Bilder waren zahlreiche Versuche mit Merkmalsextraktoren notwendig, um verlässliche Ergebnisse zu produzieren.

Die Extraktion von Merkmalen wird natürlich überflüssig, wenn ein CNN eingesetzt wird, aber auch die Bestimmung von passenden Netzwerk-Topologien und Optimierungs-Parametern ist aufwendig. Wir haben festgestellt, dass der Einsatz von vor-trainierten CNNs verglichen mit solchen, die von Grund auf trainiert wurden, die Klassifizierungs-Raten signifikant verbessert, obwohl diese Netzwerke ein Vor-Training mit fotografischen Bildern von ImageNet durchlaufen hatten.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Größe unserer Trainings-Daten Menge ein limitierender Faktor dafür war, dass die CNNs ihr volles Potenzial entfalten konnten. Eine Erhöhung der Anzahl an Trainings-Proben und der Anzahl an berücksichtigten Klassen ist der nächste anstehende Schritt auf unserer Agenda. Mögliche Situationen, die anhand von Hinderniskarten erkannt werden sollen, sind Baustellen, Autobahn-Auf- und Abfahrten, Stau-Enden, Unfälle und Straßen-Blockaden. Darüber hinaus wird ein Fokus unserer zukünftigen Arbeit darauf liegen, die Eigenschaften von Zeitreihen aus einer Folge von Belegungskarten auszunutzen. Zweifelsohne gehen Informationen verloren, wenn jede aufeinander folgende Karte unabhängig von den anderen klassifiziert wird und die vorangegangenen Klassifikationen außer Acht gelassen werden. Dieses Problem kann bewältigt werden, wenn Klassen-Transitionen zum Beispiel mithilfe eines Hidden-Markov-Modells dargestellt werden. Dahingehend wäre es ebenso eine weitere vielversprechende Verbesserung auf rekurrente Neuronale Netze aufzubauen. Wir planen außerdem die Bilder von Videokameras zur Klassifikation hinzuzufügen und die Fusion auf Merkmals- und Klassifikator-Ebene zu vergleichen. Darüber hinaus muss die Topologie der CNNs weiter angepasst werden, um besser mit den spärlich belegten Hinderniskarten umgehen zu können und um den Berechnungsaufwand weiter zu verringern.

7. Literatur

- [1] Marques O., Barenholtz E., and Charvillat V.: Context modeling in computer vision: techniques, implications, and applications. *Multimedia Tools and Applications*, 2011, pp. 303–339.
- [2] Sikirić I., Brkić K., Krapac J., and Šegvić S.: Image representations on a budget: Traffic scene classification in a restricted bandwidth scenario, *Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE, 2014, pp. 845–852.
- [3] Mioulet L., Breckon T. P., Mouton A., Liang H., and Morie T.: Gabor features for real-time road environment classification, *International Conference on Industrial Technology*. IEEE, 2013, pp. 1117–1121.
- [4] Tang I. and Breckon T. P.: Automatic road environment classification, *Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no. 2, 2011, pp. 476–484.
- [5] Taylor P., Anand S. S., Griffiths N., Adamu-Fika F., Dunoyer A., and Popham T.: Road type classification through data mining, *International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. ACM, 2012, pp. 233–240.
- [6] Hellbach S., Himstedt M., Bahrmann F., Riedel M., Villmann T. and Böhme H.-J.: Find rooms for improvement: Towards semi-automatic labeling of occupancy grid maps, *International Conference on Neural Information Processing*. 2014, pp. 543 – 552.
- [7] Elfes A.: Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation, *Computer*, vol. 22, no. 6, 1989, pp. 46–57.
- [8] Pagac D., Nebot E., and Durrant-Whyte H.: An evidential approach to map-building for autonomous vehicles, *Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 4, 1998, pp. 623–629.
- [9] Seeger C., Manz M., Matters P., and Hornegger J.: Locally adaptive discounting in multi sensor occupancy grid fusion, *Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE, 2016.
- [10] Wu J. and Rehg J. M.: Centrist: A visual descriptor for scene categorization, *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 33, no. 8, 2011, pp. 1489–1501.
- [11] Oliva A. and Torralba A.: Modeling the shape of the scene: A holistic representation of the spatial envelope, *International Journal of Computer Vision*, vol. 42, no. 3, 2001, pp. 145–175.
- [12] Bosch A., Zisserman A., and Munoz X.: Representing shape with a spatial pyramid kernel, *International Conference on Image and Video Retrieval*, ser. CIVR. ACM, 2007, pp. 401–408.

- [13] Cortes C. and Vapnik V.: Support-vector networks, *Machine learning*, vol. 20, no. 3, 1995, pp. 273–297.
- [14] Dietterich T. G. and Bakiri G.: Solving multiclass learning problems via error-correcting output codes, *Journal of artificial intelligence research*, 1995, pp. 263–286.
- [15] Hsu C.-W. and Lin C.-J.: A comparison of methods for multiclass support vector machines, *Transactions on Neural Networks*, vol. 13, no. 2, 2002 pp. 415–425.
- [16] Krizhevsky A., Sutskever I., and Hinton G. E.: Imagenet classification with deep convolutional neural networks, *Advances in Neural Information Processing Systems 25*. Curran Associates, Inc., 2012, pp. 1097–1105.
- [17] Simonyan K. and Zisserman A.: Very deep convolutional networks for large-scale image recognition, *CoRR*, 2014.
- [18] Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S., Anguelov D., Erhan D., Vanhoucke V., and Rabinovich A.: Going deeper with convolutions, *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE*, 2015, pp. 1–9.
- [19] Jia Y., Shelhamer E., Donahue J., Karayev S., Long J., Girshick R., Guadarrama S. and Darrell T.: Caffe: Convolutional architecture for fast feature embedding, *International Conference on Multimedia. ACM*, 2014, pp. 675–678.
- [20] Zeiler M. D.: Adadelta: An adaptive learning rate method, *CoRR*, 2012.

Die Rolle des Fahrers beim teilautomatisierten Fahren im urbanen Raum

Dipl.-Psych. **C. Marberger**, Dr. **H. Mielenz**,
Robert Bosch GmbH, Renningen;
Dr. **F. Naujoks**, WIVW GmbH, Veitshöchheim

Kurzfassung

Der Beitrag beschreibt das Konzept einer teilautomatisierten Fahrzeugführung (SAE L2) für den urbanen Bereich mit kooperativen Elementen der Mensch-Maschine Interaktion. Die Funktion wurde in einem dynamischen Fahrsimulator vollständig implementiert und im Rahmen einer Nutzerstudie (n=22) mit einer Variante ohne automatisierte Querregelung und einer manuellen Fahrt verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass das umgesetzte Konzept der teilautomatisierten, kooperativen Fahrzeugführung in komplexen Fahrsituationen zu verzögerten Bremsingriffen mit sicherheitskritischen Auswirkungen führen kann. Die Ausführung fahrfremder Tätigkeiten nimmt anhand der Verhaltensdaten in kritischen Fahrphasen durch die Automatisierung nicht zu. Aufgrund der aufgetretenen negativen Verhaltenseffekte sowie der nur durchschnittlichen subjektiven Gesamtbewertung wird eine spezifische Überarbeitung des Interaktionskonzepts empfohlen.

Abstract

The article describes the concept of a partly automated driving system (SAE L2) for urban environments with specific elements of driver-vehicle cooperation. The system was fully implemented in a dynamic driving simulator and compared to assisted driving (without steering automation) and manual driving by end-users (n=22). The results show that the implemented interaction design can cause delayed brake responses with safety-critical consequences. According to the behavioral data, no increased engagement in secondary tasks was found for critical driving situations. Because of the revealed negative behavioral effects and the overall mediocre subjective assessment specific design refinements are recommended.

1. Hintergrund

Um die Vision des vollautomatisierten Fahrens Wirklichkeit werden zu lassen verfolgen viele Fahrzeughersteller und -zulieferer die Strategie die Automatisierungsstufen schrittweise zu erhöhen sowie die Nutzungskontexte zu erweitern. So werden Fahrerassistenzsysteme, die primär für den Autobahnkontext konzipiert wurden (z.B. ACC), kontinuierlich in Richtung Teil- und Hochautomatisierung weiterentwickelt. Da der Bedarf einer automatisierten Fahrzeugführung nachweislich auch für den urbanen Bereich vorhanden ist [1], werden bei Bosch Systemausprägungen einer teilautomatisierten Fahrzeugführung untersucht, die speziell für die Anforderungen städtischer Verkehrssituationen ausgelegt sind und den Fahrer als kooperatives Element in die Fahrzeugführung miteinbeziehen. Die Art und Weise, wie der Mensch in die teilautomatisierte Fahrzeugführung einbezogen wird, stellt dabei eine zentrale Herausforderung dar. Die Aufgabe des Fahrers muss einerseits leicht verständlich und attraktiv sein, andererseits aber auch die spezifischen technischen Unzulänglichkeiten der Teilautomatisierung vollständig kompensieren. Die strikte Reduktion der Rolle des Fahrers als passiver Überwacher und Beobachter wäre dabei nicht nur wenig attraktiv, sie führt überdies zu dauerhafter kognitiver Beanspruchung sowie - damit zusammenhängend - zu Ermüdung [2], [3]. Eine monotone Überwachungsaufgabe verleitet zudem zur Aufnahme fahrfremder Tätigkeiten während der automatisierten Fahrt [4], was im Falle einer Übernahmesituation das Situationsverständnis und damit die Verkehrssicherheit beeinträchtigen kann [5-7]. Um diese bekannten negativen Effekte zu vermeiden, wurden in der Literatur an verschiedenen Stellen Interaktionskonzepte vorgeschlagen, die durch häufige oder kontinuierliche Kooperation zwischen Fahrer und Automatisierung den Fahrer in der Regelschleife halten. Die H-Mode-Metapher oder das „Conduct-by-Wire“ Konzept sind Beispiele hierzu [8].

2. Beschreibung der fiktiven Funktion „Urbaner Assistent“

Der in diesem Beitrag im Fokus stehende fiktive „Urban Assist“ (UA) stellt gemäß SAE-, BAST- und NHTSA-Klassifikation ein teilautomatisiertes (Level 2) System dar, das sowohl die Längs- als auch die Querführung im urbanen Raum übernehmen kann, dabei aber vom Fahrer kontinuierlich überwacht und gegebenenfalls korrigiert werden muss. Die spezifischen Systemgrenzen umfassen vor allem Situationen mit Bedarf einer Vorfahrtsentscheidung, wofür aufgrund der beschränkten Zuverlässigkeit der Automatisierung der Fahrer einbezogen werden soll. Konkret betrifft dies das Fahrzeugverhalten

- an Signalanlagen, Stopp- und Vorfahrt-Achten-Schildern
- an Fußgängerüberwegen
- bei Abbiegevorgängen
- bei notwendigen Fahrstreifenwechseln

Zum Einbezug des Fahrers in die automatisierte Längsregelung im urbanen Raum wurde die Strategie des „kooperativen Bremsens“ untersucht. Bei dieser Strategie regelt die Längsautomatisierung lediglich auf Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie Sicherheitsabstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen. Vorfahrtsgeregelte Stellen im Streckenverlauf werden durch eine visuell/akustische Information spezifisch angekündigt (siehe Bild 1 links). Zur Beachtung von Vorfahrtsregelungen muss der Fahrer die Fahrzeuggeschwindigkeit manuell (wenn nötig bis in den Stillstand) durch einen vorübergehenden Bremseneingriff reduzieren. Die Teilautomatisierung bleibt dabei grundsätzlich aktiv und nimmt nach Fahrerintervention die Geschwindigkeitsregelung wieder auf. Zum Einbezug des Fahrers bei automatisierten Fahrstreifenwechseln wurde die Kooperationsstrategie „Freigabe“ untersucht. Bei dieser Strategie kann der Fahrer das gewünschte Manöver per Blinkerbetätigung auslösen. Die visuell-akustische Aufforderung vor notwendigen Fahrstreifenwechseln ist in Bild 1 (rechts) dargestellt.



Bild 1: Beispielhafte grafische Ausgaben des Urban Assist im Head-Up Display (HUD).

Links: Aufforderung zum „kooperativen Bremseneingriff“ vor einer Ampel. Rechts: Aufforderung zur „Freigabe“ eines Spurwechsels. Beide Aufforderungen werden mit dem gleichen akustischen „Gong“-Signal ausgegeben.

Zweck beider Kooperationsmechanismen ist zum einen, Systemgrenzen der Automatisierung überwinden zu können, zum anderen, das erforderliche Situationsbewusstsein durch regelmäßige Interaktion aufrechtzuerhalten. Für die Studie ergaben sich folgende Fragestellungen:

1. Wie wird eine teilautomatisierte Fahrzeugführung mit kooperativen Elementen von Nutzern verstanden, erlebt und genutzt?
2. Kommt es in Kooperationssituationen zu kritischen Vorfällen?
3. Wie wirkt sich die Teilautomatisierung auf den Umgang mit nicht-fahrrelevanten Tätigkeiten aus?
4. Welche Verhaltenseffekte entstehen bei einer ausschließlichen Automatisierung der Längsregelung (fiktives Assistenzsystem „Urban ACC“)?

Versuchsumgebung

Der Versuch wurde im dynamischen Fahrsimulator des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften (WIVW GmbH) durchgeführt. Die Fahrzeugkonsole ist voll instrumentiert und entspricht der eines seriengefertigten Fahrzeugs mit Automatikgetriebe (BMW 510i). Die für die Studie relevanten Systeme Urban Assist (UA) sowie Urban ACC (UACC) waren prototypisch vollständig implementiert. Das Blickverhalten der Probanden wurde mit Hilfe des Blickfassungssystems SmartEye erfasst.

Stichprobe

Die Stichprobe setzte sich aus 22 Probanden (14 männlich) aus dem Testfahrerpanel des WIVW zusammen. Die Probanden hatten ein durchschnittliches Alter von 35 Jahren ($SD = 13.97$; Fahrerfahrung: $M = 16.27$ Jahre, $SD = 12.67$). Es wurden Probanden mit und ohne vorherige ACC-Erfahrung ausgewählt (durchschnittliche ACC-Erfahrung im Fahrsimulator: 3.82 Stunden, $SD = 4.57$).

Versuchsablauf, Instruktion und Messgrößen

Teil 1 – Eingewöhnungsfahrt (ca. 20 min)

Zunächst wurden die Probanden mit der Bedienung beider Systeme (UA und UACC) vertraut gemacht. Nach einer schriftlichen und mündlichen Instruktion über Funktionalität und Systemgrenzen absolvierten die Probanden eine Reihe von Bediensituationen mit UA (z.B. Aktivierung, Deaktivierung, Abbiegen, Fahrstreifenwechsel und Anhalten an Lichtsignalanlagen) und wurden anschließend hinsichtlich der Verständlichkeit des Anzeige- und Bedienkonzepts befragt. Etwaige Missverständnisse (z.B. dass die untersuchten Systeme selbstständig vorrangberechtigte Verkehrsteilnehmer beachten würden) wurden vom Versuchsleiter bei Bedarf korrigiert. Entsprechend den vorliegenden Automationsstufen wurden die Probanden instruiert, dass sie die Verkehrssituation stets überwachen müssen um im Fall von Systemgrenzen kontrollierend einzugreifen.

Teil 2 – Fahrer-Fahrzeug-Verhalten in urbanen Standardsituationen (ca. 30 min)

Anschließend absolvierten die Probanden unterschiedliche Standardsituationen, die aufgrund ihrer Repräsentativität für das urbane Verkehrsgeschehen ausgewählt wurden (siehe Tabelle 1 und 2). Dieser Studienteil wurde von allen Probanden mit UACC und UA absolviert (Reihenfolge ausbalanciert). In Hinblick auf die Anforderungen der teilautomatisierten, kooperativen Fahrzeugführung wurden folgende Arten von Situationen untersucht:

1. *Kooperatives Bremsen*: Die Fahrt beinhaltete verschiedene Situationen, in denen die Probanden die Geschwindigkeit in der Anfahrt manuell reduzieren mussten (z.B. Durchfahrt von Kreuzungen ohne Vorrangberechtigung, Fußgängerüberwege oder Lichtsignalanlagen, siehe Tabelle 1). In diesen Situationen wurde evaluiert, ob und in welchem Abstand zu den jeweiligen Situationen die Probanden bremsbereit waren (gemessen über einen Infrarot-Sensor im Bremspedal) und mit dem Bremsen begannen. Hierbei war insbesondere von Interesse, ob der gewählte Ansatz des kooperativen Bremsens zu situationsadäquaten Fahrerreaktionen bei beiden Systemausprägungen führen würde.
2. *Teilautomatisierter Fahrstreifenwechsel*, beispielsweise aufgrund der Blockierung eines Fahrstreifens durch eine Baustelle (siehe Tabelle 2): In diesen Situationen wurde evaluiert, wie schnell die Probanden innerhalb der jeweiligen Situation den geforderten Fahrstreifenwechsel durchführten, und ob die Automation des Fahrstreifenwechsels zu verzögerten Fahrerreaktionen führte. Nach jeder Situation wurden die Probanden anhand einer standardisierten Skala zur Situationskritikalität befragt [9]. Hierbei wird von den Probanden sowohl eine verbale Einschätzung („nichts bemerkt“, „harmlos“, „unangenehm“, „gefährlich“ oder „nicht kontrollierbar“) als auch ein quantitatives Urteil abgegeben (0-10).

Tabelle 1: Versuchssituationen „kooperatives Bremsen (KB)“.

ID	Situation	Erforderliche Reaktion
KB1	Linksabbiegen an innerstädtischer Kreuzung, Fahrer ist vorrangberechtigt	Bremsbereitschaft, kein Eingriff nötig
KB2	Linksabbiegen an innerstädtischer Kreuzung ohne Vorfahrtsregelung, Gegenverkehr muss Vorrang gewährt werden	Bremseingriff
KB3	Rechtsabbiegen an innerstädtischer Kreuzung ohne Vorfahrtsregelung	Bremsbereitschaft, kein Eingriff nötig
KB4	Rechtsabbiegen an innerstädtischer Kreuzung mit Lichtsignalanlage, aus gleicher Richtung kommender Radfahrer kreuzt auf Radweg	Bremseingriff
KB5	Annäherung an Lichtsignalanlage während Rotphase, Fahrzeug muss vom Probanden gebremst werden	Bremseingriff
KB6	Annäherung an Lichtsignalanlage während Rotphase mit Vorderfahrzeugen, Fahrzeug wird aufgrund der Reaktion auf Umgebungsverkehr durch UA/UACC abgebremst	Bremsbereitschaft, kein Eingriff nötig
KB7	Annäherung an Fußgängerüberweg	Bremsbereitschaft, kein Eingriff nötig
KB8	Annäherung an Fußgängerüberweg, Fußgänger überschreitet	Bremseingriff
KB9	Annäherung an Kreuzung, Proband ist nicht vorrangberechtigt (Beschilderung: Vorfahrt achten)	Bremseingriff
KB10	Annäherung an Kreuzung, Proband ist nicht vorrangberechtigt (Beschilderung: Vorfahrt achten), vorrangberechtigter PKW kreuzt	Bremseingriff
KB11	Annäherung an Kreuzung, Proband ist nicht vorrangberechtigt (Beschilderung: Stoppschild)	Bremseingriff
KB12	Annäherung an Kreuzung, Proband ist nicht vorrangberechtigt (Beschilderung: Stoppschild), vorrangberechtigter PKW kreuzt	Bremseingriff

Tabelle 2: Versuchssituationen „teilautomatisierter Fahrstreifenwechsel (FW)“.

ID	Situation	Erforderliche Reaktion
FW1 FW2	Fahrstreifenwechsel, um Navigation zu folgen (Situation wird zweimalig absolviert)	Fahrstreifenwechsel
FW3 FW4	Optionaler Fahrstreifenwechsel, um langsames Fahrzeug zu überholen (Situation wird zweimalig absolviert)	Fahrstreifenwechsel
FW5	Obligatorischer Fahrstreifenwechsel, da Fahrstreifen durch Baustelle blockiert ist	Fahrstreifenwechsel

Teil 3 – Umgang mit fahrfremden Tätigkeiten (ca. 15 min)

Abschließend absolvierten die Probanden eine weitere Strecke, jeweils mit UACC, UA oder ohne Unterstützung (Reihenfolge ausbalanciert). Die Strecke bestand aus einer simplen Folgefahrtsituation, dem Passieren eines Zebrastreifens (ohne anwesenden Fußgänger) und dem Rechtsabbiegen an einer Kreuzung (Reihenfolge ausbalanciert). In dieser Fahrt waren die Probanden dazu aufgefordert, eine natürliche Nebentätigkeit auszuführen, sofern die Fahrsituation dies zuließ, und sie selbst eine solche Tätigkeit im Straßenverkehr ausführen würden. Die Tätigkeit bestand aus einer Smartphone-Aufgabe (Wetter-App), die bereits in einer Feldstudie zum teilautomatisierten Fahren verwendet wurde [4]. Im Anschluss wurden die Probanden befragt, inwieweit sie unterschiedliche Nebentätigkeiten während der Fahrt

mit Teilautomation ausführen würden. Abschließend wurden verschiedene Aspekte des Nutzer-Erlebens sowie der Systemakzeptanz bzw. der Kaufabsicht anhand eines Fragebogens mit geschlossenem Antwortformat erhoben.

4. Ergebnisse

Erleben und Verhalten in kooperativen Bremssituationen

In wenig komplexen Verkehrssituationen wird die Notwendigkeit der Bremsbereitschaft bzw. des Bremsengriffs im Mittel als „harmlos“ beurteilt (siehe Tabelle 3). Der manuelle Bremsengriff erfolgt in ausreichendem Abstand zur kritischen Fahrsituation, so dass dort unabhängig von der Art der Automatisierung keine Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern auftreten. In Situationen, in denen keine manuelle Geschwindigkeitsreduktion nötig ist, unterlassen einige Fahrer den Bremsengriff vollständig.

Komplexere Fahrsituationen, insbesondere Abbiegesituationen und Situationen mit vorrangberechtigten Verkehrsteilnehmern, werden im Mittel als „unangenehm“ bzw. „gefährlich“ beurteilt. Dies betrifft insbesondere die Situation „Rechtsabbiegen – kreuzender Radfahrer“, bei der in der teilautomatisierten Fahrt acht Kollisionen sowie in der assistierten Fahrt eine Kollision auftritt ($X^2 = 6.07$, $df = 1$, $p = .014$). In dieser Situation wie auch beim Linksabbiegen (ohne Gegenverkehr) zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen UA und UACC bezüglich Bremsbereitschaft und Bremsbeginn. Beide Größen deuten auf ein stärker verzögertes Interventionsverhalten der Probanden in der teilautomatisierten Fahrt hin (Situation „Rechtsabbiegen – kreuzender Radfahrer“: Bremsbereitschaft: $t = 3.42$, $df = 20$, $p = .003$, Bremsbeginn: $t = 4.48$, $df = 20$, $p < .001$, siehe Bild 2).

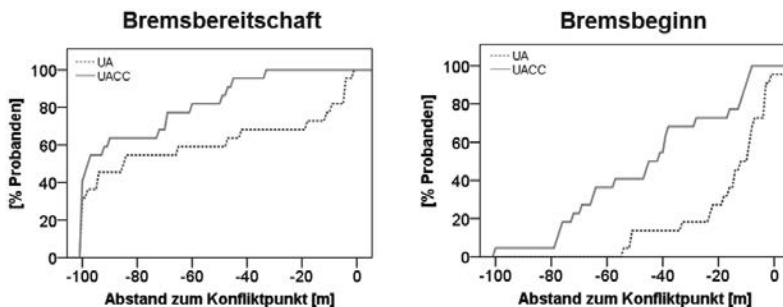


Bild 2: Kumulierte Häufigkeitsverteilung zu Bremsbereitschaft (links) und Bremsengriff (rechts) in der Situation: „Rechtsabbiegen – querender Radfahrer“.

Eine Detailanalyse der kritischen Rechtsabbiegesituation mit dem vorfahrtsberechtigten Fahrradfahrer ergibt folgendes Bild:

- Sieben von acht kollidierenden Probanden zeigen eine Kopfdrehung hin zum Radfahrer. Sechs Probanden geben jedoch an, den Radfahrer nicht oder zu spät gesehen zu haben.
- Verglichen mit Probanden, die nicht kollidieren, sind kollidierende Probanden deutlich später bremsbereit und beginnen signifikant später zu bremsen (mittlere Differenzen: Bremsbereitschaft: $\Delta M = 14.08$ m, $t = -1.07$, $df = 41$, $p = .289$; Bremsbeginn: $\Delta M = 32.77$ m, $t = -3.55$, $df = 41$, $p = .001$).

Erleben und Verhalten bei Fahrstreifenwechseln

Die Freigabe automatisierter Fahrstreifenwechsel, die zur Befolgung der geplanten Fahrtroute nötig sind, erfolgt in der Fahrt mit Urban Assist im Mittel später als ein manueller Fahrstreifenwechsel in der Fahrt mit Urban ACC (Werte siehe Tabelle 4). In den übrigen untersuchten Fahrstreifenwechseln finden sich keine Unterschiede darin, wie zügig Fahrstreifenwechsel durchgeführt werden. Die Situationen werden insgesamt als „harmlos“ beurteilt. Es sind keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen UA und UACC in der Einschätzung der Situationskritikalität nachweisbar (alle $p > .050$).

Bereitschaft zu fahrfremden Tätigkeiten

Die Bereitschaft zur Ausführung fahrfremder Tätigkeiten wurde über die von den Fahrern getätigten Eingaben in das Smartphone ermittelt [4]. In keiner der untersuchten Situationen findet sich verglichen mit der nicht-assistierten Fahrt eine verstärkte Zuwendung zur Smartphone-Aufgabe beim assistierten und teilautomatisierten Fahren (Folgefahrt: $F(2,42) = 2.49$, $p = .095$; Zebrastrifen: $F(2, 42) = 1.89$, $p = .164$; Rechtsabbiegen – querender Radfahrer: $F(2,42) = 0.69$, $p = .507$). Im Anschluss an die Fahrt sollten die Probanden angeben, inwieweit sie verschiedene Nebentätigkeiten mit UACC und UA während der Fahrt ausführen würden. Die Ergebnisse sind in Bild 3 dargestellt. Verglichen mit dem assistierten Fahren ist die Bereitschaft der Probanden für verschiedenste Tätigkeiten beim teilautomatisierten Fahren gegenüber dem assistierten Fahren erhöht.



Bild 3: Vergleich der Bereitschaft zur Ausführung fahrfremder Tätigkeiten mit UACC und UA. Die Bereitschaft wurde über Selbstauskunft (Zustimmung/Ablehnung zur jeweiligen Tätigkeit) durch einen Fragebogen erfasst.

Tabelle 3: Überblick über Ergebnisse in Fahrsituationen mit „kooperativem Bremsen“ aus Teil 2 (M = mittlerer Abstand zur Situation in Meter, N = Anzahl an Probanden, die in der Anfahrt bremsbereit sind oder eine Bremsreaktion zeigen); * = signifikanter Unterschied ermittelt über t-test für abhängige Stichproben.

ID	Situation	Bremsbereitschaft				Bremsbeginn				Kritikalisurteil			
		M		N		M		N		M		Kategorie	
		UACC	UA	UACC	UA	UACC	UA	UACC	UA	UACC	UA	UACC	UA
KB1	Linksabbiegen – ohne Gegenverkehr	87.4	77.2 *	22	22	62.6	47.5 *	22	22	3.1	3.2	harmlos	harmlos
KB2	Linksabbiegen mit Gegenverkehr	51.5	39.6	21	21	13.4	17.4	22	21	3.1	4.4 *	harmlos	unangenehm
KB3	Rechtsabbiegen ohne Verkehr	47.8	66.3	17	11	16.0	7.7	1	3	2.0	2.5	harmlos	harmlos
KB4	Rechtsabbiegen – kreuzender Radfahrer	82.4	64.4 *	22	21	45.5	17.2 *	22	21	5.3	7.2 *	unangenehm	gefährlich
KB5	Lichtsignalanlage rot	62.9	62.1	22	22	48.3	48.1	22	22	2.0	1.5	harmlos	harmlos
KB6	Lichtsignalanlage rot mit Vorderfahrzeug	74.5	66.3	11	13	51.2	42.8	9	8	2.0	1.8	harmlos	harmlos
KB7	Fußgängerüberweg – ohne Fußgänger	76.5	63.4 *	18	16	55.0	50.1	12	7	2.8	2.8	harmlos	harmlos
KB8	Fußgängerüberweg – überschreitender Fußgänger	72.5	68.7	21	21	58.7	53.5	22	22	2.1	2.5	harmlos	harmlos
KB9	Kreuzen (Vorfahrt achten)	68.5	67.6	22	22	46.4	40.1	21	21	3.3	3.0	harmlos	harmlos
KB10	Kreuzen (Vorfahrt achten) – vorrangberechtigter PKW	71.2	73.7	22	21	51.4	46.4	22	22	4.2	4.0	unangenehm	unangenehm
KB11	Kreuzen (Stoppschild)	84.4	87.6	22	22	64.7	65.8	22	22	2.3	1.8	harmlos	harmlos
KB12	Kreuzen (Stoppschild) – vorrangberechtigter PKW	77.5	78.3	22	22	52.9	55.2	22	22	3.1	2.8	harmlos	harmlos

Tabelle 4: Überblick über Ergebnisse für Situationen „Fahrstreifenwechsel“ aus Teil 2 (M = mittlerer Abstand zur letztmöglichen Wechselsmöglichkeit in Meter (FW1, FW2 und FW5) bzw. zum Szenarienbeginn (FW 3 und FW 4), N = Anzahl der Probanden, die den Fahrstreifenwechsel rechtzeitig ausführen); * = signifikanter Unterschied ermittelt über t-test für abhängige Stichproben.

ID	Situation	Initiierung Fahrstreifenwechsel						Kritikalitätsurteil			
		M			N			M		Kategorie	
		UACC	UA		UACC	UA		UACC	UA	UACC	UA
		129	116*		22	21		2.9	3.5	harmlos	harmlos
FW1	Fahrstreifenwechsel aufgrund Navigation#1										
FW2	Fahrstreifenwechsel aufgrund Navigation#2	172	125*		22	19		2.4	2.5	harmlos	harmlos
FW3	Fahrstreifenwechsel fahrerinitiiert#1	203	169		22	22		1.4	1.8	harmlos	harmlos
FW4	Fahrstreifenwechsel fahrerinitiiert#2	201	261		22	22		1.8	2.3	harmlos	harmlos
FW5	obligatorischer Fahrstreifenwechsel (wegen Blockade)	161	135		22	22		2.2	3.0	harmlos	harmlos

Gesamtbewertung

Unmittelbar nach der Fahrt mit dem jeweiligen System wurden Fragen zur subjektiv erlebten Anstrengung während der Fahrt gestellt. Die Ergebnisse für die Fahrt ohne Nebenaufgaben (Teil 2) zeigt keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Systemausprägungen UA und UACC bezüglich der wahrgenommenen körperlichen und mentalen Anstrengung (mittlere Differenzen: körperliche Anstrengung: $\Delta M = 0.05$, $t = 0.08$, $df = 21$, $p = .937$; mentale Anstrengung: $\Delta M = 0.23$, $t = 0.42$, $df = 21$, $p = .682$, siehe Bild 4). Die Auswertung von Teil 3 (Fahrt mit Nebenaufgabe) erlaubt zusätzlich den Vergleich der subjektiven Beurteilungen mit der manuellen Fahrt. Die Ergebnisse deuten auf eine geringfügige mentale Entlastung des Fahrers durch den Urban Assist hin (UA vs. manuelle Fahrt: körperliche Anstrengung: $F(1, 21) = 1.24$, $p = .278$; mentale Anstrengung: $F(1, 21) = 3.85$, $p = .063$; UACC vs. manuelle Fahrt: körperliche Anstrengung: $F(1, 21) = 0.91$, $p = .351$; mentale Anstrengung: $F(1, 21) = 2.74$, $p = .113$).

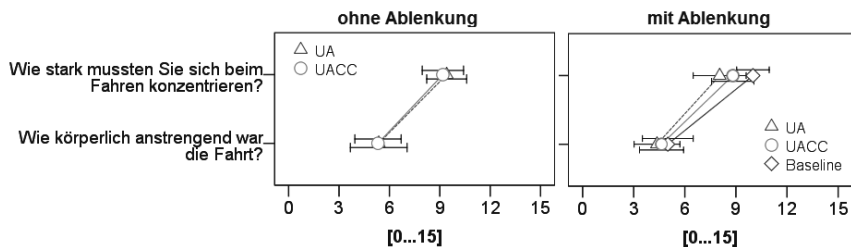


Bild 4: Mittelwert und Konfidenzintervall berichteter Anstrengung nach Versuchsteil 2 (links), nach Versuchsteil 3 (rechts).

Abschließend wurden die Probanden befragt, inwieweit sie die beiden Systeme UA und UACC gerne besitzen würden. Der Besitzwunsch der teilautomatisierten Funktion Urban Assist fällt demnach mit 25% niedriger aus als der Besitzwunsch der assistierenden Funktion UACC (40%). Ebenso ist die

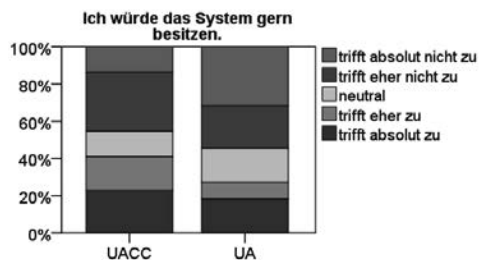


Bild 5: Besitzwunsch der Funktionen UACC und UA.

eindeutige Ablehnung der Funktion Urban Assist größer (ca. 30%) als bei der Funktion Urban ACC (ca. 10%).

5. Diskussion und Schlussfolgerungen

Ziel der Studie war, eine spezifische Ausprägung einer teilautomatisierten Fahrfunktion für den urbanen Raum zu demonstrieren und bzgl. User Experience (UX) und Sicherheitsaspekten zu bewerten. Gegenüber eines konventionellen ACC-Systems zeichnet sich der untersuchte „Urban Assist“ einerseits durch eine kooperative Gestaltung der Längsregelung, andererseits durch eine Übernahme der Querregelung (mit kooperativen Elementen) aus. Es wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass die Probanden vor der Bewertung ein korrektes Systemverständnis sowie ausreichend Lernerfahrung zur Nutzung des Systems aufbauen konnten.

Die Ergebnisse der Gesamtakzeptanz weisen darauf hin, dass die Übernahme der Querregelung im urbanen Umfeld nur bedingt als Mehrwert gegenüber der automatisierten Längsregelung (Urban ACC) wahrgenommen wird. Eine körperliche oder mentale Entlastung fällt – auch gegenüber der manuellen Fahrt – nur gering aus und kann anhand der erhobenen Daten nur tendenziell nachgewiesen werden. Demgegenüber führte die Automatisierung der Querregelung zu verzögerten notwendigen Bremseingriffen in komplexen Verkehrssituationen, die ursächlich zu Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern geführt haben. Dieser zunächst widersprüchlich wirkende Zusammenhang könnte dadurch erklärt werden, dass Probanden in der teilautomatisierten Fahrt stärker die Rolle des (passiven) Beobachters einnehmen als in der bzgl. der Längsregelung assistierten Fahrt [5]. Dadurch wurde möglicherweise die Entwicklung kritischer Situationen erst später durch einen Bremseingriff verhindert. Neben der Problematik der Lenkautomatisierung muss auch die Strategie des „kooperativen Bremsens“ kritisch hinterfragt werden. Für einen nennenswerten Anteil der Probanden war es in der Einführungsphase nur schwer nachvollziehbar, warum beispielsweise die Teilautomatisierung einerseits ein vorausfahrendes Fahrzeug, nicht aber andere Verkehrsteilnehmer erkennen konnte. Vor diesem Hintergrund wurde insbesondere das Basisverhalten der Längsregelung in Kooperationssituationen (Weiterfahrt bei ausbleibender Fahrerintervention) als nicht angemessen eingeschätzt. Für eine Überarbeitung des Kooperationskonzepts wird empfohlen, das Basisverhalten deutlich defensiver auszulegen. An Stellen mit notwendigen Vorfahrtsentscheidungen sollte das System von sich aus grundsätzlich komfortabel bis zum Stillstand abbremsen. Der Fahrer sollte davor rechtzeitig aufgefordert werden, die Weiterfahrt freizugeben oder alternativ die Fahrzeugkontrolle temporär vollständig zu übernehmen. Beide Varianten wurden bereits im selben Fahrsimulator umgesetzt und von Experten als signifikante Verbesserung beurteilt.

6. Literatur

- [1] Marberger, C.; Bräuchle, H.; Mielenz, H.; Führer, T. (2015). Kundenwünsche beim automatisierten Fahren in der Stadt. ATZ extra Ausgabe April 2015; Springer Vieweg.
- [2] Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19 (6) (1983), pp. 775–779.
- [3] Sheridan, T.B. (2002). *Humans and automation: System design and research issue*. John Wiley & Sons Inc., Santa Monica.
- [4] Naujoks, F., Purucker, C. & Neukum, A. (2016). Secondary task engagement and vehicle automation – Comparing the effects of different automation levels in an on-road experiment *Transportation Research Part F*, 38, 67-82.
- [5] Carsten O., Lai, F.C., Barnard, Y., Jamson, A.H.; Merat, N. (2012). Control task substitution in semi-automated driving: Does it matter what aspects are automated? *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 54 (5) (2012), pp. 747–761.
- [6] Nilsson, L., Strand, N., Falcone, P., Vinter, J. (2013). Driver performance in the presence of adaptive cruise control related failures: Implications for safety analysis and fault tolerance. IEEE (Ed.), 43rd annual IEEE/IFIP conference on dependable systems and networks workshop (DSN-W), IEEE (2013), pp. 1–10.
- [7] Vollrath, M., Schleicher, S., Gelau, C. (2011). The influence of Cruise Control and Adaptive Cruise Control on driving behaviour – A driving simulator study. *Accident Analysis and Prevention*, 43 (3) (2011), pp. 1134–1139.
- [8] Flemisch, F., Bengler, K., Bubb H., Winner, H., Bruder R. (2014). Towards cooperative guidance and control of highly automated vehicles: H-Mode and Conduct-by-Wire. In: *Ergonomics*. 2014; 57(3), pp. 343-360.
- [9] Neukum, A., Lübbeke, T., Krüger, H.-P., Mayser, C. & Steinle, J. (2008). ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen. In M. Maurer & C. Stiller (Eds.), *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme - FAS 2008* (pp. S. 141-150). Karlsruhe: fmrt.

Welche Aspekte fahrfremder Tätigkeiten schränken die Übernahmefähigkeit beim hochautomatisierten Fahren ein?

Dr. **Frederik Naujoks**, M.Sc. **Dennis Befelein**,
Dipl.-Psych. **Alexandra Neukum**,
IZVW, Universität Würzburg, Würzburg

Kurzfassung

Hochautomatisiertes Fahren entbindet den Fahrer von der permanenten Überwachung der Verkehrssituation. Im Gegensatz zum manuellen oder Teilautomatisierten Fahren wird hierdurch prinzipiell aus Fahrersicht die Ausführung einer Vielzahl an unterschiedlichen fahrfremden Tätigkeiten (FFT) möglich. Der Fahrer muss jedoch auch beim Hochautomatisierten Fahren als Rückfallebene zur Verfügung stehen und somit in der Lage sein, die manuelle Fahrzeugkontrolle innerhalb eines passenden Zeitfensters zu übernehmen. Vor diesem Hintergrund stellt die Systematisierung und Bewertung verschiedener FFT im Hinblick auf deren Bedeutung für die Fahrerleistung in Übernahmesituationen einen wichtigen Baustein für die sichere Gestaltung des Hochautomatisierten Fahrens dar. Der Beitrag beschreibt die Ergebnisse einer im Rahmen des Forschungsprojekts Ko-HAF durchgeführten Literaturanalyse. Auf Grundlage relevanter Forschungsarbeiten zum assistierten, Teil- und Hochautomatisierten Fahren wurden unterschiedliche FFT systematisiert. Im Vordergrund steht hierbei eine Zuordnung verschiedener Aspekte dieser Tätigkeiten (z.B. Möglichkeit zu Kontrollblicken, Notwendigkeit zur Daueraufmerksamkeit, etc.) zu unterschiedlichen Phasen des Übernahmeprozesses (z.B. Bemerken und Interpretieren von Übernahmeaufforderungen), die durch die Ausführung der jeweiligen fahrfremden Tätigkeit eingeschränkt werden können, wodurch die Anforderungen an den Fahrer zur Bewältigung der Übernahmesituation steigen. Ein besonderer Fokus liegt auf natürlichen fahrfremden Tätigkeiten, welche im Kontext der Forschung zum Übernahmeverhalten beim hochautomatisierten Fahren bislang nicht systematisch untersucht worden sind.

1. Literaturanalyse

Bestehende Systematiken fahrfremder Tätigkeiten verfolgen grundsätzlich zwei unterschiedliche Ansätze:

Phänomenologische Ansätze zielen vorwiegend auf die Kategorisierung und Erfassung der Prävalenz verschiedener FFT ab (bspw. durch Analyse von Unfallberichten), um eine post-

hoc Abschätzung des mit unterschiedlichen FFT assoziierten Unfallrisikos zu ermöglichen (z.B. [1-3]). [4] sowie [5] stellten Aufgabenkataloge vor, die FFT in insgesamt neun übergeordnete Kategorien unterteilen, wie etwa körperbezogene Tätigkeiten oder Bedienung fahrzeugzugehöriger Geräte. Im Vordergrund stehen hierbei Tätigkeiten, bei denen aufgrund von Beobachtungs- oder Befragungsstudien von einer praktisch relevanten Prävalenz ausgegangen werden kann.

Anforderungsbasierte Ansätze verfolgen hingegen das Ziel, den mit unterschiedlichen FFT assoziierten Beanspruchungsgrad zu bestimmen und auf relevante Beanspruchungsdimensionen zurückzuführen. So untersuchten beispielsweise [6] Unfälle und Beinahe-Unfälle der sog. *100-Car Naturalistic Driving Study* und fassten unterschiedliche FFT in Beanspruchungsstufen zusammen (*Einfach*: eine Blickzuwendung/Bedienschritt; *Komplex*: mehr als drei Blickzuwendungen/Bedienschritte). Zusammen mit anderen NDS-Studien [7] führten diese Erkenntnisse zur Formulierung der NHTSA-Richtlinien für die Benutzung elektronischer Geräte mit visuell-manueller Bedienung [8], welche visuelle Beanspruchung als zentrales Kriterium für die Vereinbarkeit mit der manuellen Fahrzeugführung ansehen. Für das teilautomatisierte Fahren stellten [9] einen Tätigkeitskatalog vor, welcher Einschränkungen in der Fähigkeit zur Reaktion auf Systemgrenzen und -fehler auf die folgenden Dimensionen zurückführt: (1) *Primäre Modalität* der Aufgabe (visuell vs. auditiv), (2) *Interaktion* (aktiv, d.h. vom Fahrer gesteuert vs. passiv, d.h. durch die Aufgabe gesteuert), (3) *Unterbrechbarkeit* (gut vs. schlecht) und (4) *Informationskodierung* (verbal vs. räumlich). Die angenommenen Grade der Einschränkung der Übernahmefähigkeit ergeben sich in diesem Modell aus der Nähe zur Fahraufgabe, die als visuelle (*primäre Modalität*), aktive (*Interaktion*) und schlecht unterbrechbare (*Unterbrechbarkeit*) Aufgabe mit räumlicher Informationskodierung (*Informationskodierung*) gesehen wird. In Übereinstimmung mit dem multiplen Ressourcenmodell [10] wird davon ausgegangen, dass die manuelle Übernahme der Fahrzeugführung insbesondere dann erschwert ist, wenn gleiche Ressourcen durch FFT und Fahraufgabe beansprucht werden. Das in diesem Beitrag entworfene Modell nimmt die vorgestellten Arbeiten zur Grundlage und überträgt diese auf das hochautomatisierte Fahren.

Bestehende Tätigkeitskataloge gehen bislang von einem sog. *dual-task*-Paradigma aus. Während der Bearbeitung der jeweiligen Tätigkeit ist der Fahrer stets in der Verantwortung, die Verkehrssituation zu überwachen und im Fall von Systemfehlern oder -grenzen kontrollierend einzugreifen. Im Gegensatz dazu erlaubt hochautomatisiertes Fahren die permanente Abwendung von der Fahraufgabe. An Systemgrenzen ist folglich vom Fahrer ein Aufgabenwechsel von der FFT hin zur manuellen Fahrzeugführung notwendig (sog. *task-switching*-

Paradigma). Dieser Paradigmenwechsel macht wesentliche Erweiterungen der Systematisierung von FFT erforderlich. Während der hochautomatisierten Fahrt wird voraussichtlich eine Vielfalt an komplexeren FFT möglich, deren Ausführung während der Fahrt mit niedrigeren Automationsstufen nicht vereinbar ist. So stellt beispielsweise die Verwendung der zu Verfügung stehenden Fahrzeit für Erledigungen wie das Verfassen von E-Mails oder das Nutzen von Unterhaltungsprogrammen einen Anreiz zur Nutzung hochautomatisierter Fahrfunktionen dar. Aus diesem Grund wird eine Erweiterung bestehender Systematiken auf solche natürlichen FFT angestrebt. In der vorgeschlagenen Systematik sollen damit auch bislang weniger betrachtete Aspekte wie das Unterbrechen oder Beenden von FFT Eingang finden. Durch die Entbindung von der Fahraufgabe ist allerdings ebenso denkbar, dass das Hochautomatisierte Fahren einen Zustand passiver Müdigkeit [11] fördert, der vor allem durch die Abwesenheit aktivierender Tätigkeiten bzw. das Ausführen unterfordernder Tätigkeiten bedingt ist. Im folgenden Abschnitt wird zunächst ein Rahmenmodell zur Beschreibung des Übernahmeprozesses dargestellt. Relevante Dimensionen von FFT werden in Anlehnung an das Vorgehen von [9] identifiziert und erweitert.

2. Übernahmeprozessmodell

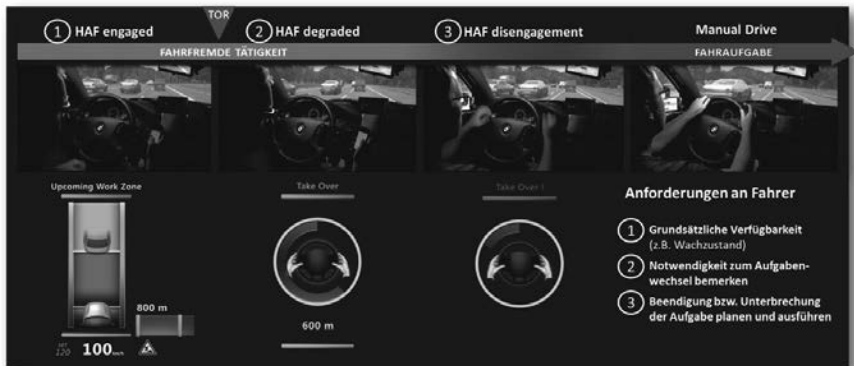


Bild 1: Übernahmeprozessmodell beim hochautomatisierten Fahren.

Bild 1 stellt ein Modell des Übernahmeprozesses aus dem hochautomatisierten Fahren dar. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Übernahmeprozess prinzipiell in unterschiedliche Phasen unterteilen lässt, die jeweils mit spezifischen Anforderungen an den Fahrer einhergehen:

(1) Grundsätzliche Verfügbarkeit (z.B. Wachzustand) **während der hochautomatisierten Fahrt** („*HAF engaged*“): Sowohl eine Unterforderung (*passive* Müdigkeit) als auch eine Überbeanspruchung (*aktive* Müdigkeit [11]) können sich negativ auf die Verfügbarkeit des Fahrers zur Übernahme der manuellen Fahrzeugführung auswirken. Demnach sind für empirische Untersuchungen solche Tätigkeiten zu identifizieren, die mittel- oder langfristig zur einer Fehlbeanspruchung des Fahrers führen können.

(2) Bemerken der Notwendigkeit zur Übernahme der manuellen Fahrzeugführung, sobald **Übernahmeaufforderung ausgegeben** wird („*HAF degraded*“): In diese Phase des Übernahmeprozesses fallen vorwiegend solche FFT, die mit der Fähigkeit des Fahrers zur Wahrnehmung, Verarbeitung und Interpretation der Übernahmeaufforderung einhergehen, beispielsweise wenn FFT und Übernahmeaufforderung in derselben Modalität präsentiert werden oder falls durch die FFT eine Blickabwendung von den Anzeige-Elementen der HAF-Funktion erforderlich ist.

(3) Beendigung oder Unterbrechung der ausgeführten fahrfremden Tätigkeit und Kontaktaufnahme mit den Stellteilen („*HAF disengagement*“): Die Beendigung mancher FFT – gerade im Kontext natürlicher FFT – stellt vermutlich eine nicht zu vernachlässigende Anforderung an den Fahrer dar. Angesprochen sind an dieser Stelle Aufgabenteilaspekte wie beispielsweise notwendige Bedienschritte zum Beenden oder Pausieren elektronischer Geräte oder die Notwendigkeit zur Ablage von Gegenständen an fixen Positionen im Fahrzeug.

(4) Manuelle Fahrt („*Manual drive*“): Letztlich ist es möglich, dass die FFT in der Übernahmephase nicht vollständig beendet wurde und während der anschließenden manuellen Fahrt weiterbearbeitet wird.

	HAF engaged TOR	HAF degraded FAHRFREMDE TÄTIGKEIT	HAF disengagement	Manual Drive FAHRAUFGABE	HAF engagement FAHRFREMDE TÄTIGKEIT
ANFORDERUNG AN DEN FÄHRER	<ul style="list-style-type: none"> Wachzustand Fahrttauglichkeit Systemverständnis 	<ul style="list-style-type: none"> TOR bemerken und verstehen: Aufgabenwechsel naht Übernahmebereitschaft herstellen 	<ul style="list-style-type: none"> Ausführung der Beendigung/Unterbrechung Übernahme manueller Fahrzeugführung 	<ul style="list-style-type: none"> Die Fahraufgabe erfüllen 	<ul style="list-style-type: none"> Sich der Fahraufgabe abwenden Nebentätigkeiten wiederaufnehmen
BEISPIEL	<ul style="list-style-type: none"> Fahrer liest/schreibt SMS in Kenntnis möglicher Systemgrenzen 	<ul style="list-style-type: none"> Akustisches Signal bemerken und als TOR interpretieren 	<ul style="list-style-type: none"> Smartphone/ Tablet weglegen Sicherungsblicke, Hände ans Lenkrad 	<ul style="list-style-type: none"> Ein Hindernis manuell umfahren 	<ul style="list-style-type: none"> Hände vom Lenkrad nehmen Smartphone/Tablet zur Hand nehmen
RELEVANTE THEMEN / FRAGEN	<ul style="list-style-type: none"> Über-/ Unterforderung Involviertheit Notwendigkeit zur Daueraufmerksamkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Primäre Modalität Informationskodierung Modalität Fahreroutput Kognitive Beanspruchung Lokalität Möglichkeit zu Kontrollblicken 	<ul style="list-style-type: none"> Aufwand der Unterbrechung Aufwand der Beendigung Anreiz der Bearbeitung (Motivation) Interaktion Dauer 	<ul style="list-style-type: none"> Carry-over Effekte durch die fahrfremde Tätigkeit (Wechselkosten) Unterschiede zw. Fahraufgaben 	<ul style="list-style-type: none"> Carry-over Effekte durch die Fahraufgabe

Bild 2: Übernahmeprozessmodell beim hochautomatisierten Fahren und Dimensionierung fahrfremder Tätigkeiten.

Basierend auf diesen Anforderungen wurden verschiedene Dimensionen fahrfremder Tätigkeiten definiert (z.B. Lokalität, Möglichkeit zu Kontrollblicken, Aufwand der Unterbrechung, etc.), welche das Ausmaß der Einschränkung der Fahrer Verfügbarkeit zur manuellen Übernahme der Fahrzeugführung bedingen können. Bild 2 gibt eine Übersicht über diese Dimensionen sowie eine Zuordnung zu den angenommenen Phasen des Übernahmeprozesses. Die vorgeschlagenen Dimensionen fahrfremder Tätigkeiten sind in Tabelle 1 genauer definiert.

Tabelle 1: Übersicht über Dimensionen von FFT und mögliche Operationalisierungen.

Dimension	Beschreibung	Ausprägung (Beispiel)	Operationalisierung (Beispiele) Fahrfremde Tätigkeit	Messinstrumente
HAF engaged: Einschränkung der grundsätzlichen Fahrer Verfügbarkeit				
Über/Unterforderung	Tätigkeit führt aufgrund von Monotonie/zu geringer Beanspruchung zu passiver Ermüdung [11] oder aufgrund einer zu starken Beanspruchung zu aktiver Ermüdung [11]	Hoch Mittel Gering	Häufigkeit und Intensität der Bearbeitung Struktur der Aufgabe: Monotonie	Erfassung der passiven und aktiven Müdigkeit Blickerfassung (z.B. Lidschluss [12], Blickverteilung [13]), Physiologie (z.B. EEG [14]) Beobachtung [13; 15] Subjektive Maße (z.B. <i>Karolinska Sleepiness Scale</i> , KSS [16])
Involviertheit	Tätigkeit führt aufgrund emotional-motivationaler Involviertheit (z.B. <i>Flow</i> -Erleben) zu eingeschränktem Aufmerksamkeitsfokus [17]	Hoch Mittel Gering		Erfassung des emotional-motivationalen Zustands Erfassung körperlicher Reaktionen (z.B. <i>Facial Action Coding System</i> , FACS [18]) Subjektive Maße (z.B. PANAS [19], Erfassung von <i>Flow</i> -Erleben [20])
Notwendigkeit zur Daueraufmerksamkeit	Tätigkeit schränkt Fähigkeit zur Aufrechterhaltung der Daueraufmerksamkeit/Vigilanz ein [21]	Hoch Mittel Gering	Struktur der Aufgabe: Seltenes Auftreten von Zielreizen bei gleichzeitiger Notwendigkeit zur Daueraufmerksamkeit	Vigilanz-Testbatterien (z.B. <i>Sustained Attention to Response Task</i> , SART [22], <i>Psychomotor Vigilance Test</i> , PVT [23]) Leistung in Zweitaufgabe (z.B. Vigilanz-Uhr [21]) Physiologische Korrelate [24]
HAF degraded: Interferenz mit Wahrnehmung und Interpretation der Übernahmeanforderung				
Primäre Modalität	Grad der Beanspruchung des visuellen und auditiven Kanals bei Informationsaufnahme [9; 10]	Visuell Auditiv	Visuell: Anzeigenposition und Größe, Häufigkeit der dargebotenen Stimuli, etc. Auditiv: Lautstärke und Häufigkeit der dargebotenen Stimuli, etc.	Verhaltensmessung: Erfassung der Wechselkosten durch Ausführung der Tätigkeit (Reaktionszeit-Latenz bei Reaktion auf andere Aufgabe [10; 25; 26]), Erfassung der Leistung in Zweitaufgabe (z.B. <i>Peripheral Detection Task</i> , PDT [25-27]) Subjektive Erfassung der visuellen und auditiven Beanspruchung (z.B. <i>Driver activity/bad index</i> , DALI [28-30])
Informationskodierung	Notwendigkeit zur kognitiven Kodierung räumlicher Informationen [10]	Räumlich Verbal	Struktur der Aufgabe: Notwendigkeit zur Kodierung räumlicher Informationen	Verhaltensmessung: Leistung in Zweitaufgabe mit Notwendigkeit zur räumlichen Informationskodierung [10; 25; 26] Subjektive Erfassung der Beanspruchung des räumlichen Arbeitsgedächtnisses [28]
Modalität Fahreroutput	Modalität, in der Fahrer auf fahrfremde Tätigkeit reagiert [10]	Verbal Motorisch	Verbal: Häufigkeit, Komplexität verbaler Reaktionen Motorisch: Einebeide Hände für Interaktion notwendig, Häufigkeit und Komplexität motorischer Reaktionen	Verhaltensmessung: Erfassung der Wechselkosten durch Ausführung der Tätigkeit (Reaktionszeit-Latenz bei Reaktion auf andere Aufgabe [10; 25; 26]), Erfassung der Leistung in Zweitaufgabe [10; 25; 26] Subjektive Erfassung der verbalen/motorischen Beanspruchung [28]

Tabelle 1 (Fortsetzung): Übersicht über Dimensionen von FFT und mögliche Operationalisierungen.

Dimension	Beschreibung	Ausprägung (Beispiel)	Operationalisierung (Beispiele)	Messinstrumente
Kognitive Beanspruchung	Grad der Beanspruchung der mentalen Verarbeitungskapazität [31-33]	Hoch Mittel Gering	Belastung des Arbeitsgedächtnisses (z.B. Merken von Inhalten, Ausführung mentaler Operationen etc.)	Blickerfassung (z.B. Einengung des Blickfelds [34], Verlängerung von Fixationszeiten [35]) Physiologie (z.B. Herzrate/Herzratenvariabilität [36; 37], EEG [36], Elektrodermale Aktivität [36]) Einschätzung der kognitiven Beanspruchung (z.B. <i>Rating Scale of Mental Effort</i> , RSME; NASA-TLX) [25; 26; 35; 38; 39]
Lokalität	Ort, an dem fahrfremde Tätigkeit ausgeführt wird [40-42]	Schoß Mitteltunnel Beifahrersitz Rücksitz	Distanz zum zentralen Blickfeld Distanz zu relevanten Elementen	Erfassung des Aufmerksamkeitsfokus bei Bearbeitung der Aufgabe [43; 44] Blickrichtung Kopfdrehung Körperdrehung
Möglichkeit zu Kontrollblick-en	Möglichkeit der Blickabwendung ohne Aufgabe zu unterbrechen [45]	Hoch Mittel Gering	Struktur der Aufgabe: Grad der kontinuierlichen Informationsdarbietung ohne Möglichkeit zur Unterbrechung	Erfassung der Aufmerksamkeitsverteilung Verteilung der Länge von Einzelblicken zur Aufgabenerfüllung in Zweitaufgaben-Paradigma [46]
HAF disengagement: Aufgabe beenden und Fahrzeugführung übernehmen				
Aufwand der Unterbrechung	Dauer um Aufgabe zu unterbrechen	Angabe in s	Notwendige Handlungs-/Bedienschritte bis Pausieren	Verhaltensmessung des Pausierens der Tätigkeit [47-49]
Aufwand der Beendigung	Dauer um Aufgabe zu beenden	Angabe in s	Notwendige Handlungs-/Bedienschritte bis Beendigung	Verhaltensmessung der Beendigung der Tätigkeit [47-49]
Anreiz der Bearbeitung	Grad der subjektiven Motivation zur Weiterbearbeitung der Tätigkeit [50]	Hoch Mittel Gering	Intrinsische (z.B. Interesse, Freude) und extrinsische Anreize zur Bearbeitung (z.B. monetäre Anreize, instrumenteller Wert der Tätigkeit)	Erfassung des emotional-motivationalen Zustands bei Bearbeitung (siehe oben) Bereitschaft zur Aufgabenausführung mit/ohne extrinsische Anreize [50; 51] Selbstauskunft über Grad der intrinsischen/extrinsischen Motivation [52; 53]
Interaktion	Zeitpunkt notwendiger Interaktionen wird durch Aufgabe (<i>machine-paced</i>) oder Operateur (<i>self-paced</i>) bestimmt [9]	<i>Self-paced</i> <i>Machine-paced</i>	Struktur der Aufgabe	
Dauer	Dauer einzelner Bedienschritte	Angabe in s	Dauer einzelner Bedienschritte	Verhaltensmessung [47-49]

Weiterhin sind in der Tabelle beispielhafte Möglichkeiten dargestellt, wie die einzelnen Dimensionen operationalisiert werden können, um die Ausprägung einer FFT auf der jeweiligen Dimension zu bestimmen¹. Hierzu werden – soweit möglich – direkt messbare Eigenschaften der Tätigkeit (z.B. Dauer von Bedienschritten) sowie die Messung latenter Konstrukte (z.B. Einschätzung der kognitiven Beanspruchung durch standardisierte Fragebögen) aufgeführt.

Tabelle 2 und **Tabelle 3** geben eine Übersicht über bisher in empirischen Studien untersuchte FFT, unterteilt in standardisierte und natürliche FFT. Zur Erstellung der Tabelle wurden insgesamt 54 Studien zum assistierten, Teil- und Hochautomatisierten Fahren ausgewertet. Die aus den FFT entstehenden Anforderungen bei der Übernahme der manuellen Fahrzeugführung wurden von zwei Experten² unabhängig beurteilt (Rater-Übereinstimmung: $\kappa = 0.66$, $p < .001$). Es wird deutlich, dass eine Vielzahl der verwendeten Tätigkeiten vor allem in der Phase „HAF degraded“ mit dem Bemerken und Interpretieren von Übernahmeaufforderungen interferieren dürften, beispielsweise durch kognitive (z.B. n-back task) oder visuelle Beanspruchung (z.B. SuRT, RSVP-Aufgabe). Die Notwendigkeit zur Beendigung bzw. Pausieren („HAF disengagement“) von FFT stellte hingegen bislang nur in wenigen Studien eine explizite Anforderung an den Fahrer dar (z.B. Schminken oder im Schneidersitz sitzen).

3. Ausblick

Der vorliegende Beitrag stellt einen Ansatz für die *prospektive* Bewertung der zu erwartenden Einschränkung der Übernahmefähigkeit durch FFT beim Hochautomatisierten Fahren dar. Es ist davon auszugehen, dass die Beanspruchung des Fahrers in den definierten Dimensionen durch FFT mit spezifischen Einschränkungen in der Übernahmefähigkeit einhergehen, jedoch fehlen bislang umfassende, systematische Untersuchungen, welche den relativen Beitrag der vorgeschlagenen Beanspruchungs-Dimensionen vergleichend betrachten. Im Rahmen des Projekts Ko-HAF werden deshalb die Auswirkungen natürlicher FFT auf den gesamten in diesem Beitrag skizzierten Übernahmeprozess systematisch in empirischen Studien untersucht werden, um eine konsolidierte Bewertung der Relevanz der vorgeschlagenen Dimensionen von FFT – sowie mit konkreten Tätigkeiten einhergehende Einschränkungen – für die Übernahmebereitschaft vornehmen zu können.

Danksagung: Diese Arbeit entstand im Rahmen des Verbundprojekts Ko-HAF - Kooperatives Hochautomatisiertes Fahren und wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

¹ An dieser Stelle wird zum Zweck der Operationalisierung der jeweiligen Dimension davon ausgegangen, dass die Tätigkeit isoliert ausgeführt wird. So könnte beispielsweise die Notwendigkeit zur Verarbeitung räumlicher Informationen durch die Interferenz mit einer anderen Tätigkeit gemessen werden, die ebenfalls eine räumliche Informationsverarbeitung erfordert.

² Beide Rater hatten mehrjährige Erfahrung in der Leitung empirischer Studien zum Übernahmeverhalten beim Hochautomatisierten Fahren.

Tabelle 2: Übersicht über natürliche fahrfremde Tätigkeiten (TAF = Teilautomatisiertes Fahren, HAF = Hochautomatisiertes Fahren).

Fahrfremde Tätigkeit	Beschreibung	Angenommene Einschränkung der Übernahmefähigkeit				Studien nach Automationsstufe		
		(1) Grundsätzliche Verfügbarkeit	(2) TOR bemerken	(3) FFT beenden / unterbrechen	assistiert	TAF	HAF	
Bedienung von IVIS	Mit Informationssystem/Infotainment im Fahrzeug interagieren		•		-	[54]	[55]	
Komplett frei (Auswahl)	Keine Vorgabe. Lesen, Schmirken, DVD schauen etc. möglich	•	•	•	[56; 57]	[56-58]	-	
Lesen: Zeitung, Smartphone	Lesen von Text/Bildmaterial (analog oder digital)		•		[56; 57]	[56; 57; 59; 60]	[61-64]	
Wetter App bedienen	Wetter-Informationen in einem Menü auf Smartphone abrufen (fixe Position im Fahrzeug)		•		[65]	[65]	-	
Zieleingabe in Navigationsgerät	Ziele eingeben in Navigationsgerät		•		[66]	-	-	
Quiz-Aufgabe	Quiz-Aufgabe (ähnlich wie z.B. „Wer wird Millionär“) ausführen		•	•	-	[67]	[12; 61; 68]	
Text vorlesen	Text von Tablet laut ablesen		•	•	[69]	-	[70]	
Gesprochenen Text anhören und Fragen beantworten	Hören von Informationen (z.B. über Restaurants an der Strecke) und verbale Antwort auf Fragen zu den Informationen		•		[71]	-	-	
Komplexe Informationssuche	Probanden sahen Liste mit Aktienkursen und dazugehörigen Unternehmen auf LCD-Bildschirm, Aktienkurs eines Unternehmens musste gesucht und laut vorgelesen werden		•		[69]	-	-	
Essen	Süßigkeiten, die auf Beifahrersitz liegen, essen		•	•	[56; 57]	[56; 59]	-	
Computerspiel	Computerspiel (z.B. Punkt vor Kollision schützen)		•		-	-	[63; 72; 73]	
Musikhören	Probanden konnten ein Webradio ihrer Wahl hören		•		-	-	[74]	
Telefonieren	Gestelltes Telefonat (bspw. arithmetischen Fragen beantworten)		•		[75]	-	[68]	
SMS schreiben/ Wählen	Keine Vorgabe: Probanden sollten ihr Mobiltelefon dabei haben; Verhaltensbeobachtung während des Experiments		•		[57]	[57]	-	
Texteingabe, Internetsuche	Keine Vorgabe [57] bzw. Texteingaben / Internetrecherchen im CID nach Anweisung [76]		•		[57]	[57]	[76]	
Film ansehen	Beispielsweise Video-Streaming mit freier Auswahl, nach Beileben DVD ansehen, Vorgabe eines bestimmten Videos mit oder ohne anschließende Verständnisfragen	•	•		[56]	[56; 77]	[74; 78; 79]	
Aus dem Fenster lehnen	Verhaltensbeobachtung im HAF			•	-	-	[80]	
Im Schneldersitz sitzen	Verhaltensbeobachtung im HAF			•	-	-	[80]	

Tabelle 3: Übersicht über standardisierte fahrfremde Tätigkeiten (TAF = Teilautomatisiertes Fahren, HAF = Hochautomatisiertes Fahren).

Fahrfremde Tätigkeit	Beschreibung	Angenommene Einschränkung der Übernahmefähigkeit			Studien nach Automationsstufe		
		(1) Grundsätzliche Verfügbarkeit	(2) TOR bemerken	(3) FFT beachten/ unterbreichen	assistiert	TAF	HAF
Trackingaufgabe	Zu verfolgendes Objekt (Punkt/Linie) in bestimmtem Toleranzbereich halten	•	•		[81]	[81]	[82]
SuRT (Surrogate Reference Task)	Visuelle Suchaufgabe		•		[83-85]	[86; 87]	[86; 88-93]
n-Back	Zahlenfolge muss im Gedächtnis gehalten werden: Abfolge aus Targets und Distraktoren, Target n Schritte zuvor muss erinnert und benannt werden		•		-	[87]	[93]
20-Questions-Task	20 ja/nein-Fragen, um ein Rätsel zu lösen		•		-	[94]	[95]
Zahlen Addieren	Darbietung von Zahlen auf Display, welche addiert werden sollen (verbale Antwort)		•		[96]	-	-
RSVP-Aufgabe	Rapid Serial Visual Presentation: Reagieren auf visuell präsentierte Targetreize		•		[97]	[98]	-
Zählen von Targetreizen	1) Der Fahrer muss nach einem akustischen Signal einen Knopf drücken, woraufhin einzelne zufällige Zahlen auf einem Bildschirm angezeigt werden. Der Fahrer soll zählen, wie oft eine bestimmte Zahl vorkommt. Die einzelnen Zahlen werden mit einer Rate von 4 Hertz angezeigt. 2) Ein rotes Viereck taucht in zufälligen Intervallen zwischen 4-8 Sekunden an einer von 20 festgelegten Positionen auf. Das Viereck verschwindet sobald der Fahrer einen Knopf drückt oder wenn 3 Sekunden verstrichen sind. Zählen von dargebotenen Zielreizen (z.B. Buchstaben) entweder aus Sequenz von Stimuli oder bei simultaner Darstellung (Suchaufgabe)	•	•		[81]	[81]	-
„Rotated Figures Task“	Probanden müssen angeben, ob zwei rotierte geometrische Figuren gleich oder ungleich sind (Wippen am Lenkrad dienen als Eingabe)		•		[99]	-	-
Positionsangabe	5 Ziffern erscheinen in einem Display in der Mittelkonsole. Von diesen Ziffern ist jeweils eine Ziffer keine 0; Mittels Tastendruck soll die Position der Nicht-Null angegeben werden		•		[100]	-	-
Lickentext („Cloze-Test“)	Ersetzen von fehlenden Wörtern in einem Text (Word File) am Laptop		•		-	[101]	[101]
Reaktion auf akustische Reize („Oddball“-Aufgabe)	Reagieren auf Target-Reiz (z.B. hoher Ton) in einer Folge von Nicht-Target-Reizen (z.B. tiefer Tone)	•	•		-	[102]	-

Referenzen

- [1] Stutts, J. C. & Association, A. A. (2001). *The role of driver distraction in traffic crashes*. Washington, DC: AAA Foundation for Traffic Safety.
- [2] Gordon, C. (2005). *Driver distraction: An initial examination of the 'attention diverted by' contributory factor codes from crash reports and focus group research on perceived risks*. Paper presented at the 2005 IPENZ Conference, Auckland, New Zealand.
- [3] Glaze, A. L. & Ellis, J. M. (2003). *Pilot study of distracted drivers*. Richmond: Virginia Commonwealth University, Transportation and Safety Training Center.
- [4] Huemer, A. K. & Vollrath, M. (2012). *Ablenkung durch fahrfremde Tätigkeiten - Machbarkeitsstudie* (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Mensch und Sicherheit, Heft M 225). Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Strassenwesen.
- [5] Schoemig, N., Schoch, S., Neukum, A., Schumacher, M. & Wandtner, B. (2015). *Simulatorstudien zur Ablenkungswirkung fahrfremder Tätigkeiten* (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Mensch und Sicherheit, Heft M 253). Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Strassenwesen.
- [6] Klauer, S. G., Dingus, T. A., Neale, V. L., Sudweeks, J. D. & Ramsey, D. J. (2006). *The impact of driver inattention on near-crash/crash risk: An analysis using the 100-car naturalistic driving study data*. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- [7] Olson, R. L., Hanowski, R. J., Hickman, J. S. & Bocanegra, J. L. (2009). *Driver distraction in commercial vehicle operations* (No. FMCSA-RRR-09-042). Blacksburg: Virginia Tech Transportation Institute.
- [8] NHTSA (2012). *Visual-manual NHTSA driver distraction guidelines for in-vehicle electronic devices*. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- [9] Spiessl, W. & Hussmann, H. (2011). Assessing error recognition in automated driving. *IET Intelligent Transport Systems*, 5 (2), 103-111.
- [10] Wickens, C. D. (1980). The structure of attentional resources. In R. S. Nickerson (Ed.), *Attention and Performance VIII* (pp. 239-257). New York: Taylor & Francis.
- [11] May, J. F. & Baldwin, C. L. (2009). Driver fatigue: The importance of identifying causal factors of fatigue when considering detection and countermeasure technologies. *Transportation Research Part F*, 12 (3), 218-224.
- [12] Schömig, N., Hargutt, V., Neukum, A., Petermann-Stock, I. & Othersen, I. (2015). *The interaction between highly automated driving and the development of drowsiness*. Paper presented at the 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2015), Las Vegas, USA.

- [13] Barr, L. C., Yang, C. Y. D., Hanowski, R. J. & Olson, R. (2011). *An assessment of driver drowsiness, distraction, and performance in a naturalistic setting* (No. FMCSA-RRR-11-010). Washington, DC: U.S. Department of Transportation Research and Special Programs Administration.
- [14] Pal, N. R., Chuang, C.-Y., Ko, L.-W., Chao, C.-F., Jung, T.-P., Liang, S.-F. et al. (2008). EEG-based subject-and session-independent drowsiness detection: an unsupervised approach. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008, 1-11.
- [15] Kroes, S. (2005). *Detecting Boredom in Meetings*. Enschede: University of Twente.
- [16] Åkerstedt, T. & Gillberg, M. (1990). Subjective and objective sleepiness in the active individual. *International Journal of Neuroscience*, 52, 29-37.
- [17] Csikszentmihalyi, M. (1990). *Flow: The psychology of optimal performance*. New York: Cambridge University Press.
- [18] Ekman, P. & Friesen, W. V. (1977). *Facial Action Coding System: A Technique for the Measurement of Facial Movement*. Paolo Alto: Consulting Psychologists Press.
- [19] Watson, D., Clark, L. A. & Tellegen, A. (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect: the PANAS scales. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54 (6), 1063-1070.
- [20] Jackson, S. A. & Marsh, H. W. (1996). Development and validation of a scale to measure optimal experience: The Flow State Scale. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 18, 17-35.
- [21] Mackworth, N. (1948). The breakdown of vigilance during prolonged visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1 (1), 6-21.
- [22] Robertson, I. H., Manly, T., Andrade, J., Baddeley, B. T. & Yiend, J. (1997). Oops!: performance correlates of everyday attentional failures in traumatic brain injured and normal subjects. *Neuropsychologia*, 35 (6), 747-758.
- [23] Lim, J. & Dinges, D. F. (2008). Sleep deprivation and vigilant attention. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1129 (1), 305-322.
- [24] Oken, B. S., Salinsky, M. C. & Elsas, S. (2006). Vigilance, alertness, or sustained attention: physiological basis and measurement. *Clinical Neurophysiology*, 117 (9), 1885-1901.
- [25] O'Donnell, R. D. & Eggemeier, F. T. (1986). Workload assessment methodology. In *Handbook of Perception and Human Performance* (pp. 1-49). New York: Wiley.
- [26] De Waard, D. (1996). *The measurement of drivers' mental workload*. Groningen: Groningen University, Traffic Research Center.
- [27] Martens, M. & Van Winsum, W. (2000). *Measuring distraction: the peripheral detection task*. Soesterberg: TNO.
- [28] Boles, D. B. & Adair, L. P. (2001). The multiple resources questionnaire (MRQ). *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 45 (25), 1790-1794.
- [29] Pauzié, A. (2008). A method to assess the driver mental workload: the driving activity load index (DALI). *IET Intelligent Transport Systems*, 2 (4), 315-322.

- [30] Pauzié, A. (2008). Evaluating driver mental workload using the driving activity load index (DALI). In C. Brusque (Ed.), *Proceedings of European Conference on Human Interface Design for Intelligent Transport Systems* (pp. 67-79). Lyon: HUMANIST publications.
- [31] Baddeley, A. D. (1992). Working memory. *Science*, 255, 556-559.
- [32] Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [33] Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: data and theory. *Psychological bulletin*, 116 (2), 220-224.
- [34] May, J. G., Kennedy, R. S., Williams, M. C., Dunlap, W. P. & Brannan, J. R. (1990). Eye movement indices of mental workload. *Acta psychologica*, 75 (1), 75-89.
- [35] Wilson, G. F. & Eggemeier, F. T. (1991). Psychophysiological assessment of workload in multi-task environments. In D. L. Damos (Ed.), *Multiple-task performance* (pp. 329-360). London: Taylor & Francis.
- [36] Kramer, A. F. (1991). Physiological metrics of mental workload: a review of recent progress. In D. L. Damos (Ed.), *Multiple-task performance* (pp. 279-328). London: Taylor & Francis.
- [37] Porges, S. W. & Byrne, E. A. (1992). Research methods for measurement of heart rate and respiration. *Biological psychology*, 34 (2-3), 93-130.
- [38] Knowles, W. (1963). Operator loading tasks. *Human Factors*, 5 (2), 155-161.
- [39] Hart, S. G. & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*, 52, 139-183.
- [40] Wittmann, M., Kiss, M., Gugg, P., Steffen, A., Fink, M., Pöppel, E. et al. (2006). Effects of display position of a visual in-vehicle task on simulated driving. *Applied Ergonomics*, 37 (2), 187-199.
- [41] Burnett, G. (2004). *An evaluation of different positions for an in-vehicle navigation display*. Paper presented at the Proceedings of the International Conference of Traffic and Transport Psychology, Nottingham, UK.
- [42] Tretten, P., Normark, C. J. & Gärling, A. (2009). *Warnings and placement positions in automobiles*. Paper presented at the Proceedings of the 17th Triennial Congress of the International Ergonomics Association, Beijing, China.
- [43] Mehler, B., Reimer, B., Dobres, J. & Coughlin, J. F. (2015). *Assessing the Demands of Voice Based In-Vehicle Interfaces - Phase II Experiment 3 - 2015 Toyota Corolla*. Cambridge: MIT.
- [44] Mehler, B., Reimer, B., McAnulty, H., Dobres, J., Lee, J. & Coughlin, J. F. (2015). *Assessing the Demands of Voice Based In-Vehicle Interfaces - Phase II Experiment 2 - 2014 Mercedes CLA*. Cambridge: MIT.
- [45] Metz, B. (2009). *Worauf achtet der Fahrer?* Würzburg: Julius-Maximilians-Universität.
- [46] Dingus, T. A., Hulse, M. C., Antin, J. F. & Wierwille, W. W. (1989). Attentional demand requirements of an automobile moving-map navigation system. *Transportation Research Part A*, 23(4), 301-315.

- [47] Schneegaß, S., Pfleging, B., Kern, D. & Schmidt, A. (2011). *Support for modeling interaction with automotive user interfaces*. Paper presented at the 3rd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Salzburg, Austria.
- [48] Pettitt, M., Burnett, G. & Karbassioun, D. (2006). *Applying the keystroke level model in a driving context*. Paper presented at the Ergonomics Society Annual Conference, San Francisco, California.
- [49] Purucker, C., Naujoks, F., Prill, A. & Neukum, A. (in press). Evaluating distraction of in-vehicle information systems while driving by predicting total eyes-off-road times with keystroke level modeling. *Applied Ergonomics*.
- [50] Ryan, R. M. & Deci, E. L. (2000). Intrinsic and extrinsic motivations: Classic definitions and new directions. *Contemporary Educational Psychology*, 25 (1), 54-67.
- [51] Deci, E. L. (1971). Effects of externally mediated rewards on intrinsic motivation. *Journal of Personality and Social Psychology*, 18 (1), 105-115.
- [52] Ryan, R. M. (1982). Control and information in the intrapersonal sphere: An extension of cognitive evaluation theory. *Journal of Personality and Social Psychology*, 43 (3), 450-461.
- [53] Harackiewicz, J. M. (1979). The effects of reward contingency and performance feedback on intrinsic motivation. *Journal of Personality and Social Psychology*, 37(8), 1352-1363.
- [54] Toffetti, A., Wilschut, E., Martens, M., Schieben, A., Rambaldini, A., Merat, N. et al. (2009). CityMobil: Human factor issues regarding highly automated vehicles on eLane. *Transportation Research Record*, 2110, 1-8.
- [55] Flemisch, F., Griesche, S., Heesen, M., Kaussner, A., Niemann, J., Petermann, I., Schieben, A. & Schoemig, N. (2010). *Highly automated vehicles for intelligent transport: Validation of preliminary design of HAVEit systems by simulator tests*. HAVEit Consortium.
- [56] Carsten, O., Lai, F., Barnard, A., Merat, N. & Jamson, A. (2012). Control task substitution in semi-automated driving: does it matter what aspects are automated? *Human Factors*, 54 (5), 747-761.
- [57] Llaneras, R. E., Salinger, J. & Green, C. A. (2013). *Human factors issues associated with limited ability autonomous driving systems: Drivers' allocation of visual attention to the forward roadway*. Paper presented at the 7th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Bolton Landing, New York.
- [58] Jamson, A. H., Merat, N., Carsten, O. M. & Lai, F. C. (2013). Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions. *Transportation research part C*, 30, 116-125.

- [59] Helldin, T., Falkman, G., Riveiro, M. & Davidsson, S. (2013). *Presenting system uncertainty in automotive UIs for supporting trust calibration in autonomous driving*. Paper presented at the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Eindhoven, The Netherlands.
- [60] Dogan, E., Deborne, R., Delhomme, P., Kemeny, A. & Jonville, P. (2014). *Evaluating the shift of control between driver and vehicle at high automation at low speed: The role of anticipation*. Paper presented at the 5th Transport Research Arena (TRA) Conference, Paris, France.
- [61] Melcher, V., Rauh, S., Diederichs, F., Widloither, H. & Bauer, W. (2015). *Take-Over Requests for automated driving*. Paper presented at the 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2015) Conferences, Las Vegas, USA.
- [62] Naujoks, F., Mai, C. & Neukum, A. (2014). The effect of urgency of take-over requests during highly automated driving under distraction conditions. *Advances in Human Aspects of Transportation: Part I*, 7, 431-438.
- [63] Schwalk, M., Kalogerakis, N. & Maier, T. (2015). Driver support by a vibrotactile seat matrix – Recognition, adequacy and workload of tactile patterns in take-over scenarios during automated driving. *Procedia Manufacturing*, 3, 2466-2473.
- [64] Diederichs, F., Bischoff, S., Widloither, H., Reilhac, P., Hottelart, K. & Moizard, J. (2015). Smartphone integration and SAE level 3 car automation: a new cockpit concept and its evaluation in a car simulator. In VDI (Ed.), *Der Fahrer im 21. Jahrhundert* (pp. 63-78). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- [65] Naujoks, F., Purucker, C. & Neukum, A. (2016). Secondary task engagement and vehicle automation—Comparing the effects of different automation levels in an on-road experiment. *Transportation Research Part F*, 38, 67-82.
- [66] Tijerina, L., Johnston, S., Parmer, E., Pham, H., Winterbottom, M. & Barickman, F. (2000). *Preliminary studies in haptic displays for rear-end collision avoidance system and adaptive cruise control applications*. Washington, DC: National Highway Transportation Safety Administration.
- [67] Petermann-Stock, I., Hackenberg, L., Muhr, T. & Mergl, C. (2013). Wie lange braucht der Fahrer - eine Analyse zu Übernahmezeiten aus verschiedenen Nebentätigkeiten während einer hochautomatisierten Staufahrt. In 6. *Tagung Fahrerassistenzsysteme. Der Weg zum automatischen Fahren*. München: TU München.
- [68] Neubauer, C., Matthews, G. & Saxby, D. (2014). *Fatigue in the Automated Vehicle Do Games and Conversation Distract or Energize the Driver?* Paper presented at the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Chicago, Illinois.
- [69] Rudin-Brown, C. M. & Parker, H. A. (2004). Behavioural adaptation to adaptive cruise control (ACC): implications for preventive strategies. *Transportation Research Part F*, 7 (2), 59-76.

- [70] Louw, T., Merat, N. & Jamson, H. (2015). *Engaging with highly automated driving: To be or not to be in the loop?* Paper presented at the 8th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Salt Lake City, Utah.
- [71] Seppelt, B. D., Lees, M. N. & Lee, J. D. (2005). *Driver distraction and reliance: Adaptive cruise control in the context of sensor reliability and algorithm limits.* Paper presented at the third international driving symposium on human factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Rockport, Maine.
- [72] van den Beukel, A. P. & van der Voort, M. C. (2013). *The influence of time-criticality on Situation Awareness when retrieving human control after automated driving.* Paper presented at the 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), The Hague, The Netherlands.
- [73] Politis, I., Brewster, S. & Pollick, F. (2015). *Language-based multimodal displays for the handover of control in autonomous cars.* Paper presented at the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Nottingham, UK.
- [74] Blommer, M., Curry, R., Kochhar, D., Swaminathan, R., Talamonti, W. & Tijerina, L. (2015). *The Effects of a Scheduled Driver Engagement Strategy in Automated Driving.* Paper presented at the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Los Angeles, California.
- [75] Ma, R. & Kaber, D. B. (2005). Situation awareness and workload in driving while using adaptive cruise control and a cell phone. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35 (10), 939-953.
- [76] Zeeb, K., Buchner, A. & Schrauf, M. (2015). What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 78, 212-221.
- [77] Jamson, H., Merat, N., Carsten, O. & Lai, F. (2011). *Fully-Automated Driving: The Road to Future Vehicles.* Paper presented at the sixth International Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Olympic Valley , Lake Tahoe, CA.
- [78] Mok, B., Johns, M., Lee, K. J., Miller, D., Sirkin, D., Ive, P. et al. (2015). *Emergency, Automation Off: Unstructured Transition Timing for Distracted Drivers of Automated Vehicles.* Paper presented at the 18th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Las Palmas, Spain.
- [79] Walch, M., Lange, K., Baumann, M. & Weber, M. (2015). *Autonomous driving: investigating the feasibility of car-driver handover assistance.* Paper presented at the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Nottingham, UK.
- [80] Omae, M., Hashimoto, N., Sugamoto, T. & Shimizu, H. (2005). Measurement of Driver's Reaction Time to Failure of Steering Controller during Automatic Driving. *Review of Automotive Engineering*, 26 (2), 213-215.

- [81] Schaller, T., Schiehlen, J. & Gradenegger, B. (2008). *Stauassistentz–Unterstützung des Fahrers in der Quer-und Längsführung: Systementwicklung und Kundenakzeptanz*. Paper presented at the 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, Munich, Germany.
- [82] Damböck, D., Farid, M., Tönert, L. & Bengler, K. (2012). *Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren*. Paper presented at the 5th Conference on Driver Assistance, Munich, Germany.
- [83] Beggato, M. & Krems, J. F. (2013). The evolution of mental model, trust and acceptance of adaptive cruise control in relation to initial information. *Transportation Research Part F*, 18, 47-57.
- [84] Vollrath, M., Schleicher, S. & Gelau, C. (2011). The influence of Cruise Control and Adaptive Cruise Control on driving behaviour–A driving simulator study. *Accident Analysis & Prevention*, 43(3), 1134-1139.
- [85] Stockert, S., Richardson, N. T. & Lienkamp, M. (2015). Driving in an Increasingly Automated World–Approaches to Improve the Driver-automation Interaction. *Procedia Manufacturing*, 3, 2889-2896.
- [86] Gold, C., Lorenz, L., Damböck, D. & Bengler, K. (2013). Partially Automated Driving as a Fallback Level of High Automation, In 6. *Tagung Fahrerassistenzsysteme - der Weg zum automatischen Fahren*. Munich: Technische Universität München.
- [87] Lorenz, L. & Hergeth, S. (2015). Einfluss der Nebenaufgabe auf die Überwachungsleistung beim teilautomatisierten Fahren. In VDI (Ed.), *Der Fahrer im 21. Jahrhundert* (pp. 159-173). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- [88] Lorenz, L., Kerschbaum, P. & Schumann, J. (2014). *Designing take over scenarios for automated driving: How does augmented reality support the driver to get back into the loop?* Paper presented at the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Chicago, Illinois.
- [89] Kerschbaum, P., Lorenz, L. & Bengler, K. (2014). *Highly automated driving with a decoupled steering wheel*. Paper presented at the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Chicago, Illinois.
- [90] Beller, J., Heesen, M. & Vollrath, M. (2013). Improving the driver–automation interaction an approach using automation uncertainty. *Human Factors*, 55 (6), 1130-1141.

- [91] Hergeth, S., Lorenz, L., Krems, J. F. & Toenert, L. (2015). *Effects of Take-Over Requests and Cultural Background on Automation Trust in Highly Automated Driving*. Paper presented at the 8th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design, Salt Lake City, Utah.
- [92] Körber, M., Weißgerber, T., Kalb, L., Blaschke, C. & Farid, M. (2015). Prediction of take-over time in highly automated driving by two psychometric tests. *DYNA*, 82 (193), 195-201.
- [93] Radlmayr, J., Gold, C., Lorenz, L., Farid, M. & Bengler, K. (2014). *How traffic situations and non-driving related tasks affect the take-over quality in highly automated driving*. Paper presented at the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Chicago, Illinois.
- [94] Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C. & Carsten, O. (2012). Highly automated driving, secondary task performance, and driver state. *Human Factors*, 54(5), 762-771.
- [95] Gold, C., Körber, M., Hohenberger, C., Lechner, D. & Bengler, K. (2015). *Trust in automation – Before and after the experience of take-over scenarios in a highly automated vehicle*. Paper presented at the 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2015), AHFE 2015, Las Vegas.
- [96] Lin, T.-W., Hwang, S.-L. & Green, P. A. (2009). Effects of time-gap settings of adaptive cruise control (ACC) on driving performance and subjective acceptance in a bus driving simulator. *Safety Science*, 47 (5), 620-625.
- [97] Lee, J., McGehee, D., Brown, T. & Marshall, D. (2006). Effects of adaptive cruise control and alert modality on driver performance. *Transportation Research Record*, 1980, 49-56.
- [98] Petermeijer, S. M., Abbink, D. A. & de Winter, J. C. (2015). Should drivers be operating within an automation-free bandwidth? Evaluating haptic steering support systems with different levels of authority. *Human Factors*, 57 (1), 5-20.
- [99] Stanton, N. A., Young, M. & McCaulder, B. (1997). Drive-by-wire: the case of driver workload and reclaiming control with adaptive cruise control. *Safety Science*, 27 (2), 149-159.
- [100] Ho, A. W. & Cummings, M. L. (2005). *Multiple alarms and driving situational awareness* (No. HAL2005-01). Cambridge: MIT.
- [101] Beggiato, M., Hartwich, F., Schleinitz, K., Krems, J., Othersen, I. & Petermann-Stock, I. (2015). What would drivers like to know during automated driving? Information needs at different levels of automation. Paper presented at the 7th conference on driver assistance, Munich, Germany.
- [102] Körber, M., Cingel, A., Zimmermann, M. & Bengler, K. (2015). Vigilance Decrement and Passive Fatigue Caused by Monotony in Automated Driving. *Procedia Manufacturing*, 3, 2403-2409.

Was heißt sichere Übergabe? Bewertung der Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung mittels Simulatorstudie

Dr.-Ing. **Matthias Kühn**, Unfallforschung der Versicherer, Berlin
M. Sc. **Tobias Vogelpohl**, Prof. Dr. **Mark Vollrath**, Lehrstuhl für
Ingenieur- und Verkehrspsychologie, TU Braunschweig

Kurzfassung

Fahrzeuge in denen der Fahrer Teilstrecken automatisiert fahren kann und die Fahrt nicht mehr überwachen muss, befinden sich derzeit bei vielen Automobilherstellern in der Entwicklung. Wenn diese hochautomatisierten Fahrzeuge Fahraufgaben nicht mehr bewältigen können, muss die Steuerung an den Fahrer zurückgegeben werden. Hierzu ist es notwendig, dem Fahrer einen ausreichenden Zeitraum für die Übernahme der manuellen Kontrolle über das Fahrzeug zur Verfügung zu stellen, damit die Übernahme sicher und komfortabel ablaufen kann. Um die notwendige Dauer für eine sichere Übernahme der manuellen Steuerung durch einen Fahrer zu ermitteln, wurden unterschiedlich komplexe Übernahme szenarien und Nebenaufgaben entwickelt und in einem statischen Fahrsimulator mit 60 Probanden im Alter von 20 bis 76 Jahren überprüft.

Dafür wurde eine empirische Studie konzipiert und durchgeführt, die herausfinden sollte, wann eine vollständige motorische und kognitive Kontrolle über ein Fahrzeug nach einer Phase der hochautomatisierten Fahrt wiederhergestellt wurde. Hierbei wurde besonders der Effekt eines Fahrers „out-of-the-loop“ analysiert. Der Fahrer war also zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung in einigen Versuchsbedingungen vollständig aus der Fahraufgabe genommen und durch eine Nebenaufgabe abgelenkt.

Zu beachten ist hierbei, dass die Zeiten in einem Fahrsimulator ermittelt wurden und somit nur als Annäherung an eine Übernahme in einem realen Fahrzeug dienen können. Neuere Studien deuten jedoch darauf hin, dass im Simulator ermittelte Zeiten mit denen im realen Fahrzeug gut übereinstimmen. Weiterhin ist zu beachten, dass alleine die Übernahmezeit kein ausreichendes Maß für die Qualität einer Übernahme bieten kann. Die Zeiten sind immer in Verbindung mit weiteren Maßen für die Übernahmequalität zu sehen, zu denen unter anderem die Qualität der Absicherung der Übernahme sowie die Vollständigkeit des Situationsbewusstseins während der Übernahme zählen.

Abstract

Automated vehicles in which the driver can allow the vehicle to do all the work on certain parts of the trip and no longer has to monitor anything are currently being developed by many automotive manufacturers. When there are driving tasks that these highly automated vehicles can no longer handle, control must be returned to the driver. The driver must have sufficient time to take over manual control of the vehicle safely and easily. To find out the time required for the safe takeover of manual control by a driver, takeover scenarios and secondary tasks of varying complexity were developed and tested in a static driving simulator with 60 subjects aged from 20 to 76.

An empirical study was designed and conducted to find out when full physical and cognitive control over a vehicle was reestablished after a phase of highly automated driving. The effect of a driver being "out of the loop" was analyzed, in particular. In some experimental conditions, the driver was thus completely uninvolved in the task of driving, and distracted by a secondary task, at the time of the takeover request.

It should be noted here that the times were ascertained in a driving simulator and thus can only be understood as an approximation of the time required for a takeover in a real vehicle. However, more recent studies do indicate that times ascertained in a simulator correlate well with those in a real vehicle. It should also be emphasized that the takeover time alone cannot be an adequate measure of the quality of a takeover. The times must always be seen in connection with other measures of the quality of the takeover. This includes the quality of the safety of the takeover and the fullness of the driver's awareness of the situation during the takeover.

1. Versuchsdesign

Das Versuchsdesign enthält die unabhängigen Variablen *Art der Nebenaufgabe* sowie *Art der Situation*. Die Nebenaufgaben wurden hierbei auf vier Gruppen aufgeteilt: Die Versuchsgruppe *Manuell* sollte alle Situationen ohne die Automation und ohne Nebenaufgabe als manueller Fahrer erleben. Die Versuchsgruppe *Überwacht* sollte mit eingeschalteter Automation, ebenfalls ohne Nebenaufgabe, fahren, aber die Automation während der Fahrt überwachen. Die zwei weiteren Versuchsgruppen sollten mit eingeschalteter Automation fahren und dabei unterschiedlich motivierende Nebenaufgaben bearbeiten.

Jeder Proband in den jeweiligen Versuchsgruppen erlebte fünf Fahrscenarien in denen Übernahme-situationen stattfanden. Eine Fahrt dauerte etwa 5 Minuten. Die Szenarien

unterschieden sich in ihrem Grad der Komplexität, blieben jedoch im Sinne der Auswertung in ihrem Ablauf möglichst vergleichbar. Entsprechend der Gruppen und der Szenarien wurde ein gemischtes 4x5 Versuchsdesign entwickelt, dass in Tabelle 1 noch einmal zusammenfassend dargestellt ist.

Tabelle 1: Versuchsdesign mit den Faktoren *Art der Nebenaufgabe* und *Art der Übernahme-situation*.

Faktor A: Art der Nebenaufgabe (zwischen den Gruppen)	Faktor B: Art der Übernahme-situation (innerhalb der Personen)				
	Szenario M01	Szenario M02	Szenario M03	Szenario M04	Szenario M05
Manuelle Fahrt (n=15)	•	•	•	•	•
Automatisierte Fahrt ohne Nebenaufgabe (n=15)	•	•	•	•	•
Automatisierte Fahrt mit Nebenaufgabe 1 (n=15)	•	•	•	•	•
Automatisierte Fahrt mit Nebenaufgabe 2 (n=15)	•	•	•	•	•

2. Im Fahrsimulator umgesetzte Übernahme-szenarien

Die Versuche wurden in dem statischen Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ingenieur- und Verkehrspsychologie der TU Braunschweig durchgeführt.

Die Fahrsimulation wurde mit der Software-Umgebung SILAB [1] in der Version 4 umgesetzt. 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 **Fehler!** **Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.



Bild 1: Konfiguration der Sitzkiste und des Simulator-Raums

Um technisch sinnvolle Szenarien für eine Übernahme gestalten zu können, wurden auf Grundlage aktueller Publikationen zu Fähigkeiten und Grenzen automatisierter Fahrsysteme Experteninterviews durchgeführt [2] [3] [4] [5] [6]. Ein besonderer Fokus lag hierbei auf der Frage, in welchen Situationen ein automatisiertes Fahrzeug die Steuerung des Fahrzeugs übernehmen könnte und in welchen Situationen eine Übergabe an den Fahrer eingeleitet werden würde. Aus den Antworten der Interviews wurde ein typisches automatisiertes Fahrzeug mit bestimmten Fähigkeiten und Limitationen abgeleitet. Ein automatisiertes Fahrzeug der näheren Zukunft wird demnach in Deutschland...

- auf einer Autobahn fahren.
- in gemischtem Verkehr zusammen mit automatisierten und nicht-automatisierten Fahrzeugen fahren.
- nur begrenzt mit anderen Fahrzeugen oder der Infrastruktur vernetzt sein (GPS, Mobile Data, Car-to-X).
- mit einer Geschwindigkeit von max. 100-130 km/h fahren (umfasst auch Stau-Assistenten mit niedrigeren Geschwindigkeiten).
- unabhängig von der Verkehrsdichte fahren.
- alle Straßenschilder erkennen.
- alle anderen Verkehrsteilnehmer erkennen die auf der Autobahn auftreten können.
- die Fahrspur halten und teilweise auch Überholvorgänge durchführen können.

- bei guten bis mittleren Wetter- und Straßenbedingungen funktionieren.
- teilweise die Nutzung von externen Geräten und internen Fahrzeugkomfortfunktionen während der Fahrt erlauben.
- zeitlich unbegrenzt automatisiert Fahren (keine Rückgabe der Steuerung nach einem festen Zeitintervall).
- zuverlässig alle Systemgrenzen erkennen.
- die Rückgabe der Steuerung an den Fahrer mit einem Zeitpuffer initiieren.
- den Fahrer multimodal über eine bevorstehende Übergabe informieren.
- jederzeit einen risikominimalen Zustand (z.B. Nothalt) herbeiführen können.

Auf Grundlage der Antworten in den Interviews und der Literatur wurden fünf Übernahmeszenarien entwickelt, die die aktuellen Systemgrenzen eines automatisierten Fahrzeugs möglichst gut widerspiegeln und gleichzeitig unterschiedliche Grade an Komplexität aufweisen. Da die in näherer Zukunft in Deutschland verfügbaren Systeme zunächst vorwiegend auf Autobahnen eingesetzt werden sollen, wurde für alle Szenarien eine mehrspurige Autobahn als Grundlage für die Simulation verwendet. Die für den Fahr Simulator umgesetzten Szenarien sind in Tabelle 3 zusammenfassend dargestellt. In den Szenarien *M01*, *M02*, *M03* und *M05* wurde die Übernahme der Steuerung auf einer Autobahn mit drei Fahrspuren pro Fahrtrichtung simuliert. In Szenario *M04* waren nur zwei Fahrspuren vorhanden.

Für die vorliegende Studie wurde von einer *perfekten* Automation (im Gegensatz zu einer *imperfekten* Automation z.B. in [7]) ausgegangen. Hiermit ist eine Automation gemeint die weder falsche Alarmer ausgibt noch kritische Situationen als unkritisch einstuft. Dieser Bereich der Automationsforschung wurde für diese Studie bewusst ausgeklammert, da der Einfluss der Reliabilität der Automation auf das Verhalten der Nutzer nicht untersucht werden sollte. Es wurde also eine Automation implementiert die in 100 Prozent der Situationen eine Übernahmeaufforderung korrekt ausgab und alle Systemgrenzen richtig erkannte.

Weiterhin wurde festgelegt, dass die Automation in der Lage ist, das volle Spektrum der Fahrzeugdynamik in der Längsführung auszunutzen. Die Automation konnte also sowohl 100 Prozent der möglichen Beschleunigung als auch 100 Prozent der möglichen Verzögerung des Fahrzeugs nutzen um Situationen zu bewältigen. Nicht implementiert wurde hingegen eine Funktion, die Situationen über einen Spurwechsel oder ein Ausweichmanöver hätte entschärfen können. Die von der Automation gefahrene Geschwindigkeit wurde auf 120 km/h festgesetzt. Die Automation hielt während der automatisierten Fahrt vor der Übernahmeaufforderung (Take-Over-Request, TOR) einen Abstand von 60 Metern zu eventuell vorausfahrenden Fahrzeugen ein. Vergleichbar zu dem von in [8] definierten Point-

of-No-Return wurde zusätzlich ein minimaler Abstand zwischen dem vorausfahrenden Fahrzeug und dem Ego-Fahrzeug definiert, der von der Automation eingehalten wurde solange diese eingeschaltet blieb. Die hier implementierte Automation bremste kurz vor dem Erreichen des minimalen Abstands stark ab und vermied so eine Kollision. Hierdurch wurde die Minimalbedingung für einen risikominimalen Zustand erfüllt. Nach den vorhandenen Klassifizierungen für automatisierte Fahrsysteme lässt sich das definierte System demnach am ehesten in der Stufe *Hochautomatisiert* nach [9] einordnen.

Die Automation meldete die Bereitschaft zur Übernahme der Steuerung über ein einfaches Symbol, bestehend aus grün eingefärbten Händen und einem Lenkrad. War die Automation aktiv, wurde ein in grün und blau gehaltenes Symbol eines Fahrzeugs mit einem umgebenden Kreis angezeigt. Die Übernahmeaufforderung wurde über rot eingefärbte Hände sowie ein rotes Lenkrad symbolisiert und von einem Warnton begleitet, wodurch die Anforderung eine multimodale Warnung zu verwenden erfüllt wurde. Die Symbole wurden im Fahrsimulator im Head-Up Display eingeblendet. Die verwendeten Piktogramme sind mit kurzen Erläuterungen in

Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Piktogramme zum Zustand der Automation.









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

Tabelle 3: Darstellung der im Fahrsimulator umgesetzten Übernahmeszenarien.

Szenario	Bild der Übernahmesituation	Beschreibung der Übernahmesituation
M01		Es beschreibt eine Übernahmesituation in der der Fahrer aufgefordert ist, die Steuerung zu übernehmen um eine bestimmte Route zu wählen, bzw. um von der Autobahn abzufahren. Es gibt keinen umgebenden Verkehr. 5,25 Sekunden nach der Übernahmeaufforderung wird ein Navigationspfeil im Head-Up Display eingeblendet, der zum Spurwechsel auffordert.
M02		Es beschreibt eine Übernahmesituation in der das Fahrzeug aufgrund von fehlenden Fahrbahnmarkierungen nicht mehr in der Lage ist, mit ausreichender Sicherheit zu lenken und daher an den Fahrer übergibt. Ein Führungsfahrzeug fährt mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Ego-Fahrzeug in der Spur des Ego-Fahrzeugs. Auf der Überholspur wird eine moderate Verkehrsdichte simuliert. Zu dem Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung hat das Führungsfahrzeug einen Abstand von ca. 250 Metern zum Ego-Fahrzeug und behält zunächst die Geschwindigkeit von 120 km/h bei. Nach 5,25 Sekunden bremst das Führungsfahrzeug stark, bis es eine Geschwindigkeit von 80 km/h erreicht hat, die es danach hält.
M03		Es beschreibt eine Übernahmesituation, in der das Fahrzeug aufgrund eines ausgefallenen Sensors oder eines Softwarefehlers nicht mehr in der Lage ist mit ausreichender Sicherheit zu lenken und daher an den Fahrer übergibt. Der Ablauf des Szenarios ist analog zu Szenario M02, mit dem einzigen Unterschied, dass keine fehlende Fahrbahnmarkierung simuliert wird.
M04		Es beschreibt eine Übernahmesituation in der das Fahrzeug aufgrund einer Baustelle nicht mehr in der Lage ist mit ausreichender Sicherheit zu lenken und daher an den Fahrer übergibt. Auf der Überholspur wird hierbei zusätzlich eine hohe Verkehrsdichte simuliert. Ab dem Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung verlangsamt die Automation das Ego-Fahrzeug entsprechend der durch Verkehrsschilder dargestellten Geschwindigkeitsbegrenzungen von ursprünglich 120 km/h auf 60 km/h. Zusätzlich zu der Baustelle in einer Entfernung von 300 Metern von der Übernahmeaufforderung entfernt, wird ein liegen gebliebenes Fahrzeug simuliert, das zum Teil auf der Fahrspur des Ego-Fahrzeugs steht. Die Entfernung von dem Ego-Fahrzeug zu dem liegen gebliebenen Fahrzeug liegt zu dem Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung bei 175 Metern.
M05		Es beschreibt eine Übernahmesituation in der das Fahrzeug aufgrund extremer Wetterbedingungen nicht mehr in der Lage ist mit ausreichender Sicherheit zu lenken und daher an den Fahrer übergibt. Der Ablauf des Szenarios ist analog zu den Szenarien M02 und M03. Zusätzlich wird zu dem Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung das plötzliche Einsetzen eines Starkregens simuliert, der für die Dauer des Szenarios anhält.

3. Im Fahrsimulator umgesetzte Nebenaufgaben

Für die Ermittlung einer realistischen Übernahmezeit wurde die Anforderung aufgestellt, dass der Fahrer die Übernahme durchführt, nachdem er so vollständig und realistisch wie möglich aus dem Regelkreis (*out-of-the-loop*) war. Er hat sich also während der automatisierten Fahrt mit einer vollkommen anderen Aufgabe als der Fahraufgabe beschäftigt und sein Situationsbewusstsein im Moment der Übernahmeaufforderung war stark eingeschränkt. Um den Fahrer entsprechend dieser Anforderungen visuell, kognitiv und motorisch zu beanspruchen und von der Fahraufgabe abzulenken, wurden zwei Nebenaufgaben entwickelt, die im Kontext von automatisiertem Fahren realistisch erscheinen.

Eine Vielzahl von Nebenaufgaben ist bereits für eben diese Art der Ablenkung während einer automatisierten Fahrt verwendet worden. Die häufigste Art der Präsentation der Nebenaufgabe scheint bislang auf einem Tablet-Computer bzw. auf einem Smartphone oder Laptop-Bildschirm zu sein. Eine weitere Art der Präsentation ist die fahrzeuginterne Mensch-Maschine-Schnittstelle (Human-Machine-Interface, HMI). Außerdem wurden bereits rein sprachliche Aufgaben getestet und in einigen Studien auch analoge Medien wie z.B. Zeitschriften verwendet.

Es wurden zwei zu untersuchende Nebenaufgaben definiert: Die Aufgabe *Lesen* bestand aus dem Lesen von Zeitschriftenartikeln auf einem Tablet Computer. Die Aufgabe *Spiel* beinhaltete das Spielen eines Spiels über den Touchscreen eines Tablet-Computers. Beide Aufgaben wurden als visuell, motorisch und kognitiv beanspruchend eingestuft. Für die Aufgabe *Spiel* wurde zusätzlich vermutet, dass das Spiel für die Testfahrer besonders involvierend ist und somit das Loslösen von der Aufgabe erschwert wird.

Für die Auswahl eines geeigneten Spiels für diese Aufgabe wurden zunächst Anforderungen an das Spiel aufgestellt. Das Spiel sollte eine möglichst hohe Motivation und Immersion bieten, motorisch beanspruchend, möglichst schwer unterbrechbar und leicht zu erlernen sein. Das Spiel Tetris zeigte sich als am besten als ablenkende Nebenaufgabe geeignet. Das Grundprinzip des Spiels ist es, vom oberen Bildschirmrand herabfallende Spielsteine mit unterschiedlichen geometrischen Formen durch Verschieben und Drehen auf eine möglichst platzsparende Weise zu stapeln und so lückenlose Reihen am unteren Rand des Bildschirms zu bilden. Das Drehen und Verschieben der Spielsteine erfolgte in dieser Version des Spiels über das Tippen und Wischen auf dem Touchscreen des Tablet-PCs. Vollständige Reihen werden aufgelöst und mit Punkten belohnt. Unvollständige Reihen bleiben erhalten. Auf jeden gestapelten Spielstein folgt unmittelbar der nächste Spielstein, wodurch sich das Spielfeld zunehmend füllt und die Schwierigkeit im Verlauf des Spiels ansteigt. Abbildung 2

zeigt die Spieloberfläche auf dem Tablet-Computer eines typischen Spielfelds im Verlauf des Spiels.



Bild 1: Screenshot eines typischen Spielverlaufs in der als Nebenaufgabe ausgewählten Version des Spiels Tetris.

4. Versuchsablauf

Zu Beginn wurden die Probanden über den geplanten Versuch und den Umgang mit dem Fahr Simulator informiert. Im Anschluss wurden die Probanden über die Ziele der Studie informiert und hinsichtlich ihres Verhaltens instruiert. Ein besonderer Fokus lag hierbei auf dem Einhalten der Straßenverkehrsordnung, dem Beachten der Geschwindigkeitsbegrenzungen auf der Strecke und dem Absichern der Umgebung. Den Probanden wurde in den Instruktionen außerdem die Funktionsweise des automatisierten Assistenzsystems beschrieben. Es wurde deutlich gemacht, dass das System die Steuerung über das Fahrzeug vollständig übernehmen kann, es aber Fahrsituationen gibt, die vom Fahrzeug nicht alleine bewältigen werden können. Entsprechend der Definition der Fähigkeiten der Automation wurde kommuniziert, dass solche Situationen von dem Fahrzeug zu 100 Prozent richtig erkannt werden und dass das Fahrzeug die Fahrer entsprechend mit einem Zeitpuffer vor dem Eintreten der Situation informiert. Die Fahrer wurden auch darüber informiert, dass das System immer so lange aktiv bleibt bis der Fahrer das System aktiv abschaltet.

Zusätzlich wurden die Bedienung des Systems (Ein- und Ausschalten) sowie die möglichen Statusanzeigen des Systems erläutert. Zum Einschalten der Automation wurde ein Hebel hinter dem Lenkrad verwendet, dessen Bedienung analog zu aktuellen Tempomat- und ACC-Systemen funktionierte. Es wurde erklärt, dass die automatische Steuerung des Fahrzeugs beendet wird, sobald die Fahrer entweder diesen Hebel hinter dem Lenkrad

erneut betätigen oder sie das Bremspedal treten. Alle diese Informationen wurden als Vorbereitung auf eine erste Trainingsfahrt mit der Automation gegeben.

Nach Abschluss der Trainingsfahrt wurden den Probanden Instruktionen entsprechend ihrer Versuchsgruppe gegeben und die jeweilige Nebenaufgabe wurde erklärt und eingeübt. Die Instruktionen definierten die drei automatisierten Versuchsgruppen: *Überwacht*, *Lesen* und *Spiel*. Alle automatisierten Gruppen sollten die Steuerung nur dann übernehmen, wenn von dem Fahrzeug eine Übernahmeaufforderung ausgegeben wurde. Die Gruppe *Manuell* hatte keine automatisierte Fahrfunktion zur Verfügung. Den Probanden in dieser Versuchsgruppe wurde ein fiktives Assistenzsystem erklärt, das schwierige Situationen erkennt und entsprechend vor diesen Situationen warnt. Diese Warnung entsprach in allen Situationen dem Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung in den automatisierten Gruppen.

5. Definition der gemessenen objektiven Parameter

Die Definition der zu messenden Parameter ist unbedingt notwendig, um die Ergebnisse vergleichbar zu machen und um zu verstehen, wie die Ergebnisse entstanden sind. Als objektive Parameter werden in dieser Studie alle diejenigen Messwerte verstanden, die anhand von Zeiten, Fahrdaten, Simulatordaten, Blickdaten und Videodaten erhoben wurden. Besonders wichtig sind die Definitionen, wenn Reaktionszeiten berichtet werden sollen, da schon ein minimal abweichendes Verständnis von Messzeitpunkten für diese Reaktionen zu Abweichungen in der Interpretation der Ergebnisse führen können.

Messzeitpunkte und Reaktionszeiten

Für die Definition der Messzeitpunkte zur Erhebung von Reaktionszeiten wurde auf die vorhandene Literatur zurückgegriffen. Der Messzeitpunkt für den Start der Messung ist hierbei in fast allen Studien gleich und geht von dem Moment der Präsentation der Übernahmeaufforderung aus. Für das Ende der Messung und somit den für die Definition der Reaktionszeit entscheidenden Zeitpunkt, lassen sich eine Reihe von Kriterien identifizieren die als Hinweis auf eine Übernahme der Kontrolle bzw. als Hinweis auf eine Reaktionsbereitschaft gewertet werden. In [10] werden vier Klassen von Reaktionen während der Übernahme definiert. Diese Klassen sollen hier verwendet werden, um die in den bisherigen Studien operationalisierten Messzeitpunkte zu ordnen: *Orientierungsreaktion*, *Handlungsbereitschaft*, *Handlungsdurchführung* und *Fahrzeugstabilisierung*.

Die häufigsten Operationalisierungen für die *Orientierungsreaktion* sind das Aufblicken von der bearbeiteten Nebenaufgabe nach einer automatisierten Fahrt (z.B. [10] sowie die Blickzuwendung zur Straße z.B. [11] [12]). Für die vorliegende Studie wurde für die Definition

der Reaktionszeit *Blick auf die Straße* der Zeitraum zwischen der Präsentation der Übernahmeaufforderung und dem ersten Blick auf die Straßenmitte definiert. Die Blickbewegungen in der Studie wurden mithilfe des Blickbewegungssystems „Dikablis“ [13] erhoben, dass eine Trackingfrequenz von 50 Hz bereitstellt.

Für die Reaktion *Handlungsbereitschaft* wurden am häufigsten Reaktionen an den Stellteilen definiert, die entweder berührt oder umfasst werden mussten, um als handlungsbereit klassifiziert zu werden (z.B. erster Kontakt mit dem Lenkrad [10] [14]; Hände am Lenkrad [11] [15] [16]). Entsprechend dieser Definitionen von Handlungsbereitschaft wurde für die vorliegende Studie davon ausgegangen, dass Fahrer motorisch die Möglichkeit hatten, in die Situation einzugreifen bzw. die Steuerung zu übernehmen, sobald Sie mit mindestens einer Hand das Lenkrad umfassen. Als zusätzlicher Messwert für die Handlungsbereitschaft wurde für diese Studie der Zeitpunkt definiert, an dem der Fuß des Fahrers das Gas- oder Bremspedal berührt. Sowohl die Hand- als auch die Fußbewegungen wurden mithilfe von Kameras (25 Bilder pro Sekunde) erhoben.

Größere Unterschiede als bei der Handlungsbereitschaft zeigten sich in den vorhandenen Studien bei der Definition des Messzeitpunktes für die *Handlungsdurchführung*. Für die nachfolgende Studie wurden entsprechend Kriterien für eine erste Handlungsdurchführung nach einer Übernahmeaufforderung festgelegt. Der Zeitpunkt des Abschaltens der Automation wurde definiert als Betätigung des Hebels, mit dem die Automation abgeschaltet wurde, oder als erste Reaktion am Bremspedal (Bremspedalstellung > 0). Weiterhin wurde eine Bremsreaktion definiert als Betätigen des Bremspedals von mehr als 10 Prozent, um diese Reaktion von dem bloßen „Antippen“ des Bremspedals zum Abschalten der Automation nach einer Übernahmeaufforderung zu unterscheiden. Für die Blickreaktionen wurden in dieser Klasse der Reaktionen außerdem die Zeitpunkte festgelegt, in denen die Fahrer das erste Mal in den Seitenspiegel oder auf den Tacho sahen. Diese Werte wurden analog zu dem Blick auf die Straße mithilfe des Blickbewegungssystems erhoben. Um wie in [15] Hinweise auf das Verhalten der Fahrer nach einer Übernahmeaufforderung zu erhalten, wurden die Arten der Reaktionen auf die Übernahmeaufforderung klassifiziert als „keine Reaktion“, „Bremsen“, „Lenken und Bremsen“, „Ausschalten der Automation mit dem Hebel“ und „Nur Lenken“.

Fahrdaten

Auch für die *Fahrzeugstabilisierung* wurde in bereits veröffentlichten Studien eine Reihe von verschiedenen Maßen verwendet, die im folgenden Abschnitt beschrieben werden. Für die Beschreibung der Stabilisierung des Fahrzeugs nach einer Übernahmeaufforderung werden häufig verschiedenste Fahrdaten verwendet, die Hinweise auf das Verhalten der Fahrer während und nach einer Übernahme liefern können.

Für die vorliegende Studie wurden sowohl mittlere Werte als auch absolute Kriterien definiert anhand derer die Qualität der Übernahme nach einer Übernahmeaufforderung sowie nach dem Event in den jeweiligen Szenarien bewertet werden sollte. Bezogen auf durchschnittliche Werte über einen Zeitraum wurden die gewählten Geschwindigkeiten während und nach der Übernahmesituation, die Intensität der Bremsreaktion, der Abstand zum Vorderfahrzeug sowie maximale Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung erhoben. Als absolute Kriterien für die Qualität einer Übernahme wurden Kollisionen mit dem umgebenden Verkehr analysiert und kritische Ereignisse definiert. Als kritische Ereignisse wurden starke Bremsungen als Kombination aus einem hohen maximalen Bremsdruck und einer hohen maximalen Verzögerung des Fahrzeugs, das Stoppen des Fahrzeugs innerhalb eines Szenarios (Geschwindigkeit < 10 km/h), sowie die Eingriffe der Automation in die Steuerung (Einleiten des risikominimalen Zustands) gezählt.

6. Versuchspersonen

Die Fahrsimulatorstudie wurde im August 2015 mit 60 Versuchspersonen im Alter von 20 bis 76 Jahren durchgeführt. 22 Personen der Stichprobe waren weiblich, 38 Personen männlich. Die Teilnehmer der Studie waren im Durchschnitt seit 18 Jahren im Besitz eines Führerscheins.

Die Hälfte der Teilnehmer gab eine Fahrleistung von weniger als 9000 Kilometer im Jahr an, die andere Hälfte der Teilnehmer gab eine höhere jährliche Fahrleistung an. Erfahrungen im Umgang mit Assistenzsystemen der Längsführung (Tempomat, ACC, Notbremsassistent) gaben 26 Teilnehmer an, 17 Personen hatten außerdem bereits Erfahrungen im Umgang mit Assistenten der Querführung gesammelt (Spurhalteassistent, Spurverlassenswarner, Spurwechselassistent, Totwinkelassistent). 38 Personen aus der Stichprobe hatten bereits einmal (5 Personen) oder mehr als einmal (33 Personen) eine Fahrt in einem Fahrsimulator absolviert.

7. Ergebnisse: Reaktionsverläufe

Die folgenden Grafiken stellen die Reaktionen der einzelnen Versuchspersonen auf eine Übernahmeaufforderung (Take-Over-Request; TOR) dar. Die x-Achse repräsentiert die Zeit, die nach einer Übernahmeaufforderung vergangen ist. Die y-Achse zeigt den prozentualen Anteil der Testfahrer, die in dieser Gruppe die dargestellten Reaktionen bis zu dem jeweiligen Zeitpunkt bereits gezeigt hatten. Die Abbildung 4 kann also beispielsweise so gelesen werden: Ca. 2,5 Sekunden nach der Übernahmeaufforderung hatten ca. 90 Prozent der Testfahrer in der Gruppe „Überwacht“ die Hände wieder am Lenkrad. Einige weitere deskriptive statistische Maße können aus den Darstellungen abgeleitet werden. Die Steilheit der sich ergebenden Verläufe repräsentiert die Streuung der Reaktionen über die Zeit. Ein sehr steiler Verlauf bedeutet somit eine geringe Streuung, während ein flacher Verlauf auf eine starke Streuung hindeutet. Plateaus in den Verläufen können ein Hinweis auf eine Aufteilung der Stichprobe in verschiedene Verhaltens-Gruppen sein.

In einigen Diagrammen sind Zeitspannen grafisch hervorgehoben. Sie zeigen die notwendigen Zeiten, in denen 90% der durch eine stark beanspruchende, motivierende und herausfordernde Nebenaufgabe („Spiel“) abgelenkte Fahrer die jeweilige Reaktion gezeigt haben.

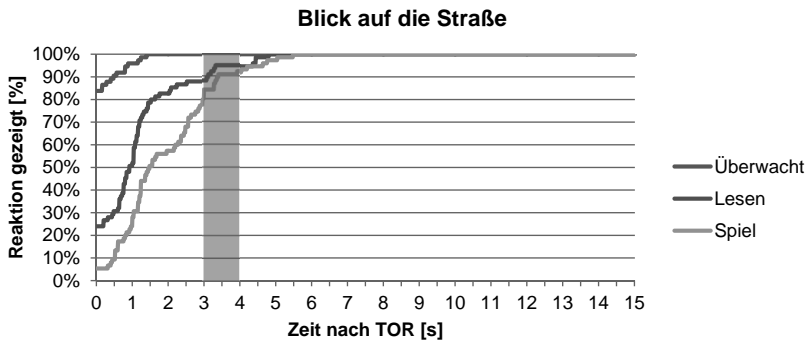


Bild 3: Reaktionsverläufe der Versuchspersonen für den ersten „Blick auf die Straße“

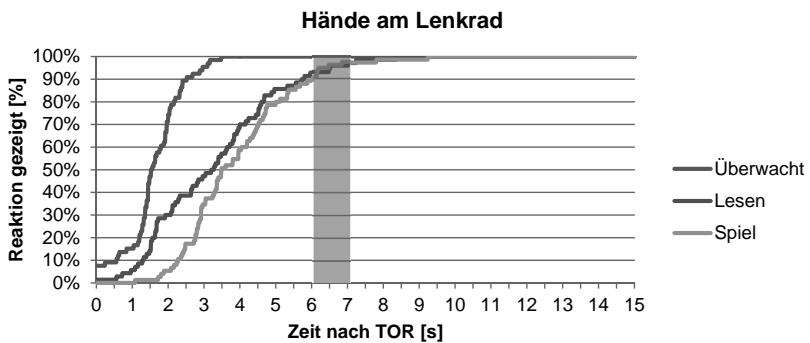


Bild 4: Reaktionsverläufe der Versuchspersonen für „Hände am Lenkrad“

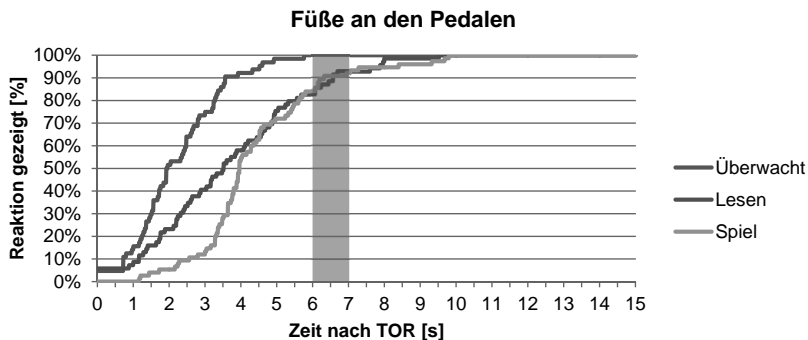


Bild 5: Reaktionsverläufe der Versuchspersonen für „Füße an den Pedalen“

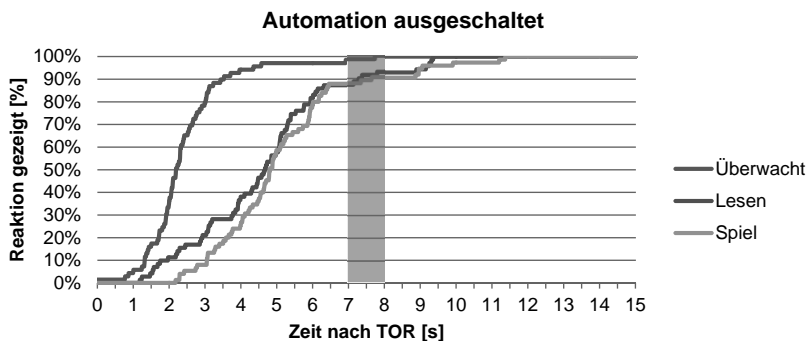


Bild 6: Reaktionsverläufe der Versuchspersonen für das Ausschalten der Automation

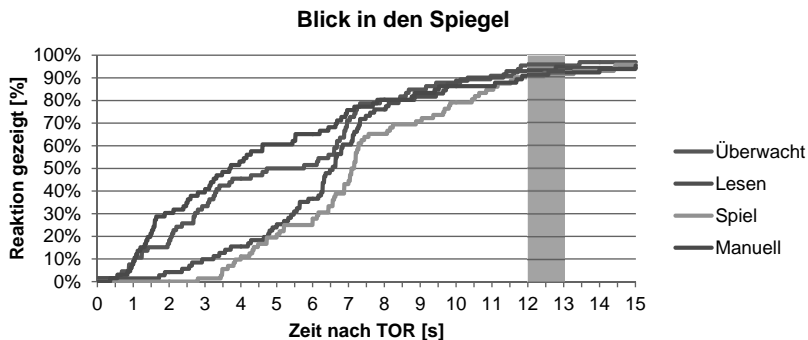


Bild 7: Reaktionsverläufe der Versuchspersonen für den ersten Blick in den Spiegel

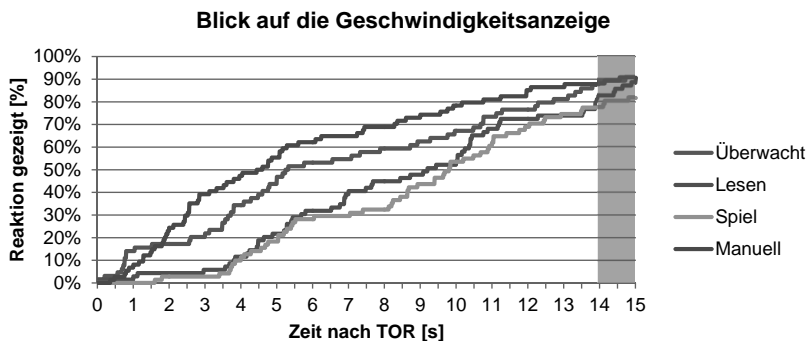


Bild 8: Reaktionsverläufe der Versuchspersonen für den ersten Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige

7. Zusammenfassung der Ergebnisse und Empfehlungen

Es zeigte sich, dass 90 Prozent der Fahrer nach einer Fahrt mit hoher Ablenkung nach 3-4 Sekunden das erste Mal den Blick wieder auf die Straße gerichtet hatten, nach 6-7 Sekunden die Hände wieder am Lenkrad und die Füße wieder an den Pedalen hatten und nach 7-8 Sekunden die Automation abschalteten (siehe Abbildungen 3-6). Untersucht man allerdings als Indikatoren des Situationsbewusstseins für die Fahrsituation den ersten Blick in den Spiegel und den Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige, werden 12-15 Sekunden benötigt (siehe Abbildungen 7 und 8). Diese Reaktionen, die zum Verständnis der aktuellen Verkehrssituation notwendig sind, sind damit um bis zu 5 Sekunden verzögert im Vergleich zu der gleichen Situation bei einer manuellen Fahrt. Ein Teil dieses Zeitraums könnte eingespart werden, wenn Fahrer in einer Übernahme-situation kein externes Gerät (z.B. Smartphone, Tablet) aus den Händen legen müssten.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrern waren bei all diesen Reaktionen sehr hoch. Einige Fahrer zeigten deutlich schnellere Reaktionen. Allerdings gab es auch einzelne Fahrer, die für ihre Reaktionen mehr als die oben genannten Zeiten benötigten. Bei einzelnen Fahrern traten nach der Übernahme von der Automation Kollisionen oder kritische Fahrsituationen auf, was allerdings auch in der rein manuellen Fahrt in ähnlichem Umfang der Fall war. Diese Situationen hätten durch entsprechende Assistenzfunktionen (z.B. Notbremsassistent) verhindert werden können, so dass auch nach der Übergabe an den Fahrer Assistenzfunktionen vorhanden sein sollten, die den Fahrer unterstützen und Fehlreaktionen verhindern.

Die Bremsreaktionen auf ein kritisches Ereignis unmittelbar nach der Übernahmeaufforderung waren im Vergleich zu der manuell fahrenden Versuchsgruppe in den Automations-Gruppen nicht verzögert. Auch waren die gefahrenen Abstände zu den Vorderfahrzeugen in den Automations-Gruppen nicht geringer als in der manuellen Gruppe. Die etwas geringeren Geschwindigkeiten nach der Übernahmeaufforderung bei stark abgelenkten Personen weisen auf ein eher vorsichtiges Fahrverhalten nach der Übernahme hin.

Die Art der Übernahme-situation selbst scheint auf die Reaktionen nur einen geringen Einfluss zu haben. Dagegen führte ein stärkeres positives Engagement in der Nebenaufgabe mit einer schlechteren Unterbrechbarkeit zu leichten Verzögerungen vor allem bei den ersten Schritten der Übernahme.

Die verwendete Automation war in der Lage, auch nach der Ausgabe der Übernahmeaufforderung das Fahrzeug so lange sicher zu steuern, bis der Fahrer das Fahrzeug übernommen hatte. Hierzu gehörte das korrekte Halten der Spur, die korrekte

Wahl der Geschwindigkeit, das Einhalten eines Mindestabstands zu vorausfahrenden Fahrzeugen und wenn nötig, auch ein Anhalten vor einem Hindernis. Hatte der Fahrer nach 10 Sekunden nicht übernommen, dann hielt die Automation das Fahrzeug an („risikominimaler Zustand“). Dass dies in einigen Fällen notwendig war, zeigt, dass 10 Sekunden für einige Fahrer für eine sichere Übernahme nicht ausreichen und ist ein weiterer Hinweis auf die Notwendigkeit von unterstützenden Assistenzsystemen auch nach der Übernahmeaufforderung.

Beim Vergleich der Reaktionsverläufe von überwachenden und maximal abgelenkten Fahrern werden allgemein Verzögerungen aller Reaktionen im Vergleich zu manuellen Fahrern deutlich. Am deutlichsten tritt dies bei abgelenkten Fahrern auf. Aber bereits beim überwachenden Fahrer treten hier Verzögerungen der Reaktion im Vergleich zum manuellen Fahrer auf. Überträgt man diese Erkenntnis zum Verhalten des überwachenden Fahrers auf das teilautomatisierte Fahren, so erkennt man bereits nach einer fünfminütigen automatisierten Fahrt die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Erkenntnisse bei der Gestaltung teilautomatisierter Fahrfunktionen.

Voraussetzungen für eine sichere Übernahme

Die folgenden Punkte fassen die Voraussetzungen für eine sichere Übernahme der manuellen Steuerung nach einer hochautomatisierten Fahrt zusammen:

- Der Fahrer wird so früh wie möglich und so eindeutig wie möglich von der Notwendigkeit zur Übernahme der Steuerung in Kenntnis gesetzt.
- Sollen mindestens 90 Prozent der Fahrer richtig reagieren können, muss die Übergabezeit mehr als acht Sekunden betragen. In dieser Zeit legt ein Fahrzeug bei einer Fahrgeschwindigkeit von 120 km/h etwa 267 m zurück.
- Die Automation muss während des Übernahmeprozesses so lange aktiv bleiben, bis der Fahrer eindeutig die Bereitschaft zur Übernahme der Steuerung signalisiert hat.
- Bleibt die Übernahme aus, muss die Automation in der Lage sein, einen risikominimalen Zustand herbeizuführen, der für die vorliegende Situation angemessen ist.
- Das Fahrzeug erkennt 100 Prozent aller Situationen, die zu einer Übergabe der Steuerung an den Fahrer führen, ausreichend früh, um die Übernahmezeit zu gewährleisten.

Weitere Empfehlungen für eine sichere Übernahme

Eine sichere und komfortable Übernahme der manuellen Steuerung nach einer hochautomatisierten Fahrt durch den Fahrer könnte durch bestimmte Maßnahmen erleichtert werden:

- Die Automation sollte umfassend, aber sparsam, über die vorliegende Situation informieren, um den Aufbau eines Situationsbewusstseins nach einer automatisierten Fahrt zu vereinfachen.
- Eine erhöhte Assistenzbereitschaft des Fahrzeugs nach der Übernahme der Steuerung durch den Fahrer könnte dazu beitragen, unangebrachte Reaktionen durch den Fahrer zu vermeiden (z.B. Verhindern von unnötigen Vollbremsungen oder Ausweichmanövern).
- Eine Warnkaskade unter Verwendung verschiedener Warnmodalitäten kann dem Fahrer die Dringlichkeit der Situation vermitteln und die Wahrnehmbarkeit der Warnung gewährleisten.
- Fahrer könnten gezielt für die Fähigkeiten und Grenzen einer automatisierten Fahrfunktion geschult werden, sodass angemessene Reaktionen im Falle einer Übernahme sichergestellt sind und ein zu frühes Ausschalten der Automation verhindert wird.

6. Literaturangaben

- [1] 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).
- [2] Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B., & Winner, H. (Eds.). (2015). *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer-Verlag.
- [3] Meyer, G., & Beiker, S. [Hrsg.] (2014). *Road Vehicle Automation*. Springer.
- [4] Ziegler, J., Bender, P., Schreiber, M., Lategahn, H., Strauss, T., Stiller, C., & Zeeb, E. (2014). Making Bertha Drive? An Autonomous Journey on a Historic Route. *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE*, 6(2), 8-20.
- [5] Aeberhard, M., Rauch, S., Bahram, M., Tanzmeister, G., Thomas, J., Pilat, Y., & Kaempchen, N. (2015). Experience, Results and Lessons Learned from Automated Driving on Germany's Highways. *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE*, 7(1), 42-57.
- [6] Hillel, A. B., Lerner, R., Levi, D., & Raz, G. (2014). Recent progress in road and lane detection: a survey. *Machine Vision and Applications*, 25(3), 727-745.

- [7] Skitka, L. J., Mosier, K., & Burdick, M. D. (2000). Accountability and automation bias. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52(4), 701-717.
- [8] Strand, N., Nilsson, J., Karlsson, I. M., & Nilsson, L. (2014). Semi-automated versus highly automated driving in critical situations caused by automation failures. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 27, 218-228.
- [9] Gasser, T. M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., ... & Vogt, W. (2012). Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Fahrzeugtechnik*, (83).
- [10] Petermann-Stock, I., Hackenberg, L., Muhr, T., Josten, J., & Eckstein, L. (2015). „Bitte übernehmen Sie das Fahren!": ein multimodaler Vergleich von Übernahmestrategien. *Beiträge zum 16. Braunschweiger Symposium für Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET) Februar 2015* (pp. 346-369). Braunschweig: IST Niedersachsen e.V.
- [11] Damböck, D. (2013). *Automationseffekte im Fahrzeug–von der Reaktion zur Übernahme* (Doctoral dissertation, München, Technische Universität München, Diss., 2013.)
- [12] Gold, C., Damböck, 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 Annual Meeting* (Vol. 57, No. 1, pp. 1938-1942). SAGE Publications.
- [13] Lange, C. (2005). The development and usage of Dikablis (Digital wireless gaze tracking system). *Abstracts of the 13th European Conference on Eye Movements ECEM13, Bern* (2005), p. 50
- [14] Zeeb, K., Buchner, A., & Schrauf, M. (2015). What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 78, 212-221.
- [15] Lorenz, L., Kerschbaum, P., & Schumann, J. (2014). Designing take over scenarios for automated driving How does augmented reality support the driver to get back into the loop?. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 58, No. 1, pp. 1681-1685). SAGE Publications.
- [16] Naujoks, F., Mai, C., & Neukum, A. (2014). The Effect of Urgency of Take-Over Requests During Highly Automated Driving Under Distraction Conditions. *Advances in Human Aspects of Transportation: Part I*, 7, 431.

IT-Security-Architektur für Next-Generation Kommunikationssysteme im Automobil

M. Sc. **L. Dörr**, B. Eng. **M. Heigl**, Prof. Dr.-Ing. **A. Grzempa**,
Technische Hochschule Deggendorf, Deggendorf;
Dipl.-Ing. (FH) **C. Boiger**, b-plus GmbH, Deggendorf

Kurzfassung

Autonomes Fahren, die zunehmende Vernetzung der Fahrzeuge untereinander und die Anbindung an cloudbasierte Dienste zählen zu den größten Themen, die die Automobilindustrie derzeit und in Zukunft beschäftigt. Gleichzeitig unterliegt die Bordnetz-Architektur einem Wandel hin zum Einsatz von Automotive Ethernet in Verbindung mit Time-Sensitive Networking (TSN). Allerdings machen Ethernet-basierte Netzwerke in Fahrzeugen diese zunehmend anfälliger für Angriffe aus der IT-Welt. Die elektronischen Bordnetze werden schon heute durch interne und externe Angriffe bedroht. In diesem Paper wird eine IT-Security-Architektur für die kommenden Fahrzeugarchitekturen vorgestellt, welche die besonderen Anforderungen an Echtzeit und Safety im Automobil berücksichtigt. Zur Sicherstellung von definierten Schutzziele in autonomen Fahrzeugen werden Steuergeräte mit einem Trusted Platform Module (TPM) ausgestattet. Dieses bietet erweiterte Funktionalitäten eines Hardware Security Modules (HSM) und ermöglicht den Einsatz von Trusted Computing Ansätzen, z.B. die gegenseitige Überprüfung des Systemzustands der Netzwerkteilnehmer. In Steuergeräten kommen zudem verteilte Intrusion Detection Systeme zum Einsatz, die ein- und ausgehende Verbindungen überprüfen und im Fall von Anomalien im Netzwerkverkehr eine Alarmmeldung abgeben bzw. eine übergeordnete Instanz informieren. Durch ein abgewandeltes HMAC-Verfahren können zusätzlich stichprobenartig TSN basierende Netzwerke auf Nachrichtenintegrität und -authentizität überprüft werden ohne zeitkritische Prozesse zu gefährden.

1. Einleitung

Moderne automobile Kommunikationssysteme, ausgestattet mit bis zu über 70 interagierenden eingebetteten Steuergeräten, erhöhen ihren Grad an Komplexität und Vernetzung stetig. Dieser Trend wird begünstigt durch zukünftige Automotive Anwendungen basierend auf Fahrzeug-zu-Fahrzeug sowie Fahrzeug-zu-Umgebung Kommunikationen, die Aktualisierung von Softwareständen durch Over-the-Air (OTA) Dienste mit Cloud-Anbindung, fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme, selbstfahrende Fahrzeuge oder die Einführung von

technischen Neuerungen wie beispielsweise Ethernet als Standardkommunikationssystem mit Erweiterungen für jeden Anwendungsfall. So befindet sich derzeit auch Time-Sensitive Networking in der Standardisierung. TSN ermöglicht eine zuverlässige und deterministische Kommunikation mit geringer Latenz einhergehend mit bandbreitenintensiven Datenaustausch durch ADAS Sensoren beispielsweise und Audio/Video Übertragungen. Aktuell steht vor allem die funktionale Sicherheit (Safety) im Vordergrund. Entwicklungen wie beispielsweise redundante Kommunikationskanäle, die Verhinderung von systematischen Fehlern in der Entwicklung, oder die sichere Beherrschung von erkannten Fehlern und der Übergang in einen zuvor definierten sicheren Zustand zählen zur funktionalen Sicherheit und finden bereits seit langem Verwendung im Automobilbau. Durch die steigende Vernetzung spielt jedoch der Schutz gegen ungewollte Fahrzeugmanipulationen eine immer größere Rolle. So hat sich in der Vergangenheit bereits die Verwundbarkeit von vernetzten Fahrzeugen gezeigt [1]. Daher wird IT-Security in Zukunft im Fahrzeug eine stark steigende Bedeutung haben. In diesem Paper wird eine IT-Security-Architektur vorgestellt, welche ein Fahrzeugnetz absichern kann und die Basis für zukünftig vernetzte Kommunikation schafft.

2. Problemstellungen

Security war in früheren Fahrzeugen de facto automatisch durch sogenanntes Air-Gap oder Closed-World gewährleistet. Verbindungen wurden nur innerhalb des Fahrzeugs zugelassen. Anbindungen an die Außenwelt waren technisch gar nicht erst möglich oder vom Markt nicht gefordert. Aktuelle Technologien jedoch ermöglichen Remote Zugriff zur Diagnose oder für Update-Funktionen über das Internet sowie Anbindungen an die unmittelbare Umgebung (z.B. Fahrzeug, Infrastruktur). Dadurch steigt das Spektrum an Angriffsvektoren signifikant an.

Die wichtigsten Schutzziele der klassischen Office-IT sind Authentizität, Vertraulichkeit und Integrität. Kommunizieren zwei Netzwerkteilnehmer sind diese im Normalfall gewährleistet. In gewissen Bereichen sind die Schutzziele im Automotive Umfeld kongruent zu denen in der Office-IT, z. B. für die Kommunikation zwischen zwei Fahrzeugen. Doch in manchen Domänen ist die Priorität auf Verfügbarkeit, Echtzeit und funktionaler Sicherheit gerichtet, wie es beispielsweise für die Fahrzeugdynamik wichtig ist. Auch der Schutz der Privatsphäre wird in Zukunft bei vernetzten Fahrzeugen eine wichtige Rolle spielen. Diese Rahmenbedingungen erschweren den Einsatz klassischer IT-Security.

Des Weiteren besteht die Kommunikation in heutigen Fahrzeugen aus verschiedenen Bussystemen, wie beispielsweise CAN, LIN, MOST oder FlexRay sowie Ethernet, welches in bestimmten Domänen wie der Bilderkennung bereits seinen Einzug findet. Automotive

Ethernet wird durch steigenden Bandbreitenbedarf und die Standardisierung von Echtzeit-Ethernet zukünftig breitflächiger seinen Einzug ins Fahrzeug finden. Es ermöglicht einen hohen Datendurchsatz, eine verlässliche und robuste Kommunikation, hohe Bandbreite, transparente Einordnung in das ISO-OSI-Modell, hohe Flexibilität bei gewählter Topologie und bereits vorhandene adaptierbare Tools aus dem IT- und Industrie-Ethernet-Segment. Mit dem 100BASE-T1 Physical -Layer für Ethernet ist es möglich die Daten im Fahrzeug auf einer ungeschirmten, verdrehten Zweidrahtleitung zu übertragen. Für die Automobilindustrie sind jedoch auch die Punkte Echtzeitfähigkeit, garantierte Paketübertragung, feste Latenz- und Jitterzeiten, Fehlertoleranz und die Ausfallsicherheit eines Systems relevant, was durch Erweiterungen in aktuellen Standards definiert wird. Mit Ethernet und IP-basierenden Protokollen im Fahrzeug geht ein zunehmender Anstieg an Angriffsmöglichkeiten bekannt aus der Office-IT Umgebung einher. Der Einsatz von Ethernet ermöglicht zwar den Einsatz bewährter Sicherheitsmechanismen, birgt jedoch auch Nachteile. So sind viele Angriffsvektoren aus der Office-IT kongruent und auch das Wissen sowie die Tools zur Penetration solcher Netzwerke sind weit verbreitet und leicht zugänglich. Die IT-Security unterliegt einem ständigen Wandel in denen sich neuartige Angriffsvektoren trotz ausgeklügelter Sicherheitsmechanismen auf die Dauer durch Updates oder Verbesserungen kompensiert werden müssen. Ein Fahrzeug hat einen Lebenszyklus von bis zu 20 Jahren und mehr. Nicht nur Safety-Funktionen müssen diesen Laufzeiten standhalten, sondern auch die aktuell hinzukommenden Security-Funktionen. Somit müssen kryptographische Algorithmen austauschbar oder aktualisierbar sein, wenn z. B. Schlüssellängen erhöht werden müssen. Eine nachträgliche Anwendung von Verschlüsselungstechniken auf vorhandene Bussysteme resultiert in einer zeitlichen Verzögerung, welche sich kritisch auf die Funktionalität auswirken kann.

3. Einteilung in Sicherheitszonen

Um ein System sinnvoll Absichern zu können, ist es hilfreich verschiedene Perspektiven auf das System anzuwenden. Jede Perspektive hat dabei individuelle Schwerpunkte und Ziele für die IT-Sicherheit.

Eine Perspektive der Security betrachtet die Steuergeräte als ein separat zu schützendes Medium, auf welchem Sicherheitsmechanismen umgesetzt werden können. Derartige Mechanismen umfassen den Schutz von Hard- und Software des jeweiligen Gerätes, wozu Technologien, wie beispielsweise Secure Boot, Datenverschlüsselung oder die Versiegelung von Daten gebunden an den Zustand des Geräts.

Eine andere Sicht betrachtet das Fahrzeug als Verbund von kommunizierenden Steuergeräten als Netzwerkinfrastruktur, in welcher verschiedene Bussysteme verfügbar sind. Dies umfasst vor allem den Schutz der Integrität und Authentizität von übertragenen Daten. Dabei können kryptographische Algorithmen zum Einsatz kommen, welche u.a. vor Manipulation schützen.

Zukünftig wird eine weitere Perspektive eine größere Rolle spielen: Das gesamte Fahrzeug als Teil eines größeren Netzwerks von mehreren Fahrzeugen oder Umgebungsdiensten. In diesem Fall muss betrachtet werden, wie Fahrzeuge und Umgebungsdienste sicher miteinander kommunizieren können. Außerdem muss bei dieser Perspektive berücksichtigt werden, wie die Teilnehmer dieses Netzwerks sich gegeneinander authentifizieren um eine Vertrauensbasis in der Kommunikation zu schaffen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist bei der Betrachtung von Car-to-X Kommunikation, wie die Privacy sichergestellt werden kann.

Die Härtung des Kommunikationssystems im Fahrzeug ist Thema dieser Arbeit, wobei diese keine Einschränkung für die anderen Perspektiven darstellt und dahingehend erweitert werden kann. So schaffen die hier vorgestellten Mechanismen unter anderem eine Vertrauensbasis auf der auch für Car-to-X Kommunikation aufgesetzt werden kann.

4. IT-Sicherheitskonzept

Im Folgenden soll ein mögliches Sicherheitskonzept zur Absicherung von Fahrzeugnetzen vorgestellt werden. Die hier Architektur verfolgt hierbei einen gesamtheitlichen Sicherheitsansatz nach „Defense in Depth“. Das heißt, Schutzmaßnahmen müssen auf unterschiedlichen Ebenen präsent sein, sodass die Kompromittierung einer Schutzmaßnahme noch keine Gefahr für das Gesamtfahrzeug darstellt, da noch weitere Mechanismen aktiv sind. In Abbildung 1 ist die Gesamtarchitektur zu sehen. Zum Einsatz kommen sichere Vertrauensanker auf Basis von TPMs zur sicheren Identifikation der Netzwerkteilnehmer. Trusted Network Connect wird zum sicheren Aufstarten des Netzwerks verwendet. Unerlaubtes Mitlesen oder Einbringen von Nachrichten wird durch den Einsatz einer Peer Delay Messung unterbunden. Im Fahrzeug wird MACSec oder das folgend beschriebene HMAC Verfahren zur Kommunikationsabsicherung verwendet. Des Weiteren wird ein verteiltes IDS-System eingesetzt um Angriffe oder Netzwerkfehler möglichst schnell und effizient erkennen zu können. In der Abbildung ist weiterhin eine mögliche Erweiterung der Architektur durch die Anbindung des Fahrzeugs an ein OEM Backend. Diese Anbindung genauso wie die Erstellung und Verteilung der nötigen Zertifikate werden in diesem Paper nicht näher beschrieben.

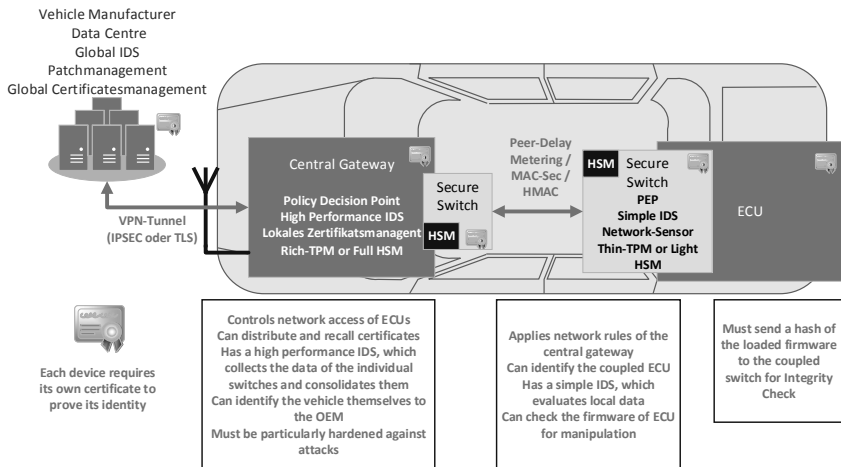


Bild 1: Automotive Security Architektur

4.1. Zeitsynchronisation

Eine gemeinsame Zeitbasis ist für kommunizierende Geräte ein Schlüsselfaktor. Zeitstempelung kann nicht nur für Safety-Features, sondern auch für Security-Mechanismen genutzt werden. So ist diese beispielsweise wichtig für die Aktualität (Freshness) von Nachrichten. Dies verhindert das Wiedereinspielen von Datenpaketen und kann zur Erkennung von verzögerten Datenpaketen genutzt werden. Ein weit verbreitetes Zeitsynchronisationsprotokoll ist PTP. Security wurde dort erst in der zweiten Version des Standards in der Erweiterung Annex K eingeführt. Dennoch wurde dies bis dato nicht als gut definiertes Sicherheitsprotokoll formalisiert. Schwachstellen von PTP wurden unter [2] aufgezeigt. Eine Absicherung von IEEE 1588 Nachrichten durch Message Authentication Codes basierend auf dem KECCAK Algorithmus für Smart Grid Systeme in Next-Generation Stromkraftwerken wurde in [3] veröffentlicht. Mit einer derartigen Implementation ist eine Absicherung von Synchronisationsnachrichten im Nanosekunden-Bereich möglich, was für Echtzeitkommunikation unabdingbar ist.

4.2. Steuergeräteschutz

Die Basis eines sicheren und vertrauenswürdigen Fahrzeugnetzes ist ein vertrauenswürdiger Start aller Komponenten. Dieser kann durch sogenannte Secure Boot Mechanismen erreicht werden. Hierzu werden Integritätsmessungen beim Aufstart der Steuergeräte gemacht und

mit einer vertrauenswürdigen Referenzmessung verglichen. Nur wenn die Verifikation erfolgreich war darf anschließend das Gerät am Netzwerk teilnehmen. Die Verifikation kann beispielsweise über das TNC-Konzept, welches im Anschluss näher betrachtet wird, umgesetzt werden. Für die Umsetzung von Secure Boot Mechanismen ist ein Vertrauensanker sowie Speicherplätze und Verarbeitungseinheiten von Schlüsselmaterial essentiell. Die Funktionalität hierfür kann ein Hardware-Security-Module (HSM) erreichen.

Im Projekt EVITA [4] wurde der Funktionsumfang, den ein HSM im Automotive Umfeld haben sollte, definiert. Da nicht alle Kryptofunktionen eines HSMs an jedem Gerät benötigt werden, sind drei verschiedene Profile spezifiziert worden, Full HSM, Medium HSM und Light HSM. Das „Full HSM“ bildet dabei die volle Ausbaustufe. Für Secure Boot ist allerdings ein „Light HSM“ ausreichend.

In der klassischen Office-IT ist seit langem das „Trusted Platform Module“ (TPM) Standard. Ein TPM in der aktuellen Version 2.0 hat in etwa den gleichen Funktionsumfang wie ein „Full HSM“ nach EVITA. Es wurde von der Trusted Computing Group (TCG) spezifiziert. Die TCG beschäftigt sich seit langem mit der Absicherung von vernetzten Komponenten in der Office-IT. Aufbauend auf dem TPM wurden weitere Sicherheitsmechanismen spezifiziert, die im nächsten Abschnitt näher betrachtet werden. Da das TPM meist ein dedizierter Chip ist und im Vergleich zu anderen HSM relativ teuer in der Herstellung, findet es bisher nur selten Anwendung im Automotive Umfeld.

Aus diesem Grund hat die TCG eine Automotive TPM Architektur spezifiziert. Diese besteht aus einem Rich-Profile und einem Thin-Profile. Das Rich-Profile nutzt ein normales TPM. Das Thin-Profile hat einen eingeschränkten Funktionsumfang und wurde für Geräte mit eingeschränkten System Ressourcen vorgesehen. Dies soll die Kosten für den Einsatz einer TPM gestützten Absicherung im Automobil senken. Gleichzeitig können nach TCG Standards Secure-Boot und andere Schutzmechanismen implementiert werden.

Thin-Geräte authentifizieren sich nur gegenüber Rich-Geräten. Rich-Geräte können die Authentizität von Thin-Geräten anderen Geräten gegenüber attestieren. Damit ist theoretisch nur ein Rich-Gerät nötig für eine Authentifizierung der Teilnehmer sowohl im Auto als auch gegenüber einem zentralen Server eines Herstellers. Ein schematischer Aufbau einer solchen Architektur ist in Abbildung 3 zu sehen. Dabei wird hier nur an den auf den Steuergeräten integrierten Switchen das TPM integriert. Dies ist ausreichend, solange der Switch fest mit dem Steuergerät verbunden ist. Ein Vorteil dabei ist, dass nur ein TPM pro Switch und Steuergerät nötig ist. Das Steuergerät sendet hierfür seine Integritätswerte an den Switch und dieser kann mithilfe des TPMs anschließend den integren Start des Steuergeräts verifizieren.

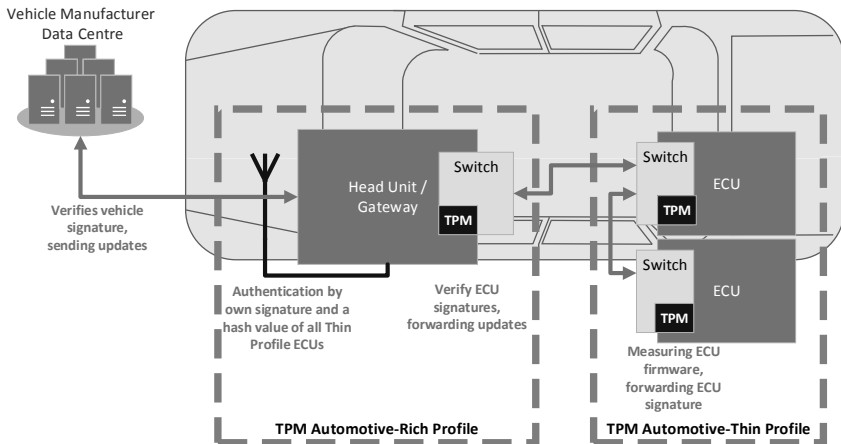


Bild 2: Authentifizieren eines Steuergerätes mit TPM-Automotive Rich- & Thin-Profiles

Ein Nachteil heutiger HSMS, der sowohl HSMS nach EVITA als auch das TPM betrifft, ist, dass dedizierte Kryptobeschleuniger eingebaut werden. Diese können nur bestimmte Algorithmen mit bestimmten Schlüssellängen einsetzen. Durch die lange Lebenszeit eines Automobils entsteht ein großes Risiko, dass die verwendeten Algorithmen unsicher werden oder die verwendeten Schlüssellängen nicht mehr ausreichend lang sind. Diese Probleme können mit allgemeinen Krypto-Arithmetik-Cores umgangen werden. Diese Cores stellen lediglich Funktionen zur Verfügung, welche häufig für Kryptoalgorithmen verwendet werden. Dies ermöglicht es auch neue Algorithmen nachträglich zu implementieren und auch variable Schlüssellängen zu implementieren.

4.3. Sicheres Starten des Kommunikationsnetzwerks

Um ein sicheres Starten des Fahrzeugnetzwerks zu realisieren kann Trusted Network Connect (TNC) eingesetzt werden. TNC wurde von der TCG entwickelt um eine sichere Netzwerkanmeldung einzelner Geräte zu ermöglichen. TNC basiert auf dem IEEE Standard 802.1X [5]. In IEEE 802.1X melden sich neue Teilnehmer eines Netzwerks beim nächsten Switch des Netzwerks. Der Switch bildet dabei einen Policy Enforcement Point. Die Bridge fragt bei einer Entscheidungsinstanz dem Policy Decision Point an, ob dieses Gerät am Netzwerk teilnehmen darf. Abhängig von der Rückmeldung der Entscheidungsinstanz wird

das Gerät blockiert oder im Netzwerk zugelassen. Bei Zulassung kann das Gerät auch in ein passendes VLAN geschoben werden. VLANs [6] können zur logischen Netzwerksegmentierung verwendet werden. So eignen sich diese auch um Domänengrenzen innerhalb eines Fahrzeugnetzes zu realisieren. TNC erweitert das Konzept von 802.1X indem es für die Authentifizierung die Integrität des Geräts überprüft. Dies geschieht über Secure-Boot und ein TPM, welches den Bootprozess überwacht. Außerdem kann in Abhängigkeit von den Integritätswerten das sich anmeldende Gerät in verschiedene VLANs verschoben werden. So kann auch bei Vertrauensverlust das Fahrzeug funktionstüchtig gehalten werden. Die Überprüfung der Endgeräte kann auch zyklisch wiederholt werden, um auch im laufenden Betrieb die Integrität aller Netzwerkteilnehmer sicher zu stellen. Eine mögliche Umsetzung von TNC im Fahrzeug ist in Abbildung 4 zu sehen. Auch hier ist wieder der Switch fest mit dem Steuergerät verbunden, sodass nur ein TPM pro Steuergerät nötig ist. Hierdurch kann, auch wenn das Steuergerät selbst kompromittiert ist, das Netzwerk trotzdem starten, da der Switch das Steuergerät vom Netzwerk isolieren kann.

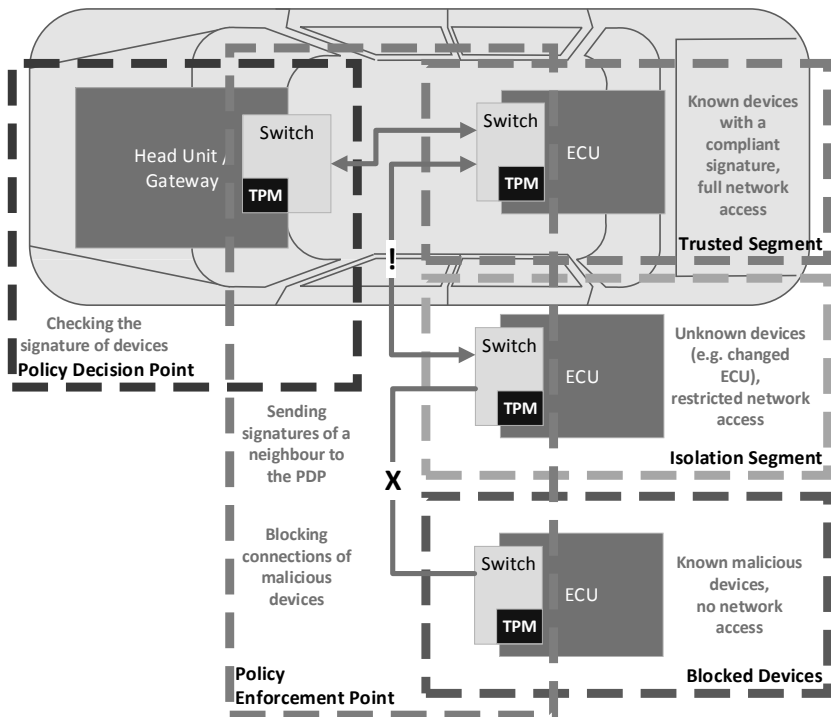


Bild 3: Trusted Network Connect im Fahrzeug

4.4. Intra-und Inter-Domänen-Kommunikation

In diesem Abschnitt werden verschiedene Technologien vorgestellt, welche die Datenintegrität und bei Bedarf die Datenvertraulichkeit bei der Übertragung über verschiedene Bussysteme sicherstellt. Außerdem helfen die vorgestellten Technologien Angreifer zu erkennen und dies bei Bedarf einer Überwachungsinstanz mitzuteilen.

4.4.1. Zeitsynchronisation zur Absicherung des Netzwerkes

Die Zeitsynchronisation über Ethernet-Netzwerke nach IEEE 1588 basiert zum einen auf dem Austausch von Ethernet Nachrichten, welcher abgesichert werden muss, kann jedoch auch zur Erkennung von Eingriffen in das Netzwerk verwendet werden. Dies setzt jedoch voraus, dass die Integrität und Authentizität der Nachrichten sichergestellt ist.

Ein Mechanismus welcher bei der Zeitsynchronisation (z.B. nach IEEE 802.1AS [7]) zum Einsatz kommt, ist die sogenannte Peer Delay Messung. Mittels dieser Messung wird die

Leitungsverzögerung zw. zwei Linkpartnern bestimmt (d.h. indirekt die Leitungslänge). Diese ist im Automobil durch die beschränkte Ausdehnung des Netzwerkes sehr klein (< 100 ns) und bekannt (Lichtgeschwindigkeit im Medium). Die Verzögerung durch die im Automobil verwendeten Ethernet PHYs (100BASE-T1 und 1000BASE-T1) ist im Gegensatz dazu relativ hoch ($>> 100$ ns).

Will sich ein Angreifer, der physischen Zugriff auf das Automobil Netzwerk hat, in die Leitung einschalten, z.B. über einen Layer 1 Netzwerktap, kann dies von beiden Linkpartnern detektiert werden, da sich die gemessene Laufzeitverzögerung signifikant erhöht. Auch durch eine eventuell mögliche Verkürzung der Leitung, kann diese zusätzliche Laufzeitverzögerung nicht ausgeglichen werden. Neben klassischen Layer 1 Netzwerktaps, die zum Abhören der Übertragung verwendet werden können, können auch aktive Geräte, die eventuell zum Einspeisen von Nachrichten verwendet werden können (man-in-the-middle attack), detektiert werden.

Die Peer Delay Messung selbst setzt keine zeitliche Synchronisation der Linkpartner voraus, kann also ohne (bzw. muss) vor der eigentlichen zeitlichen Synchronisation der Endgeräte erfolgen.

4.4.2. MACSec

In der klassischen Office-IT wird zur Absicherung einer Datenübertragung vor allem auf die Verschlüsselungstechnologien IPSec und TLS gesetzt. Diese können auch im Fahrzeug beim Einsatz von Ethernet als Übertragungsmedium eingesetzt werden. Allerdings haben beide Technologien den Nachteil, dass alle Nachrichten auf Layer 2 des ISO/OSI Modells nicht abgesichert werden. Hierzu zählen auch das Netzwerkmanagement oder die Zeitsynchronisation. Daher bietet sich zur Absicherung von Layer 2 Protokollen das im IEEE Standard 802.1AE [8] spezifizierte Protokoll MACsec an. Dieses Protokoll kann zum Schutz der Integrität in einem Netzwerk verwendet werden. Weiter stehen optional Verschlüsselungsmechanismen für alle Protokolle ab Layer 2 im ISO/OSI-Modell zur Verfügung. MACsec arbeitet Hop-by-Hop. Das bedeutet, bei jeder Zwischenstation, die MACsec unterstützt, wird das Datenpaket entschlüsselt und auf seine Integrität geprüft. Die Kommunikationskanäle zwischen zwei Endkanälen werden durch „Secure Channels“ voneinander getrennt und nutzen jeweils einen eigenen Schlüssel. Nur authentifizierte Geräte können an einer durch MACsec gesicherten Kommunikation teilnehmen. Die IEEE sieht hierfür den bereits oben vorgestellten IEEE 802.1X Standard vor. Ein Vorteil von MACsec besteht darin, dass es nicht möglich ist, Daten zu manipulieren ohne dass dies von einer Zwischenstation oder dem Empfänger erkannt wird. Wenn zusätzlich die optionale

Verschlüsselung aktiviert ist, kann ein Angreifer die Kommunikation nicht mehr belauschen. Dadurch ist die Vertraulichkeit der Daten sichergestellt. Ein weiterer Vorteil ist die im Vergleich zu den Verschlüsselungsverfahren auf höheren Netzwerkschichten geringere Latenz, welche MACsec auch für Echtzeitprotokolle interessant macht. Ein großer Nachteil beim Einsatz von MACsec ist die geringe Verbreitung. Es gibt nur wenige Geräte am Markt, welche das Protokoll unterstützen. Vor allem im Automotive Bereich ist es bisher wenig verbreitet. Ein weiterer Nachteil ist, dass nur Ethernet Kommunikation abgesichert werden kann.

4.4.3. HMAC

Verschlüsselung wird vor allem zum Austausch von vertraulichen Daten eingesetzt. Probleme können vor allem bei zeitkritischer Kommunikation auftreten, da die Ver- und Entschlüsselung den Datenverkehr zeitlich verzögert. Bei einem fehlerhaften Ausführen des Algorithmus ist zudem die funktionale Sicherheit gefährdet, wenn safety-relevante Nachrichten nicht richtig ver- oder entschlüsselt werden. Das Erkennen von Anomalien oder Angriffen auf die Netzwerkkommunikation ist daher am wichtigsten und in den meisten Fällen ausreichend. Mögliche Mechanismen zur Sicherstellung der Integrität und Authentizität von Nachrichten, sowie der Erkennung von Angriffen durch ein sogenanntes Angriffserkennungssystem (engl. Intrusion Detection System, IDS) zeigt Abbildung 5.

Eine Absicherung der Kommunikation durch Anwendung eines gewöhnlichen HMAC Algorithmus birgt einige Nachteile. Bei diesem werden die originalen Nachrichten mit einem Schlüssel gehasht und dieser Hash den Nachrichten on-the-fly hinzugefügt. Diverse Angriffsszenarien wie beispielsweise eine Wiedereinspielung von Nachrichten (Replay), die Verzögerung von Nachrichten (Delay) oder gar die Unterdrückung von Nachrichten (Drop), können dadurch nicht verhindert werden. Zudem muss die verwendete kryptographische Soft- oder Hardware schnell genug und ständig verfügbar sei. Für kleine Nachrichtengrößen wird zudem ein großer Overhead an zusätzlicher Information hinzugefügt, wodurch die Buslast signifikant steigt.

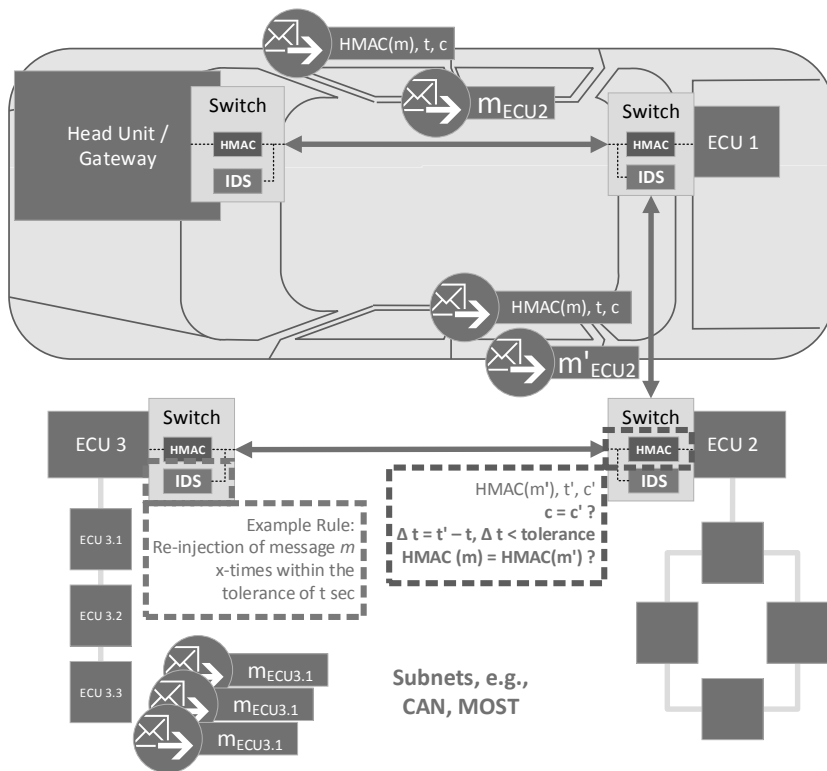


Bild 4: Mechanismen zur Kommunikationsabsicherung im Fahrzeug

In [9] wird ein MAC Verfahren vorgestellt, welches die genannten Probleme kompensiert und aktuelle Bussysteme können bestehen bleiben wobei die Sicherheit kostengünstig hinzugefügt wird. Um die Freshness von Nachrichten zu gewährleisten, müssen sich die Steuergeräte synchronisieren und ein Zeitstempel wird bei jedem Aussenden und Empfangen von Nachrichten generiert. Dieser wird dann für die Berechnung und Verifikation des MACs mit einer gewissen Zeitfenstertoleranz mit einbezogen. Eine CRC Summe angehängt an die gesamte Nachricht mit originalen Daten und MAC wird gebildet, um Bitübertragungsfehler zu erkennen. Das Verfahren nutzt einen Pre-Shared Key zur Erzeugung des MACs. Nachteilig an diesem Verfahren ist neben Verwendung des immer gleichen Schlüssels, dass Nachrichten unter Umständen durch die MAC Generierung inkl.

des Zeitstempels verzögert werden können. Auch der Overhead erhöht sich wodurch sich die Buslast signifikant erhöht. Beim CAN-Bus beispielsweise beträgt die maximale Größe einer Nachricht 8 Bytes. Ein MAC berechnet mit Hilfe des SHA-256 Hashalgorithmus erzeugt 32 Bytes. Bei einer durchschnittlichen CAN-Bus Auslastung von ca. 50 % übersteigt das Anhängen von MACs die zulässige Buslast, wodurch Nachrichten niedrigerer Priorität auf dem Bus bei der Arbitrierung ausselektiert werden.

Ein weiteres Beispiel, welches Security für bereits vorhandene Bussysteme verspricht, aber auch unter großem Overhead leidet ist das Common Transport Protocol (CTP), welches im Projekt EVITA [4] entwickelt wurde. Dieses Protokoll kann auf CAN, Flexray und Ethernet TCP/IP eingesetzt werden. Allerdings erhöht es vor allem auf CAN stark die Buslast. So werden die maximalen Nutzdaten auf 6 Bytes reduziert und eine MAC und ein Timestamp an eine Nachricht angehängt. Damit müssen wie im vorherbeschriebenen Verfahren ebenfalls die Nachrichten über mehrere Frames übertragen werden

Ein Verfahren, welches die genannten Nachteile kompensiert, könnte ein von den originalen Nachrichten entkoppelter angewendeter HMAC Algorithmus bieten. Die berechneten Hash-Werte könnten zur Verifikation an den kommunizierenden Partner über ein Ethernet-Netzwerk übermittelt werden. Ein Schlüsselaustausch basierend auf Zertifikaten wäre ebenfalls über diesen Kommunikationskanal möglich. Kommunizierende Switching-Elemente verhandeln ein gemeinsames Geheimnis (Shared Secret), basierend auf einem mit Zertifikaten angewendeten signaturbasierten Diffie-Hellman Schlüsselaustausch [10]. Das Geheimnis wird dann zur Erzeugung und Verifizierung von HMACs genutzt. Nachrichten werden von den Switching-Elementen transparent weitergeleitet und nebenbei eine Kopie der Nachricht zur Erzeugung eines von der Originalnachricht entkoppelten HMACs abgefangen. Bei diesem Vorgang wird ein Zeitstempel angelegt und ein Sequenzzähler erhöht. Die resultierenden Werte werden als Paket an das korrespondierende Switching-Element versendet. Dieses hat bereits die gleichen Schritte mit dem Originalpaket durchgeführt und kann sodann mit dem eintreffenden HMAC behafteten Paket die HMACs, die Sequenzzähler und die Zeitstempel auf Gleichheit oder Einhaltung bestimmter Toleranzen überprüfen. Mittels Zeitstempelung, Anwendung von Sequenzzählern und eventuellen Feedback-Nachrichten, kann auch die für viele Applikationen nötige Safety garantiert werden. Bezugnehmend auf das Beispiel in Abbildung 5 erzeugt der Switch der Head Unit / des Gateways einen HMAC zur Nachricht an ECU 2, einen Zeitstempel t und erhöht seinen Sequenzzähler c . Der Switch des ECU 2 empfängt die originale Nachricht und erzeugt einen HMAC, einen Zeitstempel t' und erhöht ebenfalls seinen Sequenzzähler c' . Nach Eintreffen der Werte vom Head Unit / Gateway Switch, werden diese mit den Werten

des ECU 2 Switches verifiziert. Dabei werden die Hashwerte und die Sequenzzähler verglichen und eine Delta-Zeit auf Einhaltung einer vordefinierten Toleranz überprüft. Um die Netzwerklast nicht unnötig zu erhöhen, können zwei kommunizierende Switching-Elemente einen zufallsbasierten Zeitpunkt und eine zufällige Anzahl an zu generierenden HMACs aushandeln. Zudem könnten auch mehrere aufeinanderfolgende Pakete zusammen dem HMAC Algorithmus unterzogen und beim Kommunikationspartner verifiziert werden. Zur Absicherung der Kommunikation von bereits vorhandenen Bussystemen, wie beispielsweise CAN ist der Algorithmus aufgrund zu geringen zur Verfügung stehenden Bandbreite nicht geeignet. Nachträgliches Hinzufügen von Security in solche Systeme kann durch ein Angriffserkennungssystem in den Switching-Elementen gewährleistet werden.

4.4.3 Angriffs-/Anomalie-Erkennungssystem

Frühere Fahrzeugsysteme waren von der Außenwelt (anderen Netzwerken) isoliert, wodurch sich auch die informationstechnische Sicherheit ergab. Durch externe Schnittstellen und Verbindungen zu anderen Netzwerken und Infrastrukturen resultiert ein breites Spektrum an Angriffsvektoren für zukünftige Systeme. Wie bereits in Abbildung 5 gezeigt sollen die Switching-Elemente über ein Intrusion Detection System verfügen. Innerhalb von Domänen können Steuergeräte gleichartiger Bussysteme an einem Switching-Element angeschlossen sein oder verteilt im Fahrzeug über diese Switching-Elemente kommunizieren. Innerhalb einer Domäne werden Anomalien durch angewendete Intrusion Detection Systeme auf den Switching-Elementen erkannt. Diese überwachen den gesamten Netzwerkverkehr innerhalb eines Switching-Elements und erlauben die Detektion von Anomalien bei Nichteinhaltung vordefinierter Regeln. Solche können je nach Applikation des IDS verschiedene Regelsets beinhalten. Steuert ein Switching-Element externe Verbindungen (z. B. Internet), ist es sinnvoll eine Härtung des IDS auf Angriffe vorzunehmen, welche aus der Office-IT Welt bekannt sind. Ein weiteres Regelset könnte die Absicherung eines Subnetzes definieren. Die Nachrichten eines Bussystems sind statisch definiert, wodurch sich solche Regeln für Anomalien ebenfalls im Vorhinein leicht bestimmen lassen. Eine Anomalie kann z. B. das wiederholte, unzulässige Einspielen von Nachrichten sein, eine Modifikation einer Nachricht der Art, dass a priori definierte Werte überschritten werden, oder zu erwartende Nachrichten (periodische Informationen) nicht eintreffen. Bezugnehmend auf das Beispiel in Abbildung 5 wird ein Alarm des IDS generiert, da die entsprechende Regel auf dreimaliges Wiedereinspielen derselben Nachricht innerhalb eines bestimmten Zeitfensters anspricht. Einen direkten Schutz der Integrität und Authentizität von derartigen Nachrichten, wie

beispielsweise mit der entkoppelten HMAC Lösung, ist bei den vorhandenen Technologien z. B. CAN technisch schwer umsetzbar oder führt vor allem zu erhöhten Mehrkosten.

Anomalien umfassen nicht nur Alarme der Intrusion Detection Systeme, sondern auch Anomalien des entkoppelten HMAC Algorithmus oder sonstige Fehler, welche auf den ECUs detektiert werden. Derartige Events können auf den Steuergeräten in Log-Dateien abgespeichert, vorverarbeitet und zur weiteren Analyse zentral an eine Verarbeitungseinheit versendet werden. Die verteilten ECUs tragen somit zu einer dezentralen, Anomalie-basierten Erkennung verteilter Angriffe bei. Im Abschnitt 5 werden Möglichkeiten zur finalen Aufbereitung der genannten Vorfälle beschrieben.

5. Darstellung des Fahrzeugzustands

Abhängig von der Art der Anomalie oder des Fehlers, muss der Hersteller bzw. der Fahrer/Fahrzeughalter über den aktuellen Fahrzeugzustand informiert werden. Aufgrund der möglichen Vielzahl an Logeinträgen oder Alarmen des IDS bei z. B. unbeabsichtigten Fehlern ist es möglich ein Log-, Monitoring- und Reporting-Tool wie beispielsweise Splunk und/oder ein Sicherheitsinformations- und Ereignis-Management Programm (Security Information and Event Management, SIEM) zu verwenden, welches die gesammelten Ereignis-, Bedrohungs- und Risikodaten zusammenfasst, analysiert und mit fundierten Sicherheitsinformationen eine geeignete Darstellung für den jeweiligen Endnutzer liefert. Ein Fahrer kann beispielsweise über ein simples Ampelsystem darüber informiert werden, wie sicher eine Weiterfahrt ist. Dem Hersteller oder Fachkräften kann neben einem normalen Systemfehler auch ein komplexer Angriff mitgeteilt werden.

6. Zusammenfassung und Fazit

Die hier vorgestellte Security Architektur schafft eine Vertrauensbasis innerhalb eines Fahrzeugnetzes. Mit diesem Vertrauen kann das Fahrzeug sich auch nach außen ausweisen. Sei es für die Kommunikation mit einem Backend des Herstellers oder für die künftige Generation von autonomen Fahrzeugen, die mit der Umwelt kommunizieren müssen. Die vorgestellten Mechanismen können auch gegen ähnliche, gleichwertige Mechanismen ausgetauscht werden. Dies schafft eine große Flexibilität des Gesamtkonzepts. Das hier vorgestellte Konzept zeigt weiterhin, dass ein gesamtheitlicher Security Ansatz im Fahrzeug eine große Komplexität erreichen wird. Aufgrund dieser spielt daher für zukünftige Fahrzeuge Security by Design eine besonders wichtige Rolle. Dies ist wichtig, damit in Zukunft keine Probleme zwischen Security, Echtzeit und Safety entstehen.

Die hier vorgestellten Verfahren wurden nach diesen Anforderungen ausgewählt oder entwickelt.

7. Literatur

- [1] Miller, C., Valasek, C., Remote Exploitation of an Unaltered Passenger Vehicle, Black Hat USA, 2015
- [2] Gaderer, G., Treytl, A., Sauter, T., "Security aspects for IEEE 1588 based clock synchronization protocols," IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, 2006
- [3] Moreira, N., Astarloa, A., Kretzschmar, U., Lazaro, J. Molina, E., Securing IEEE 1588 Messages with Message Authentication Codes based on the KECCAK Cryptographic Algorithm Implemented in FPGAs, IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2014
- [4] <http://evita-project.org>
- [5] IEEE Std 802.1X-2010. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Port-Based Network Access Control. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010
- [6] IEEE Std 802.1Q-2014. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Bridges and Bridged Networks. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014
- [7] IEEE Std 802.1AS-2011. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011
- [8] IEEE Std 802.1AE-2006. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Media Access Control (MAC). New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006
- [9] Zalman, R., Mayer, A., A Secure but still Safe and Low Cost Automotive Communication Technique, 51st ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC), 2014
- [10] Heigl, M., Aman, M., Fuchs, A., Grzempa, A., Securing Industrial Legacy System Communication Through Interconnected Embedded Plug-In Devices, Applied Research Conference, 2016

Wie will der „Fahrer“ automatisiert gefahren werden?

Überprüfung verschiedener Fahrstile hinsichtlich des Komforterlebens

M.Sc. **S. Scherer**, Dipl.-Wirtsch.-Ing. **D. Schubert**,
Dipl.-Ing. **A. Dettmann**, Dipl.-Psych. **F. Hartwich**,
Prof. Dr. **A. C. Bullinger**, TU Chemnitz

Kurzfassung

Hochautomatisiertes Fahren eröffnet neue Möglichkeiten des Zugangs und Erhalts der Mobilität sämtlicher Bevölkerungsgruppen. Der damit einhergehende Wandel in der Rolle des Fahrers vom aktiven Lenker zum zunehmend passiven Systemüberwacher wirft neue Fragen der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion auf: Eine zentrale Rolle spielt der Fahrstil, dem ein entscheidender Einfluss auf das Fahrerleben beim hochautomatisierten Fahren zugesprochen wird. Eine nutzerzentrierte Gestaltung der Fahrstile dient der Absicherung der Akzeptanz und Nutzung automatisierter Fahrzeuge. Forschungsbedarf besteht dabei insbesondere für das subjektive Empfinden der Längsdynamik als Einflussfaktor des Fahrerlebens mit den Größen Komfort und Fahrspaß im automatisierten Fahren.

Im Rahmen einer Realfahrtstudie wurde zur Beantwortung dieser Frage der Einfluss unterschiedlich parametrisierter Beschleunigungs- und Verzögerungsmanöver auf den subjektiv erlebten Komfort untersucht. Dabei erlebten 20 Versuchsteilnehmer drei automatisierte Fahrprofile und bewerteten diese mittels Interviews und Fragebögen nach den Fahrten in Bezug auf Fahrkomfort sowie Fahrspaß. Während der Fahrten wurde kontinuierlich mit Hilfe eines Handreglers das Unbehagen, sprich der Diskomfort der Probanden erfasst. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Ausrichtung des hochautomatisierten Fahrstils am individuellen Fahrverhalten jedes Fahrers keine oder nur sehr geringe Vorteile gegenüber vordefinierten Fahrten bietet. Eine detaillierte Betrachtung der fahrdynamischen Verläufe der Fahrstile geben Hinweise darauf, dass gleichmäßige und zügige Fahrprofile bevorzugt werden. Weiterhin zeigt sich, dass eine Individualisierung der Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsmanöver für den Nutzer keine komfortrelevanten Vorteile bringt.

1. Einleitung

Automatisiertes Fahren erlangt eine immer größere Bedeutung in der Automobilindustrie. Bereits jetzt testen große Automobilhersteller hochautomatisierte Fahrzeuge im realen Straßenverkehr [1]. Der technische Fortschritt des automatisierten Fahrens eröffnet neue Möglichkeiten für die individuelle Mobilität und bietet viele Vorteile gegenüber dem manuellen Fahren. Dazu zählen Aspekte wie eine erhöhte Sicherheit, verringerte Emissionen, ein niedrigeres Verkehrsaufkommen durch einen optimierten Verkehrsfluss [2] sowie ein höherer Komfort [3]. Diese Vorteile werden jedoch oft nur aus technologischer Perspektive der Automatisierung vorangetrieben. Um das Potenzial der Automatisierung auszuschöpfen, sollte im Sinne einer hohen Nutzungsintention und Akzeptanz die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug berücksichtigt werden [4,5], wobei der Fokus insbesondere auf den Fahrer gelegt werden muss. Mit zunehmender Automatisierung ändern sich grundlegende Aufgaben des Fahrers vom aktiven Fahrer zum passiven Systemüberwacher mit eventueller Eingriffsfunktion [6]. Zur Absicherung der Nutzungsintention von hochautomatisierten Fahrfunktionen spielt die Akzeptanz der Fahrer eine wichtige Rolle [7]. Eine Möglichkeit diese zu verbessern, besteht durch eine Fahrweise, die von den Passagieren als angenehm erlebt wird [8,9]. Bisherige Untersuchungen zu Fahrkomfort fokussieren jedoch vor allem ergonomische Fragestellungen wie beispielsweise einer komfortablen Sitzkonstruktion. Es liegen bislang allerdings kaum Erkenntnisse darüber vor, wie komfortables und vom Fahrer akzeptiertes hochautomatisiertes Fahren realisiert werden kann.

Durch Studien mit konventionellen Fahrzeugen konnten bereits erste Anforderungen der Parametrisierung mit automatisierten Fahrzeugen abgeleitet werden. Beispielsweise ergaben sich für Autobahnsituationen mit moderaten Geschwindigkeiten aus der Analyse von manuellen Fahrten erste Grenzwerte für Längs- und Querschleunigungen. In Längsrichtung wurden Beschleunigungen von bis zu $1,7 \text{ m/s}^2$ und für Verzögerungen bis zu $2,5 \text{ m/s}^2$ erreicht. Für Spurwechselmanöver wird eine Querschleunigung von weniger als $1,5 \text{ m/s}^2$ angegeben. Es wurden jedoch auch Werte von bis zu $2,0 \text{ m/s}^2$ erreicht [10].

Diese Grenzwerte können als erste Richtlinie für automatisierte Fahrten gelten. Dabei wurde allerdings kaum oder methodisch nur unzureichend berücksichtigt, in wie weit solche Grenzen für den Fahrer als angenehm erlebt werden. Da der wahrgenommene Komfort unter anderem vom Fahrstil des Fahrers abhängig ist [11], stellt sich die Forschungsfrage, ob Fahrstile des hochautomatisierten Fahrens mit einer Ähnlichkeit zum individuellen manuellen Fahrstil das Fahrerleben verbessern können.

Zur Beantwortung dieser Frage wurde der Fokus der nachfolgend dargestellten Untersuchung auf unterschiedliche Fahrprofile und Fahrmanöver im Kontext des hochautomatisier-

ten Fahrens gelegt und untersucht, wie sich diese auf Fahrkomfort und Fahrspaß auswirken. Weiterhin wurde untersucht, in wie weit sich der parametrisierte Fahrstil am individuellen Fahrstil orientieren sollte oder ob ein einheitlicher Fahrstil zum besseren Fahrerleben führt.

2. Methode

2.1 Versuchspersonen

An der Realfahrstudie nahmen insgesamt 20 Probanden teil. Das mittlere Alter der Stichprobe lag bei 28,2 Jahren ($SD = 2,2$). Das Geschlechterverhältnis war mit 10 Frauen und 10 Männern ausgeglichen. Im Durchschnitt waren die Probanden seit 9,7 Jahren ($SD = 2,3$) im Besitz eines gültigen Führerscheins und wiesen eine mittlere Fahrleistung von 13.950 km im letzten Jahr ($SD = 14.424,9$) auf.

2.2 Versuchsaufbau und Versuchsmaterial

Um das Komfortempfinden bei unterschiedlichen Beschleunigungs- und Verzögerungsstilen erheben zu können, wurden im Rahmen einer Vorstudie im Fahrsimulator mehrere Szenarien von Probanden eingefahren und bewertet. Detaillierte Aussagen zum Ablauf und den Ergebnissen der Fahrsimulatorstudie können in [9] eingesehen werden. Für die vorliegende Realfahrstudie wurden darauf aufbauend die Szenarien „Anfahr- und Abbremsmanöver in Haltesituationen“ ausgewählt und zwei Fahrprofile auf Basis der eingefahrenen Manöver sowie deren Bewertungen durch die Probanden erstellt. Die von den Probanden im Simulator präferierte Variante ist ein „schnelleres“ Geschwindigkeitsprofil (Bild 1), das in der Vorstudie als „zügig, aber sicher“ beschrieben wurde. Dieser Fahrstil wies im Mittel eine Beschleunigung von $1,66 \text{ m/s}^2$ und eine Verzögerung von $1,35 \text{ m/s}^2$ auf.

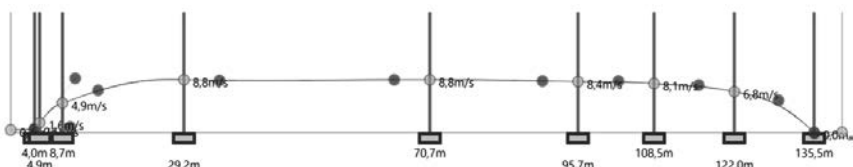


Bild 1: Geschwindigkeitsprofil der „schnelleren“ Fahrt

Das zweite, „langsamere“ Geschwindigkeitsprofil (Bild 2) beinhaltet zusätzlich beim Anbremsen eine Stufenform. Diese Form des Verzögerns bis zum Stillstand wurde von den Probanden in der Simulatorstudie besonders häufig manuell eingefahren und wurde somit auch in der automatisierten Fahrt abgebildet. Der Fahrtverlauf ist weniger zügig und durch zeitigeres

Verzögern gekennzeichnet. Weiterhin wurde in der Anfahrsequenz ein Anrollen des Fahrzeuges vor dem eigentlichen Beschleunigungsvorgang implementiert. Bei diesem Geschwindigkeitsprofil wurde im Durchschnitt mit $1,39 \text{ m/s}^2$ beschleunigt und mit $0,81 \text{ m/s}^2$ verzögert [12].

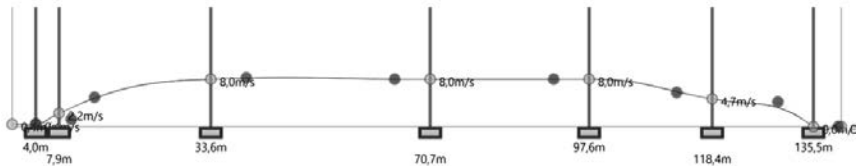


Bild 2: Geschwindigkeitsprofil der „langsameren“ Fahrt

Um diese Fahrstile mit dem individuellen Fahrstil der Probanden zu vergleichen, wurde als dritte Versuchsbedingung eine auf dem Testgelände zuvor manuell gefahrene Runde automatisiert „vorgespielt“ und bewertet.

Die Realfahrstudie wurde auf einer abgesperrten Fläche des Sachsenrings bei Chemnitz durchgeführt. Auf dieser Fläche wurde ein Rundkurs mit einer Länge von 278 m, bestehend aus zwei Geraden mit je 134 m und 144 m sowie zwei Wendemöglichkeiten, aufgebaut. Beide Geraden wurden jeweils mit einer Start- und einer Haltelinie sowie mit einem Stoppschild versehen, um Anfangs- und Endpunkt zu definieren (Bild 3).



Bild 3: schematische Abbildung des Versuchsparcours

Als Versuchsfahrzeug diente ein instrumentierter BMW i3, der mit Sensortechnik zur genauen Positionsbestimmung mittels DGPS ausgestattet wurde, um die (hoch)automatisierte Längsführung gemäß des Rundkurses zu gewährleisten. Die Querführung wurde von den Probanden übernommen.

2.3 Versuchsdurchführung

Für die Untersuchung der verschieden parametrisierten hochautomatisierten Geschwindigkeitsprofile wurden die Geradenabschnitte der Strecke genutzt. Vom Startpunkt aus wurde das Fahrzeug von 0 km/h auf 30 km/h beschleunigt, anschließend wurde die Geschwindigkeit gehalten und am Ende der Gerade von 30 km/h auf 0 km/h verzögert, so dass das Fahr-

zeug an der Haltelinie zum Halten kommt. Die Wendekurven dienten lediglich der Positionierung des Fahrzeugs am Startpunkt der Geraden und wurden von den Probanden manuell angefahren. Jeder Proband durchfuhr den Rundkurs mit jedem Fahrprofil zweimal, so dass insgesamt vier Geradenabschnitte pro Proband und Fahrprofil eingefahren wurden.

Zu Beginn wurde jedem Probanden in einer Trainingsfahrt die Möglichkeit gegeben, sich an das Fahrzeug und den Rundkurs zu gewöhnen. Im Anschluss fuhren die Probanden manuell den Rundkurs ab. Dabei wurde das manuelle Fahrprofil aufgezeichnet und folgend als erstes automatisiertes Fahrprofil „eigen“ präsentiert. Abschließend wurden die automatisierten Fahrprofile „schnell“ und „langsam“ in ausbalancierter Reihenfolge abgefahren.

2.4 Erhebung von Fahrkomfort und Fahrspaß

Zur Erhebung des Komfortempfindens wurde in Folge der drei hochautomatisierten Fahrten jeweils ein Fragebogen ausgefüllt. Dieser enthielt Fragen zur Einschätzung des Fahrkomforts während der Gesamtfahrt sowie Fragen zum Zeitpunkt, zum Verlauf und zur Stärke der Beschleunigungs- und Verzögerungsmanöver sowie Items zum Fahrspaß:

- Fahrkomfort der Gesamtfahrt: 0 (angenehm) bis 100 (unangenehm)
- Zeitpunkt des Beschleunigungs- sowie Verzögerungsbeginns: - 50 (zu früh) bis +50 (zu spät)
- Verlauf der Beschleunigung sowie Verzögerung: 0 (angenehm) bis 100 (unangenehm)
- Stärke der Beschleunigung sowie Verzögerung: - 50 (zu schwach) bis +50 (zu stark)
- Fahrspaß: 0 (sehr gering) bis 100 (sehr hoch)

Als weiteres Erhebungsinstrument diente der schon in der Fahrsimulatorstudie verwendete Handregler zur kontinuierlichen Erfassung des Diskomforts [9]. Der Handregler wurde von den Probanden durch Betätigen des Hebels bedient. Anhand einer Skala zwischen 0 (sehr komfortabel) bis 100 (sehr unkomfortabel) konnten so die Probanden die Intensität des Diskomforts an jedem Punkt der Strecke zurückmelden (Bild 4). Je stärker die Probanden den Hebel des Handreglers betätigten, desto unwohler fühlten sie sich. Über ein zusätzlich eingebautes Display oberhalb der Mittelkonsole des Versuchsträgers erhielten die Probanden eine visuelle Rückmeldung über die Stärke ihres Drückens des Handreglers.

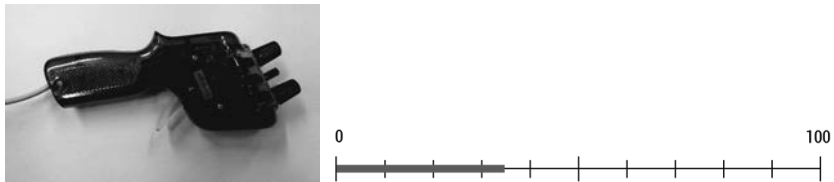


Bild 4: Handregler (links) mit visuellem Feedback (rechts) zur Rückmeldung des erlebten Diskomforts. Höhere Handreglerwerte indizieren höheren Diskomfort während der Fahrt.

3. Ergebnisse der Komfortbewertung verschiedener Fahrprofile

Die Auswertung der Fahrerbewertungen der Beschleunigungsvorgänge zeigt einen signifikanten Fahrstileffekt auf die Bewertung des Zeitpunktes der Beschleunigung ($F(2, 38) = 4.803$, $p = .014$, $\eta_p^2 = .202$). Bild 5 verdeutlicht, dass der Beschleunigungszeitpunkt der „schnellen“ Fahrt als optimal bewertet wurde. Die Beschleunigung in den Fahrten basierend auf dem eigenen Fahrstil der Probanden sowie „langsamen“ Fahrt wurde im Mittel als tendenziell zu spät bewertet. In den Posttests erwies sich die negativere Bewertung der „langsamen“ im Vergleich zur „schnellen“ Fahrt als signifikant ($t(19) = -3.218$, $p = .005$).

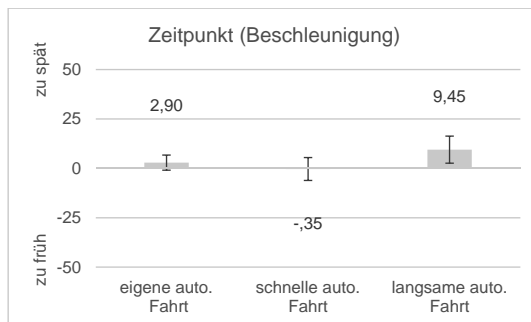


Bild 5: Fahrerbewertung des Beschleunigungszeitpunktes der drei hochautomatisierten Fahrstile

Für Verlauf und Stärke der Beschleunigung konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Fahrstilen gefunden werden. Jedoch wurde die „langsame“ Fahrt in der Tendenz in beide Dimensionen als am unangenehmsten bewertet, während die „schnelle“ und die eigene Fahrt einander sehr ähnlich bewertet wurden (Bild 6).

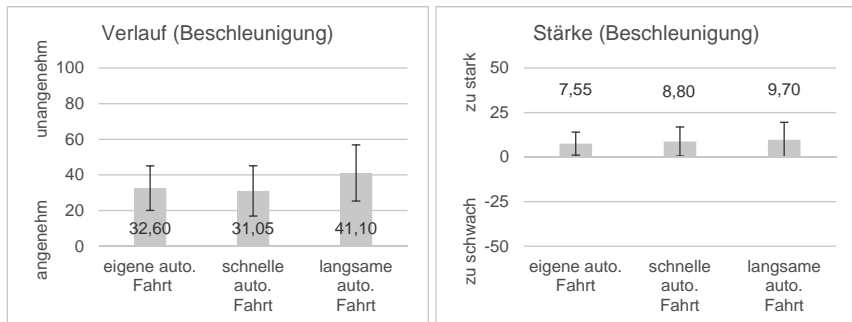


Bild 6: Fahrerbewertung des Beschleunigungsverlaufes (links) und der Beschleunigungsstärke (rechts) der drei hochautomatisierten Fahrstile.

Die Analyse der Verzögerungsvorgänge ergab ebenfalls einen signifikanten Fahrstileffekt in Bezug auf den Zeitpunkt ($F(2, 38) = 12.734, p < .001, \eta_p^2 = .401$). Zusätzlich konnte auch auf den Verlauf der Verzögerung ($F(2, 38) = 20.406, p < .001, \eta_p^2 = .518$) ein signifikanter Fahrstileffekt nachgewiesen werden (beide dargestellt in Bild 7).

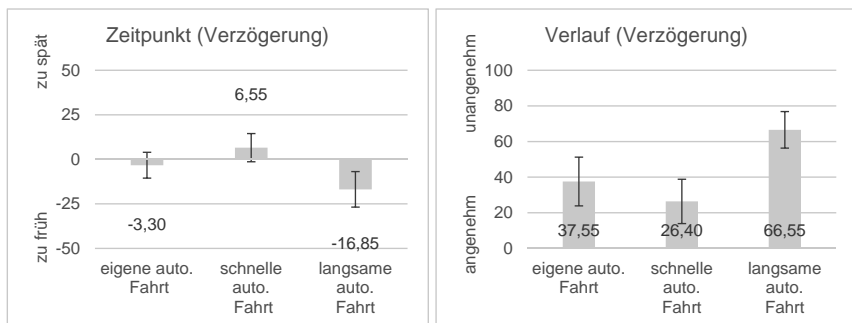


Bild 7: Fahrerbewertung des Verzögerungszeitpunktes (links) und -verlaufs (rechts) der drei hochautomatisierten Fahrstile

Nach Einschätzung der Probanden begannen die Verzögerungsvorgänge in der „langsamen“ Fahrt signifikant zu früh im Vergleich zur „schnellen“ ($t(19) = 4.638, p < .001$) sowie zur eigenen Fahrt ($t(19) = -2.768, p = .012$). Der Verzögerungszeitpunkt der eigenen Fahrt wurde als minimal zu früh eingestuft. Allerdings zeigte dieser Fahrstil unter den drei Fahrstilen die geringste Abweichung vom Optimalwert und erwies sich damit als die am angenehmsten beur-

teilte Variante. Die Verzögerung innerhalb des „schnellen“ Fahrstils erfolgte für die Probanden hingegen zu spät, allerdings ebenfalls mit einer geringen Abweichung vom Optimalwert. Der Verzögerungsverlauf der „langsamen“ Fahrt wurde ebenfalls als signifikant unangenehmer eingestuft als in der „schnellen“ ($t(19) = -5.514, p < .001$) und der eigenen ($t(19) = 4.233, p < .001$) Fahrt. Der Verlauf der „schnellen“ und der eigenen Fahrt wurde als eher angenehm empfunden, wobei die „schnellere“ Fahrt dabei noch signifikant angenehmer erlebt wurde als die eigene Fahrt ($t(19) = 2.172, p = .043$).

Die Bewertung der Verzögerungsstärke zeigt keine signifikanten Effekte. Allerdings zeigen die Ergebnisse die gleichen Tendenzen wie die bisherigen Werte. Es erfolgte eine sehr ähnliche Bewertung des eigenen und des „schnellen“ Fahrstils nahe des Optimalbereiches sowie eine schlechtere Bewertung des „langsamen“ Fahrstils, bei dem die Verzögerung als zu stark wahrgenommen wurde (Bild 8).

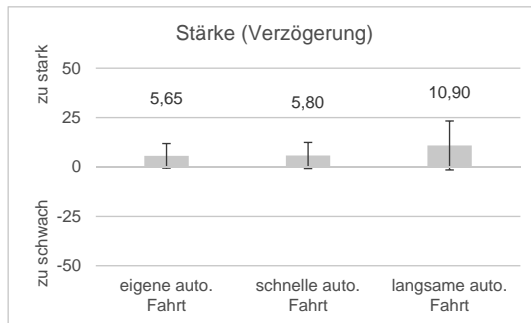


Bild 8: Fahrerbewertung der Verzögerungsstärke der drei hochautomatisierten Fahrstile.

Die globale Bewertung des Fahrerlebens nach jeder der drei hochautomatisierten Fahrten, dargestellt in Bild 9, unterschied sich nicht signifikant für den Fahrkomfort, jedoch für den Fahrspaß ($F(2, 38) = 7.566, p < .01, \eta_p^2 = .285$). Die Probanden erlebten während der „langsamen“ Fahrt signifikant weniger Spaß als während der „schnellen“ ($t(19) = 3.820, p = .001$). Der eigene Fahrstil wurde im Mittel zwischen diesen beiden Fahrten eingeordnet und eher positiv bewertet. Trotz fehlender Signifikanzen zeigen die Ergebnisse in Bezug auf den Fahrkomfort die gleichen Tendenzen. Auch hier wurde die „langsame“ Fahrt erneut als am unangenehmsten, die „schnelle“ Fahrt als am angenehmsten eingestuft.

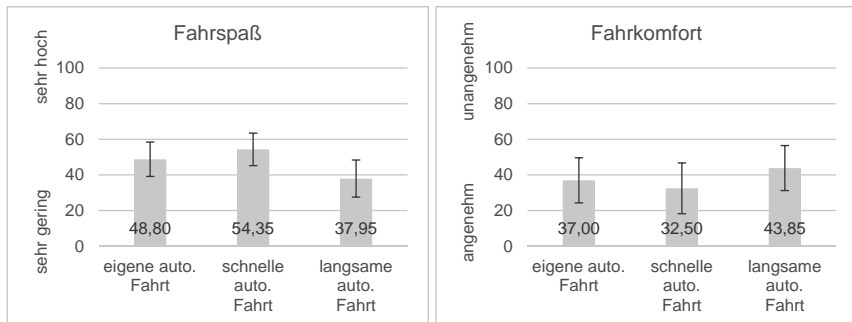


Bild 9: Fahrspaß (links) und Fahrkomfort (rechts) während der drei hochautomatisierten Fahrstile.

Neben der Bewertung des Fahrkomforts mittels Fragebogen wurde die „langsame“ Fahrt auch während der Fahrt mit Hilfe des Diskomfort-Handreglers als am unangenehmsten bewertet. Der eigene Fahrstil wurde nur geringfügig angenehmer eingeschätzt. Die „schnelle“ Fahrt löste bei den Probanden den geringsten Diskomfort aus. Damit wurde der dort implementierte Fahrstil von den Probanden generell als der komfortabelste eingestuft. Die aufsummierten Handreglerwerte über jede der drei Fahrten hinweg sind in Bild dargestellt.

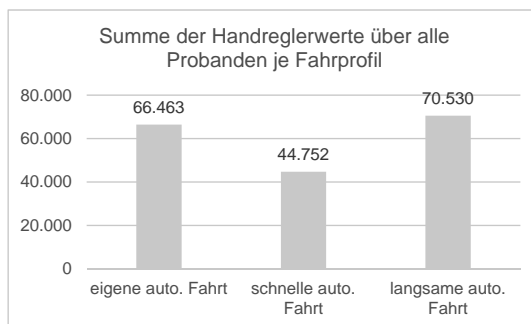


Bild 10: Aufsummierte Handreglerwerte für jede der drei hochautomatisierten Fahrten.

4. Zusammenfassung und Diskussion

Drei Fahrstile, „langsam“ und „schnell“, hervorgegangen aus der Fahrsimulatorstudie [9] sowie eine auf dem Testgelände manuell eingefahrene und automatisiert wiederholte Fahrt wurden durch 20 Probanden mittels Fragebogen und Handregler bewertet und miteinander

verglichen. Der empfundene Fahrkomfort wurde über alle untersuchten Fahrstile auf einem ähnlichen Niveau bewertet. In absoluten Werten nahmen die Probanden den wahrgenommenen Fahrspaß und Fahrkomfort jedoch als eher mittelmäßig wahr, was bezüglich des Fahrspaßes auf die geringen Geschwindigkeiten zurückgeführt werden kann. Bei einer detaillierten Betrachtung bezüglich der Auslegung der Fahrstilparameter Zeitpunkt, Verlauf und Stärke von Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen ergeben sich jedoch Anhaltspunkte, welche die globale mittelmäßige Bewertung teilweise erklären können.

Die prinzipielle Parametrisierung von Zeitpunkt, Verlauf und Stärke des Beschleunigungsmanövers wurde für jeden Fahrstil grundsätzlich positiv bewertet. Der Verlauf wurde als eher angenehm eingeschätzt, die Beschleunigungen wurden jedoch als etwas zu stark empfunden. Diese bewegen sich jedoch nicht in einem kritischen Bereich. Inferenzstatistisch ergaben sich über das gesamte Probandenkollektiv und über jeden Fahrstil hinweg keine Unterschiede von Verlauf und Stärke. Es wurde lediglich der Zeitpunkt der Beschleunigung im „langsamen“ Fahrstil im Vergleich zum eigenen und „schnellen“ Fahrstil als etwas zu spät bewertet. Dies schließt darauf, dass ein im Fahrprofil designtes Anrollen des Autos mit anschließender normaler Beschleunigung als nicht erwartungskonform und somit als unkomfortables Fahrverhalten automatisierter Fahrzeuge ausgelegt und bewertet wird.

Für das Verzögerungsverhalten ergibt sich eine ähnliche Bewertung. Das stufenartige Abbremsverhalten (Verlauf) im „langsamen“ Fahrstil wurde von den Probanden im Vergleich zu den anderen Fahrstilen als unangenehm empfunden, wohingegen die eigene Fahrt als auch die „schnelle“ Fahrt mit einem kontinuierlichen Bremsverlauf als eher angenehm bewertet wurden. Der mit einem stufenartigen, nicht kontinuierlichen Bremsverlauf einhergehende zeitige Abbremszeitpunkt konnte ebenso nicht überzeugen und wurde im Vergleich zu den anderen Fahrstilen als zu früh bewertet. Die Bremsstärke wurde nah am Optimum bewertet und nur geringfügig als zu stark eingeschätzt.

Es zeigen sich also zwei generelle Defizite über alle Fahrten inklusive der manuell eingefahrenen Manöver: Zum einen werden die Beschleunigungen („schnelle“ Fahrt mit $1,66 \text{ m/s}^2$, „langsame“ Fahrt mit $1,39 \text{ m/s}^2$) stets als etwas zu stark eingeschätzt und zum anderen werden nichtstetige Beschleunigungen eher negativ eingeschätzt.

Verglichen mit den in Realfahrten gefundenen Werten von Ammon (Beschleunigungen von bis zu $1,7 \text{ m/s}^2$ und für Verzögerungen bis zu $2,5 \text{ m/s}^2$) [10] bewegte sich der Versuch in ähnlichen Beschleunigungsverhältnissen. Wir empfehlen daher die im Versuch eingesetzten Beschleunigungswerte, welche als leicht zu stark eingeschätzt wurden, zu reduzieren und vermuten, dass stetige Beschleunigungswerte von $1,5 \text{ m/s}^2$ und Verzögerungswerte von

1,0m/s² als komfortabel empfunden werden. Dies müsste allerdings in fortführenden Studien untersucht werden.

Zusammenfassend zeigt sich, dass eine Ausrichtung des hochautomatisierten Fahrstils am individuellen Fahrverhalten jedes Fahrers keine oder nur sehr geringe Vorteile gegenüber vordefinierten Fahrten bietet. Dies zeigt sich insbesondere bei den aufsummierten Handreglerwerten, da der „schnellere“, vordefinierte Fahrstil am wenigsten Diskomfort auslöste. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine individuelle Parametrisierung des hochautomatisierten Fahrstils in Anpassung an das Fahrverhalten jedes einzelnen Fahrers nicht zu einer Optimierung des Fahrerlebens führen wird. Wahrscheinlicher erscheint ein universeller Fahrstil, der von der Mehrzahl der Fahrer als komfortabel erlebt wird. Dies schließt die Möglichkeit zur Wahl zwischen einer überschaubaren Anzahl leicht modifizierter Fahrprofile oder zur individuellen Modifikation einzelner Fahrparameter durch den Fahrer jedoch nicht aus. Deutlich wird auch, dass der hochautomatisierte Fahrstil zwar eine notwendige, aber keine hinreichende Voraussetzung für ein positives Fahrerleben darstellt. Eingrenzend ist zu sagen, dass die in dieser Studie untersuchten Fahrstilelemente lediglich Stärke und Verläufe von Parametern der Längsführung sowie den Zeitpunkt des Beginns von Fahrmanövern betrachtet und die Probanden aktive Beobachter der Fahrsituation waren. Fragestellungen, in wie weit die Fahrzeugumgebung wie zum Beispiel weitere Verkehrsteilnehmer, die Tätigkeiten im Innenraum als Passagier sowie fahrstilrelevante Parameter der Querführung Einfluss auf das Komfortempfinden der Passagiere haben, müssen ebenso in weiteren Studien systematisch untersucht werden.

5. Danksagung

Dieser Beitrag wurde gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Projekt: DriveMe, FKZ: 16SV7119).

6. Literaturverzeichnis

- [1] Trimble, T. E., Bishop, R., Morgan, J. F., & Blanco, M.: 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, 2014.
- [2] Meyer, G. & Deix, S.: Research and innovation for automated driving in Germany and Europe. In Lecture Notes in Mobility, Road Vehicle Automation, Meyer, G. & Beiker, S., Eds., Cham: Springer International Publishing, 2014, p. 71-81.
- [3] Silberg, G.: Self-Driving Cars: Are We Ready, KPMG LLP, 2013.

- [4] Gasser, T. M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Eier, J., Flemisch, F. Häcker, D. Hesser, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J., & Vogt, W.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft, 2012.
- [5] Banks, V. A., & Stanton, N. A.: Keep the driver in control: Automating automobiles of the future. *Applied Ergonomics*, 2015.
- [6] Manstetten, D. & Marberger, C.: Wandel der Rolle des Fahrers durch Automatisierung. VDI-Tagung Technisches Design und integrierte Produktentwicklung im Fahrzeug, 1, ISBN: 978-3-942980-39-5, 2015, S.41-52.
- [7] Parasuraman, R. & Riley, V.: Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse. *Human Factors The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 39(2), 1997, 230–253.
- [8] Elbanhawi, M., Simic, M., & Jazar, R.: In the Passenger Seat: Investigating Ride Comfort Measures in Autonomous Cars. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 7 (2015) 3, p. 4-17.
- [9] Hartwich, F., Beggiato, M., Dettmann, A., & Krems, J. F.: Drive me Comfortable: Individual Customized Automated Driving Styles for Younger and Older Drivers. 8. VDI-Tagung. In *Der Fahrer im 21. Jahrhundert Bd. VDI-Berichte Nr. 2264*, Braunschweig, 2015.
- [10] Ammon, D.: Systemtechnische Überlegung auf dem Weg zum automatisierten Fahren. Was bleibt und was muss sich ändern, wenn der Algorithmus statt des Fahrers fährt?. VDI-Tagung. In *Der Fahrer im 21. Jahrhundert Bd. VDI-Berichte Nr. 2205*, Braunschweig, 2013.
- [11] Ellinghaus, D. & Schlag, B.: Beifahrer. Eine Untersuchung über die psychologischen und soziologischen Aspekte des Zusammenspiels von Fahrer und Beifahrer. *UNIROYAL VERKEHRSUNTERSUCHUNG*, (26), 2001.
- [12] Scherer, S., Dettmann, A., Hartwich, F., Pech, T., Bullinger, A. C., & Wanielik, G.: How the driver wants to be driven - Modelling driving styles in highly automated driving. 7. Tagung Fahrerassistenz, München, 2015.

Sicherheitsanforderungen an Systeme hochautomatisiert fahrender Fahrzeuge

Dipl.-Ing. **Alexander Kraus**, TÜV SÜD Auto Service GmbH, Garching

Abstract

In recent decades, electronic control systems become more and more important part of automotive active and passive safety systems. They lead to reduction of fatalities by supporting driver in different critical situations. Further road safety improvement is achievable through advanced driver assistance systems (ADAS) and automated driving (AD), which are beginning with a co-pilot functions and will result in autonomous driving in the future.

The elementary requirement on these systems is based on the flawless and safe operating mode. The development of new and more complex driver assistance systems, which more and more takes over the drivers' duties, requires also development of new concepts for quality and functional reliability assessment.

Currently regulatory bodies and consumer organisations define for some vehicle categories couple of physical proving ground tests to assess the functionality of ADAS. However, the testing procedures based on physical testing seem to be insufficient to cover the all possible cases and thus to evaluate the effectiveness and safety. To cover the huge number of possible scenarios, simulation methods are the only feasible way. Physical tests will be still needed for verification and validation of these simulation models and set-ups.

The proper standardisation and regulatory basis is important for all stakeholders. Since current regulations and inspection specifications are not sufficient or even not existing, several committees and project groups are developing new international regulations and standards.

If considering such complex systems as ADAS or even AD not only their effectiveness but also functional safety and IT security are essential for the system overall evaluation.

These systems have access to all core functionalities of the vehicle and their improper or unsafe behaviour could cause accidents, which would not occur if the driver would drive the

vehicle himself. To enable future homologation of systems the functional safety standards (ISO 26262) and assessment methods have to be modified.

The cars will increasingly connect with the outside world, which results in new vulnerabilities and threats. IT-security becomes the same importance like the functional safety. Therefore, an automotive applicable Standard to IEC 62443 must be developed to ensure common IT security level of all future vehicles on the roads.

The technical development towards smart mobility systems is very fast. It must be ensured that through existing standardisation and regulatory basis the future smart vehicles will be able to achieve the main objectives – increase comfort and reduce accidents and fatalities on the roads.

1. Introduction

The modern cars were invented as purely mechanical systems more than 130 years ago. However, since introduction of Antilock Brake Systems in 1970s the computerization of the vehicle driving started and computers played more and more significant role in the vehicles. The systems such as Antilock Brakes, Traction Control or Stability Control interrupt in potentially dangerous situations the direct connection between the driver and vehicle with the objective to reduce the possible risk, either to avoid the collision or at least to reduce the collision velocity.

In general, three groups of assistance systems can be recognized:

1. Comfort Systems such as Headlight or Rain Assistant – such systems take duties from driver, which are not directly connected with vehicle dynamic functions,
2. Information and Warning Systems such as Driver Alert, Lane Departure Warning or Traffic Sign Recognition Systems – such systems just inform driver about certain state of vehicle, driver or infrastructure,
3. Intervening Emergency Systems such as Stability Control or Automatic Emergency Braking- such systems take partial control over the vehicle in critical (near accident) situations,
4. Continuously Acting Systems such as Adaptive Cruise Control or Lane Keeping Assistance – such systems support driver in long time periods by taking part of his duties in standard situations.

The increasing computational power together with reducing purchase costs and as well as availability of low cost efficient and reliable sensors enables the manufacturers to implement new functions such as lane keeping assistance or emergency braking options even to low cost cars, which are called Advance Driver Assistance Systems (ADAS). The logical consequence of the ADAS development is a vehicle which is either partly or even fully able to take the driver's duties. Such an automated driving (AD) vehicle will offer a co-pilot function or drive even autonomously without a driver. The development will be divided in several development phases as indicated in Table 1.

In order to achieve such an objective, the vehicles must take responsibility from a human driver to its IT systems and control algorithms. Despite it is expected that driverless vehicles will be able to reduce significantly the number of accidents and fatalities, some sources expect even 90% or more, the initial stages of AD implementation will be accompanied by increase of accidents due to heterogeneous traffic of driverless and human driven vehicles and the insufficient maturity of AD systems.

Table 1: Classification of degrees of automation

Level	Description	Example
Level 0 No Automation - Driver only	Human driver completely controls all vehicle driving functions at all times.	Intervention to neither lateral nor longitudinal dynamics
Level 1 Assisted	Driver controls driving functions himself. Some individual vehicle driving functions can be in certain situations done automatically by the vehicle. Permanent monitoring of the system by the driver is required. Driver must be able to take over the driving task at any moment.	Stability Control Automatic Cruise Control Parking Steering Assistant
Level 2 Partial	The vehicle can perform all driving functions automatically in certain specified situations.	Traffic Jam Assistant

Automation	Permanent monitoring of the system by the driver is required. Driver must be able to take over the driving task at any moment.	
Level 3 High Automation	The vehicle can perform all driving functions automatically in certain specified situations. Monitoring of the system by the driver is not required. Drive must be prepared to take over the driving role within a lead time on request of the vehicle.	Motorway Co-Pilot
Level 4 Full Automation - Driverless	The vehicle can perform all driving functions autonomously and may operate with occupants who cannot drive and without human occupants. Monitoring of the vehicle by driver is not required.	Robotic Taxi

The growing vehicle complexity in terms of connected embedded systems, number lines of code and particularly the vehicle connectivity result in the transition of vehicles from computer controlled systems to information systems. As a consequence, the level of vulnerability increases and the attention and accessibility for vehicle hacking continuously grows, as indicated in the already published cases. In the very near future the IT security should get the same importance as safety of vehicles. I will result in adoption of information technology approaches and processes into the whole automotive ecosystem consisting from vehicle development, production, operation and maintenance sectors as well as the infrastructure.

In general the future legislation should address the following areas in order to enable the high and full automation of vehicles:

1. Consistency with technical regulations and type approval process
2. Consistency with international conventions such as Vienna Convention
3. Consistency with national traffic rules
4. Product liability
5. Driver liability

2. Current testing

The elementary requirement on ADAS and AD systems is their flawless and safe operation. The development of new and more complex driver assistance systems, which more and more takes over the drivers' duties, requires also development of new approaches for quality and functional reliability assessment. The question, how to effectively assess the ADAS and AD is faced not only to vehicle and component manufacturers but also to consumer organizations, testing companies and last but not least legislative bodies. Each group searches for special assessment criteria.

The overall objective of the testing i campaigns is to get enough insight in the AD behaviour in order to assess the AD systems using general methods of functional safety for automotive applications, which are summarised in ISO 26262.

2.1. Consumer testing

Currently the consumer organizations are focused on Advanced Emergency Braking (AEB) and Lane Departure Warning (LDW).

Consumer organization tests under the New Car Assessment Program (NCAP), [1], serves for the testing of AEB and LDW in passenger cars. Currently about nine different NCAP consumer organizations around the world exist, however not each has the AEB tests in its portfolio. The different NCAP test procedures demonstrate the heterogeneity of approaches in different countries and regions. While for example the US NCAP is based on tests drivers, the Euro NCAP uses driving and pedal robots along with accurate measurements of vehicle position. The advantages of the European approach are obvious: the higher accuracy in the position and higher repeatability the lower number of necessary tests to be performed.

Euro NCAP currently tests AEB systems in three areas: AEB city, AEB inter-urban and AEB pedestrian. Despite the whole set of velocities, this method considers only single, limited representative scenarios without taking into account the driver's behavior. This can be sufficient for consumer review to ensure comparability of different vehicles. However, for the

vehicle safety and future type approval this is not enough, because realistic scenarios and driver and environmental influences are not included.

2.2. Regulations

The ADAS functions are implicitly addressed by the UN ECE Regulations 13 and 79 with Annexes on electronic systems. However, current Regulation 79 explicitly disqualifies the AD systems, since requests disabling autonomous steering function for velocities exceeding the limit 10 km/h by more than 20%, [2]. There are already proposals for modification of the Regulation 79 such as [3].

The vehicles of categories M2, M3, N2 and N3, i.e. trucks and buses with some exceptions are legislatively controlled by the Commission Regulation (EU) No. 351/2012 and 347/2012 to be equipped with LDW and AEB functions since November 2015. For AEB the deadline depends on the braking system and suspension. More details are available directly in the Commission Regulation (EU) documents, see [3] and [4]. On the UN ECE level the Regulations 130 and 131 exist, which define the technical requirements and testing procedures.

For instance UN ECE R 131 defines the timing and type of warning as well as automatic braking maneuver based on tests with a stationary and moving target, which represents a passenger car of category M1, class AA saloon. The initial velocity is defined to 80 km/h. The AEB system should at first warn the driver and if he does not reacts then to automatically brake the vehicle. The warning timings are different for different categories in vehicle categories, warning time for N2 is shorter than for M3. Further testing is focused on identification of failures and last but not least the driving in the gap between 2 parking vehicles, which are 4.5 meters side to side from each other.

The existing Regulations do not support the type approval of AD vehicles, because they either do not exist or define obstacles for automatic driving. The type approval of ADAS and AD needs new revised legislation including effective testing procedures in order to keep the safety level of the AD vehicles on sufficient unified level.

2.3. Other approaches

Besides the consumer organisations testing and type approval regulations a lot of internal often proprietary testing procedures exist which are developed e.g. by vehicle manufacturers or by testing organisations, e.g. [6] or [7]. Such testing approaches are usually significantly

more complex, but also in these cases they are not able to cover the whole spectrum of possible scenarios which can occur even for vehicles with ADAS functions.

One can analyse ADAS from different points of view. The approaches can focus parameters or features, which are not directly safety relevant, such as comfort during deceleration and acceleration of the longitudinal dynamic control system. An example of global assessment and comparison of ADAS systems from different manufacturers and vehicles is presented in

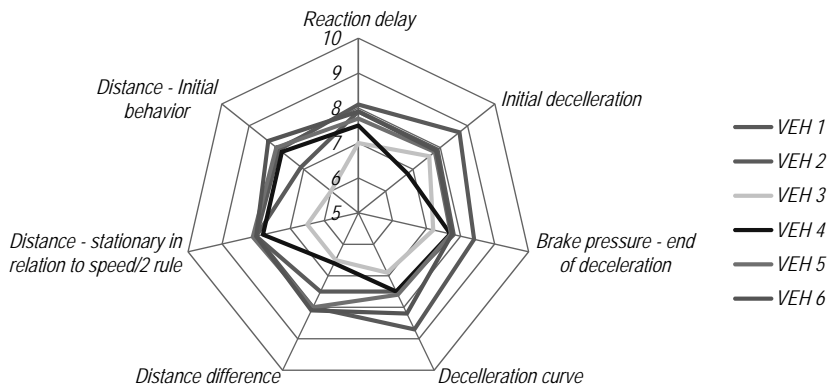


Fig. 1: Example of complex ADAS assessment

3. Role of virtual testing

Neither the existing consumer organisation test approaches nor those defined in UN ECE Regulations 130 and 131 offer sufficient bases to cover majority of possible scenarios which should the ADAS or AD system solve in the future. It can be stated that there is a gap in adequate regulatory landscape. The scenarios must consider not only the vehicle, but also the driver behaviour and last but not least the surrounding environment of the vehicle.

Because of complexity, taking responsibility from the driver and difficult definitions of real test at the system limits, the testing of driver assistance systems would require significant amount of test instances. It should results in a hybrid approach, in which just couple physical

experiments are to be performed. These experiments serve for an identification of vehicle and system parameters, to set up and verify the simulation model. This model can be then very simply used to get the whole spectrum of results for all test cases including also very rear events. With this approach the AD assessment differs from e.g. assessment of passive safety, in which a limited amount of crash tests is sufficient.

The only possible solution is the combination between physical proving ground tests, field test and simulation as indicated in Fig. 2. The test cases will be statistically evaluated based on the accident statistical data. Firstly the priorities from accident data should be identified. In this framework the systems should be evaluated and the contribution to vehicle quantified. From another point of view the general evaluation of the systems to traffic safety should be also estimated. As a result of the statistical analysis the set of critical situations with parameters is defined. These situations can be later tested in detail either virtually or physically as indicated e.g. in [8].

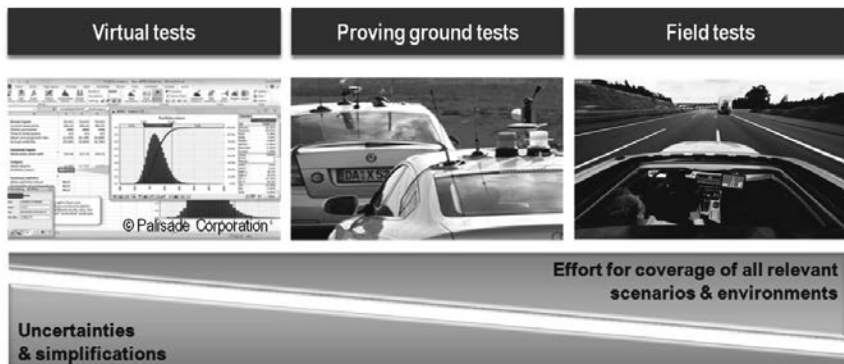


Fig. 2: Combined approach for AD testing

In the virtual testing case the selection of simulation tool is of high importance. Particularly for the independent testing organizations it is hardly imaginable that the vehicle manufacturers and component suppliers will deliver their proprietary models of vehicles and their components in high level of detail. This fact leads either to embedded locked models (optimally certified by a third party), which communicates on a independent platform or to generic mathematical models which simulate the components with simplified models based on statistical parameters of their behaviour.

4. IT Security

The connectivity of vehicles grows rapidly. They can be connected to internet either directly or through mobile devices of passengers, vehicles have many communication interfaces. As already indicated the vehicles are more and more becoming IT systems. Despite covering all imaginable forms of safety, such as active, passive, functional, the risks remain in the cyber security of connected vehicles. An example of vehicle IT infrastructure is presented in Fig. 3. It is evident, that the vehicle has couple of interfaces which can be attacked by hackers. The main difference between safety and security is that Functional Safety development is concluded at issuing a type approval, IT Security development is a continuous process along the whole vehicle lifetime.

The vehicle communication gateways must be prepared to handle different types of attacks starting with simple but sometimes well efficient DoS (denial of service) attack of phishing.

The implementation of IT security measures in the automotive industry must result in the significant change of understanding of vehicle development and maintenance processes. One example is patching of security holes during the whole lifetime of the vehicle. The automotive manufacturers must actively keep know how about the codes in the particular vehicle and must be able to release patches even many years after end of production of a certain model. They should also motivate users to update to the latest release.

In general a significant gap in automotive IT security regulatory space has occurred. Therefore, an automotive applicable Standard to IEC 62443 must be developed to ensure common IT security level of all future vehicles on the roads.

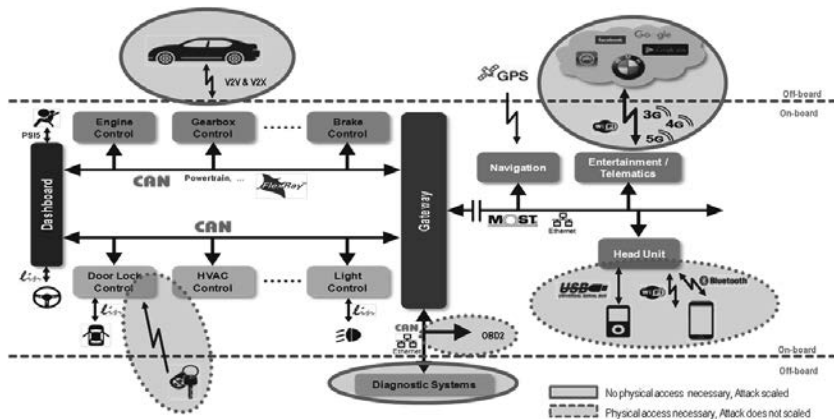


Fig. 3: Example of IT infrastructure in a vehicle

5. Conclusions

The evolution of vehicles towards autonomous machines should be accompanied by the fast changes in the harmonized legislation. The reason is to define clear rules for all vehicles in the traffic systems.

Rather complicated for type approval seems the self learning software, because it will change its responses during the lifetime of the vehicle.

This paper addressed some of necessary changes needed to get the automated and autonomous vehicles on roads from the vehicle type approval point of view. However, many more changes should be done, e.g. the traffic rules should be re-written to be machine understandable and interpretable, communication standards for v2x communication should be harmonized and even periodical inspection rules should be modified.

By fast and proper implementation of the changes the automated and autonomous vehicles will be a positive contribution for the road safety.

References

- [1] P. Seiniger, "NCAP Testing of Safety Related Driver Assistance Systems," in *SafetyUpDate 2016*, Aschaffenburg, 2016.
- [2] *UN ECE Regulation 79 Rev.2/Amend.1 Uniform provisions concerning the approval of vehicles*, 2014.
- [3] G. e. a. T.M., *Legal consequences of an increase in vehicle automation - Consolidated final report of the project group*, Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2012.
- [4] *Commission Regulation (EU) No. 351/2012: type-approval requirements for the installation of lane departure warning systems in motor vehicles*, 2012.
- [5] *Commission Regulation (EU) No. 347/2012: type-approval requirements for certain categories of motor vehicles with regard to advanced emergency braking systems*, 2012.
- [6] K. Baltruschat and U. Steininger, "An integral application – Testing of Advanced Driver Assistant System (ADAS)," in *carhs SAFETYASSIST 2013*, Aschaffenburg, 2013.
- [7] V. Jirovský and O. Vaculín, "Advanced Methods for Integrated Safety Systems Testing," in *24th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2015*, Aachen, 2015.
- [8] P. Lewerenz, G. Prokop, L. Wech and U. Steininger, "Konzept zur Wirksamkeits-analyse warnender Fahrerassistenzsysteme," in *10. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit*, Berlin, 2015.

Interaktionssequenzen zwischen Fahrzeugen und Fußgängern im Parkplatzszenario als Grundlage für kooperativ interagierende Automatisierung

M. Sc. **Claudia Witzlack**, Dr. **Matthias Beggiato**,
Prof. Dr. **Josef Krems**, TU Chemnitz, Chemnitz

Kurzfassung

Der motorisierte Straßenverkehr stellt ein komplexes System unterschiedlicher Akteure dar, deren Kommunikation/Interaktion notwendig ist um einen sicheren und störungsfreien Verkehrsfluss zu gewährleisten. Dabei spielen neben formellen Kommunikationsmitteln zur Absichtsvermittlung, wie etwa Blinken, eine Reihe informeller Kommunikationsformen eine Rolle, wie etwa Gesten oder Körperbewegungen. Informelle Kommunikation findet besonders auf Parkplätzen statt, da hier weniger rechtliche Vorschriften zur formellen Kommunikation existieren. Hier findet sich zudem ein hoher Anteil an Mischverkehr zwischen motorisierten Verkehrsteilnehmern und nicht-motorisierten schwächeren Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern oder Radfahrern. Im Rahmen dieser Studie wird die real ablaufende Interaktion zwischen motorisierten Fahrzeugen und Fußgängern in einem Parkplatzkontext anhand von Videoaufnahmen beschrieben und analysiert. Als Ergebnis dieser qualitativen Beobachtungsstudie werden typische Interaktionssequenzen und deren charakteristische Kommunikationsparameter (wie z.B. Blickkontakt) herausgearbeitet. Diese Studie wird im Rahmen des Projektes „Kooperative Interaktion mit schwächeren Verkehrsteilnehmern im automatisierten Fahren“ (KIVI) als Teilprojekt des DFG-Schwerpunktprogramms 1835 „Kooperativ interagierende Automobile“ durchgeführt. Auf Basis der Ergebnisse werden Implikationen für die Kommunikationsgestaltung von schwächeren Verkehrsteilnehmern und automatisierten Fahrzeugen abgeleitet, welche sich auf eine kooperative Trajektorienplanung (z.B. Abbremsen als Vorrangsignal) sowie geeignete Mensch-Maschine-Schnittstellen beziehen.

Abstract

Road traffic represents a complex system of different Participants, whose communication and interaction is necessary to ensure a safe and undisturbed traffic flow. Despite formal means of communication, like the indicator, there are a lot of important informal means of

communication, like gesture. Especially at parking areas, there is a high occurrence of informal communication, because of mixed road use for pedestrians, cyclists and drivers. In this study, we recorded, described and analyzed interactions between pedestrians and drivers in real terms on a parking area. As a result of this qualitative observational study, we work out the details about typical sequences of interaction and their characteristic parameters (like eye-contact). Finally, we discuss implications for designing comfortable human-machine-interaction in terms of cooperative trajectory planning. This study is part of the project "Cooperative interaction between vulnerable road users in automated driving" which is funded by the DFG-Program 1835 cooperative interacting vehicles (Kooperativ interagierende Automobile).

1. Einleitung

Bereits heute verfügen Fahrzeuge über hoch entwickelte Technologien und automatisierte Funktionen, die den Fahrer in verschiedensten Verkehrssituationen unterstützen (z.B. Adaptive Cruise Control, Notbremsassistent etc.). Der Trend zur Fahrzeugautomatisierung wird sich in absehbarer Zeit fortsetzen und Fahrzeuge mit höheren Automationsgraden werden einen integralen Teil des zukünftigen Verkehrssystems repräsentieren [1]. Bisherige Forschung im Bereich der Fahrzeugautomatisierung adressiert vorrangig technische Aspekte [2] oder spezielle Bereiche des Fahrererlebens, wie bspw. Automationsvertrauen [3]. Demgegenüber ist die Kommunikation und Interaktion zwischen automatisierten Fahrzeugen und verletzlichen Verkehrsteilnehmern wie Fahrradfahrern und Fußgängern (vulnerable road users, VRU) wenig erforscht [4]. Aufgrund der Ähnlichkeit der Definitionen von Kommunikation und Interaktion in der einschlägigen Literatur, werden diese Begriffe hier synonym verwendet (vgl. [5]). Die Kommunikation zwischen VRUs und motorisierten Fahrzeugen wird sich im Zuge der Fahrzeugautomatisierung jedoch verändern, da die aktive Rolle des Fahrers durch einen technischen Akteur weitgehend ersetzt wird [4]. Zudem dient die Kommunikation zwischen VRUs und motorisierten Verkehrsteilnehmern u.a. zur Einschätzung und Vorhersage des jeweiligen Verhaltens als auch um einen reibungslosen und sicheren Verkehrsfluss aufrecht zu erhalten [4]. Im Rahmen dieser Studie soll ausschließlich das Kommunikationsverhalten zwischen Fußgängern, als Teilgruppe aller VRUs und motorisierten Verkehrsteilnehmern näher beleuchtet werden, um Implikationen für eine möglichst komfortable und sichere Kommunikationsgestaltung zwischen Fußgängern und automatisierten Fahrzeug abzuleiten.

Die Kommunikation im Straßenverkehr unterliegt in ihrer expliziten Form den Regelungen der StVO. Neben den expliziten Kommunikationsformen zum Anzeigen einer Absicht, wie

etwa dem Blinker, Warnblinkanlage oder Bremslichter existieren weitere informelle Kommunikationskanäle [4].

Informelle Formen der Kommunikation kommen vor allem dann zum Einsatz, wenn keine eindeutige Regelung vorliegt und sich somit größere Handlungsfreiräume öffnen [5], wie bspw. auf Parkplätzen. Diese Form der Kommunikation geschieht meist nonverbal aufgrund der eingeschränkten Verständigungsmöglichkeit zwischen Fahrer und VRU. In Verkehrssituationen, die eine Kommunikation zwischen VRU und motorisierten Verkehrsteilnehmer erfordern, sind insbesondere der Blickkontakt, Gesten und Körperbewegungen entscheidend [6]. In mehreren Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass der Blickkontakt zwischen Fahrer und VRU bzw. Kopfbewegungen des Fußgängers entscheidende Variablen für den Ablauf einer Straßenquerung sind. Šucha (2014) konnte bspw. zeigen, dass 84% der Fußgänger durch Blickkontakt signalisieren, dass sie die Straße überqueren wollen und dass 34% der Autofahrer versuchen, über Blickkontakt mit dem Fußgänger zu kommunizieren [7]. Kloeden, Brouwer, Ries und Rasshofer (2014) zeigten darüber hinaus, dass die bloße Kopfpose ein geeignetes Maß ist, um die Querungsintention eines Fußgängers abzuleiten [8]. Ebenso konnten Schmidt und Färber (2009) herausstellen, dass Fahrer am häufigsten anhand der Kopfbewegung die Querungsintention eines Fußgängers erkennen [9]. Körperbewegungen, im Sinne dynamischer Größen, wie Gehgeschwindigkeit oder Laufverhalten kennzeichnen ebenfalls eine Querungsintention. Fußgänger verlangsamen ihre Gehgeschwindigkeit und warten in der Regel am Fahrbahnrand, bis das Fahrzeug anhält [7]. Auch das Betreten der Fahrbahn und damit einhergehende charakteristische Beinstellungen werden von Fahrern genutzt, um eine Querungsintention abzuschätzen [7] [8]. Informelle Kommunikationssignale zeichnen sich durch Vagheit und einen größeren Interpretationsspielraum aus im Vergleich zu formellen Kommunikationssignalen. Allerdings sind Verkehrsteilnehmer dennoch in der Lage, auf dieser Basis zu interagieren, um mögliche Probleme und kritische Situationen zu lösen [10]. Festzuhalten ist, dass formelle und informelle Zeichen nur im Kontext verständlich sind, eine situationsindividuelle Anpassung erfordern und sich gegebenenfalls ergänzen können [4] [10].

Die Kontextabhängigkeit von Interaktionsverhalten zwischen VRUs und motorisierten Verkehrsteilnehmern wird zudem deutlich, wenn man die Fülle an Einflussfaktoren betrachtet, welche das Querungsverhalten bestimmen. Hierzu zählt zum Beispiel das Alter der Fußgänger. Schweizer, Thomas und Regli (2009) fanden heraus, dass Erwachsene meist ohne Geschwindigkeitsänderung überqueren, im Gegensatz zu Kindern, die in der Regel am Fahrbahnrand warten und zudem mehrere Sicherheitsblicke ausführen [11]. Weiterhin zeigt sich

ein Einfluss der Gruppengröße. Die Wartezeit am Fahrbahnrand verkürzt sich mit zunehmender Gruppengröße [12]. Zudem beeinflussen die Geschwindigkeit und Distanz des Fahrzeugs die Lückenakzeptanz des Fußgängers. So zeigte eine Studie Schmidt und Färber (2009), dass die Wahrscheinlichkeit, dass der Fußgänger vor dem Fahrzeug quert, umso höher war, je weiter das Fahrzeug entfernt war, unabhängig von der Geschwindigkeit [9]. Auch die Richtung des Fahrzeugs beeinflusst die Querungsentscheidung. Wenn sich das Fahrzeug von hinten nähert, werden kritischere Lücken gewählt [9]. Weitere Einflussfaktoren, wie die Infrastruktur, Wetter, Lärm, Sichtbedingungen oder Persönlichkeitseigenschaften werden in der vorliegenden Studie nicht näher betrachtet, können jedoch in einer Studie von Trimpop und Kollegen (2014) nachgelesen werden [13].

Die bisher vorgestellten Studien haben gemein, dass hier vorrangig verschiedene Formen von Straßenüberquerungen betrachtet werden (bspw. mit Verkehrsinseln oder Ampeln) und somit auch der Sicherheitsaspekt der Querung von zentraler Bedeutung ist. In der vorliegenden Studie soll demgegenüber ein Parkplatzkontext betrachtet werden, da hier ein hoher Anteil an Mischverkehr, geringe Geschwindigkeitsbereiche, wenig gesetzliche Regelung und daher verstärkt informelle Kommunikation zwischen VRUs und motorisierten Fahrzeugen zu erwarten ist. Ziel dieser explorativen Beobachtungsstudie ist die Identifizierung von (typischen) Interaktionssequenzen bei der Querung. Weiterhin sollen Parameter definiert werden, welche das Kommunikationsverhalten und damit Interaktionstypen beschreiben. Fokus der vorliegenden Studie ist zudem die Beschreibung einer möglichst komfortablen Querung aus Sicht der Beteiligten, um somit Implikation für die Interaktionsgestaltung zwischen VRUs und automatisierten Fahrzeugen ableiten zu können.

2. Methodisches Vorgehen

2.1. Datenerhebung

Das Interaktionsverhalten von Fußgängern und Kraftfahrzeugen wurde im Rahmen einer Beobachtungsstudie im realen Umfeld untersucht. Hierzu wurde ein Parkplatzgelände mit einem hohen Anteil an Mischverkehr in der Nähe der Mensa der TU Chemnitz ausgewählt (siehe Abbildung 1).

Ziel war ein möglichst unverfälschtes Interaktionsverhalten zwischen Fußgängern und Kraftfahrzeugen aufzunehmen. Die Interaktionen wurden mithilfe einer GoPro Hero 4 (HD 1920x1080, 25 FPS) aufgenommen (siehe Abbildung 2). Die Videoaufzeichnung erfolgte

über einen Zeitraum von 12 Tagen, jeweils zwischen 12.30 Uhr und 13.30 Uhr. Es konnten insgesamt 127 Interaktionssequenzen aufgezeichnet werden.



Bild 1: Parkplatzgelände aus der Vogelperspektive. Das weiße Dreieck markiert die Kameraposition.



Bild 2: Aufnahmeperspektive der Kamera

2.2. Datenaufbereitung

Für die Analyse der Interaktionssequenzen wurde ein Kategoriensystem definiert, welches das Verhalten der Fußgänger und Pkw-Fahrer auf verschiedenen Ebenen beschreibt. Für das Fußgängerverhalten wurden Oberkategorien *Gehverhalten* und *Gehgeschwindigkeit*, *Kopfbewegung*, *Stellung der Beine*, *Position des Oberkörpers*, sowie der *Arme/Hände* (vgl. [9]) gewählt (Tabelle 1). Zusätzlich zu den Kategorien des Fußgängerverhaltens wurde die Gruppengröße, die Laufrichtung, die benutzte Infrastruktur (Fußweg vs. Fahrbahn), die Be-

schäftigung mit einer Nebenaufgabe (z.B. Telefonieren), sowie das Geschlecht und das geschätzte Alter der Fußgänger erfasst.

Tabelle 1: Kategorisierung des Fußgängerverhaltens

Fußgängerverhalten	Oberkategorie	Unterkategorien
	Gehverhalten und Gehgeschwindigkeit	Konstante/reduzierte/erhöhte Gehgeschwindigkeit Anhalten Querung schräg/gerade hinter Pkw Querung schräg/gerade vor Pkw Abweichendes Verhalten Betreten der Fahrbahn
	Kopfbewegung	Nach unten In/entgegen der Gehrichtung In Richtung/entgegen PKW
	Stellung der Beine	Parallel in Warteposition Parallel gehbereit In Gehbewegung
	Position des Oberkörpers	In/entgegen der Gehrichtung In Richtung/entgegen PKW
	Bewegung der Arme/Hände	Nah am Körper Geste zum Autofahrer Hände in den Taschen

Für das Verhalten des Pkw-Fahrers als Interaktionspartner wurde die Oberkategorie *Geschwindigkeitsverhalten* gewählt (Tabelle 2). Zusätzlich wurde die Richtung aus der sich das Fahrzeug näherte, erfasst.

Tabelle 2: Kategorisierung des Verhaltens des Pkw-Fahrers

Verhalten Pkw-Fahrer	Oberkategorie	Unterkategorien
	Geschwindigkeit und Fahrverhalten	Konstante/reduzierte/erhöhte Geschwindigkeit Anhalten Ausweichen

Die Videosequenzen wurden von 2 Personen gemäß dem erarbeiteten Kategoriensystem mit der Videoannotationssoftware ELAN (<https://tla.mpi.nl/tools/tla-tools/elan/>) annotiert. Im Anschluss wurden die entstandenen Interaktionssequenzen mittels visueller Analyse zu Interaktionstypen zusammengefasst. Als Interaktion wurden diejenigen Querungssequenzen definiert, in welcher die Querungsabsicht (z.B. Kopfbewegung hin zum Pkw) und die Querung des Fußgängers bei gleichzeitiger Anwesenheit eines Pkw in relativer Nähe zum Fußgänger erkennbar ist. Es wurden nur 1:1 Interaktionen in die Analyse einbezogen. Für den Fall, dass Gruppen das Parkplatzgelände querten, wurde das Verhalten derjenigen Person annotiert, welche zuerst eine Querungsabsicht zeigte. Die Dauer der Interaktion erstreckte sich vom Zeitpunkt einer Sekunde vor der erstmals ersichtlichen Querungsabsicht bis zum Zeitpunkt, an welchem der Fußgänger die Fahrbahn des Parkplatzes vollständig überquert hatte.

3. Ergebnisse

Nach Sichtung der Daten konnten 121 Interaktionssequenzen gemäß den oben genannten Kriterien für eine Interaktion im Detail analysiert werden. Hierbei konnte festgestellt werden, dass 75 % der Personen schräg hinter dem Auto querten. In 78 % der Fälle hielten die Fußgänger ihre Gehgeschwindigkeit vor und während der Querung konstant. Bei der Analyse der Kopfbewegungen zeigte sich, dass 57 % der Fußgänger mindestens einmal den Kopf zum Auto drehten. Mit einer leichten Tendenz schauten die Fußgänger häufiger in die Richtung, aus der das Auto kam (43 %), als in die entgegengesetzte Richtung (36 %). Die Analyse der Beinstellung, die nur kurz vor beziehungsweise beim Betreten der Fahrbahn annotiert wurde, hat ergeben, dass 56 % der Fußgänger während des Verlangsamens oder beim Anhalten ihre Füße entweder parallel oder gehbereit positionierten. Die Bewegungen des Oberkörpers korrespondierten weitgehend mit der Kopfbewegung, sodass diese Oberkategorie nicht gesondert analysiert wurde. Ebenfalls wurde die Oberkategorie Bewegung der Ar-

me/Hände nicht explizit analysiert, da hier keine Besonderheiten im Kommunikationsverhalten, wie bspw. Gesten, festgestellt werden konnten. Auf Seiten des Fahrerhaltens konnte festgestellt werden, dass mehr als zwei Drittel (70 %) der Fahrer ihre Geschwindigkeit vor und während der Querung des Fußgängers konstant hielten. Es konnte weiterhin kein grundsätzlich verändertes Kommunikationsverhalten in Abhängigkeit von Geschlecht oder geschätztem Alter festgestellt werden. Es konnten drei Interaktionstypen identifiziert werden, welche sich in Bezug auf Kopfdrehungen hin zum Pkw unterscheiden. Hier ist ein unterschiedliches Maß an visueller Absicherung abzuleiten. Die Typen *hinreichend häufiges Absicherungsverhalten*, *häufiges Absicherungsverhalten* und *ohne Absicherungsverhalten* sind im Folgenden beschrieben. Eine weitere mögliche Unterscheidung kann durch die potentielle Überschneidung der Trajektorien erfolgen. Der Interaktionstyp mit hinreichend häufigem Absicherungsverhalten weist keinen Trajektorienkonflikt auf. Demgegenüber finden sich in den beiden anderen Interaktionstypen potentielle Trajektorienkonflikte, welche durch eine Verhaltensanpassung des Fahrers (z.B. Ausweichen) bzw. Fußgängers (z.B. Anhalten) kompensiert werden. Die Zuordnung der Sequenzen zu bestimmten Typen orientierte sich am Vorgehen der typenbildenden Inhaltsanalyse [16].

3.1. Interaktionstyp mit hinreichend häufigem Absicherungsverhalten

Diese Art der Interaktion stellte mit 69 % der Fälle die häufigste Form dar (83 von 121 Interaktionen). Bei dieser Interaktion näherte sich der Fußgänger mit einer konstanten Geschwindigkeit bis zu dem Punkt, an dem er überqueren mochte und ging dann ohne zu verlangsamen über die Fahrbahn. Meist wurde schräg und hinter dem Auto gequert (57 %). Da der Fußgänger währenddessen seine Geschwindigkeit nicht reduzierte, konnte auch keine Besonderheit in der Beinstellung festgestellt werden. Die Analyse der Kopfbewegungen ergab, dass vor der Überquerung einmal der Kopf in die Richtung des Pkw gedreht wurde (45 %). Der scheinbar geringe Anteil an Kopfbewegungen wird hier durch den Umstand relativiert, dass ein Großteil der Fußgänger hinter dem Fahrzeug querte. Nach dieser Bewegung ging der Kopf zumeist dann in die Ausgangsposition zurück und wurde auch während der Querung überwiegend (zu 59 %) nicht mehr bewegt. Der Autofahrer behielt zu 83 % seine Geschwindigkeit über die komplette Interaktionszeit bei. Einzelpersonen bildeten die Mehrheit dieses Interaktionstyps (71 %). Die Laufrichtung aus der sich Fußgänger näherten, als auch die genutzte Infrastruktur hatten keinen Einfluss auf den Ablauf des dieses Interaktionstyps. In Abbildung 3 ist ein schematischer Ablauf der Interaktion dargestellt (zeitbezogene Angaben, wie bspw. die Dauer der jeweiligen Kategorie werden nicht abgebildet).

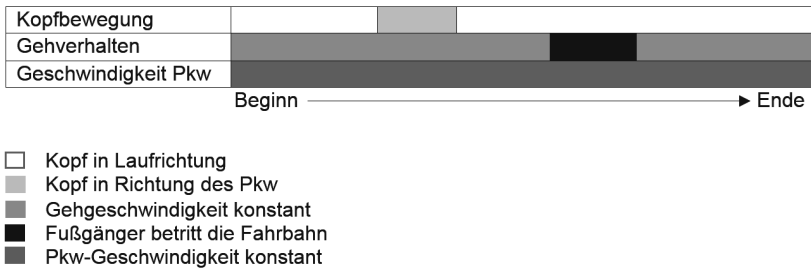


Bild 3: Beispielhafter Ablauf einer Interaktion mit hinreichend häufigen Absicherungsverhalten

In der Analyse der übrigen Interaktionen wurden Abweichungen vom Interaktionstyp mit hinreichend häufigen Absicherungsverhalten in Bezug auf das Gehverhalten und die Kopfbewegungen festgestellt. Im Folgenden werden die dabei identifizierten Interaktionstypen *häufiges Absicherungsverhalten* und *ohne Absicherungsverhalten* detaillierter beschrieben.

3.2. Interaktionstyp mit häufigem Absicherungsverhalten

Dieser Interaktionstyp zeichnete sich dadurch aus, dass die Fußgänger vor der Querung verlangsamten oder anhielten. Im Gegensatz zur Interaktion mit hinreichend häufigen Absicherungsverhalten überquerte hier etwas mehr als jeder Zweite (52 %) die Fahrbahn gerade, allerdings auch hinter dem Auto. Die Fußgänger drehten ihren Kopf vor dem Verlangsamten beziehungsweise Anhalten zu 62 % in Richtung des Autos. Während die Fußgänger verlangsamten oder anhielten, bewegten sie ihren Kopf nochmals in die eben genannte Richtung (zu 43 %). Ein Großteil der Fußgänger (71 %) betrat die Straße erst, nachdem sie ihre Geschwindigkeit reduzierten. Die Pkw-Fahrer hielten in 57 % der Fälle ihre Geschwindigkeit konstant, gefolgt von 29 % der Fälle in welchen die Pkw-Fahrer abbremsten. Diese Art der Querung stellte 17 % der Gesamtinteraktionen (21 von 121 Interaktionen) dar.

3.3. Interaktionstyp ohne Absicherungsverhalten

Dieser Interaktionstyp, welcher in 14 % (17 von 121 Interaktionen) der Fälle auftritt, ist durch eine größtenteils fehlende Kopfbewegung in Richtung des Pkw vor und während der Que-

rung, gekennzeichnet. Nur 29,41 % der Fußgänger dieses Interaktionstyps zeigen eine Kopfbewegung in Richtung Pkw, betreten dabei in der Regel jedoch gleichzeitig die Fahrbahn. Etwa die Hälfte aller Pkw-Fahrer fuhr mit einer konstanten Geschwindigkeit, der Rest der Fahrer reagierte in Form von Abbremsen oder mit einem Ausweichverhalten.

3.4. Einflussfaktoren

Gruppengröße. In den Analysen stellte sich heraus, dass 26 Mal zu zweit und 15 Mal als größere Gruppe ab drei Personen überquert wurde. Auch für Gruppen konnte festgestellt werden, dass die Gehgeschwindigkeit hier mehrheitlich konstant gehalten wurde. Auch konnte eine Abweichung in den Kopfbewegungen erst für Gruppen ab drei Personen festgestellt werden. Für diese Gruppen konnte ein gewisser Anteil von Fällen festgestellt werden, in welche keine Person der Gruppe eine Kopfbewegung zeigt. Die Pkw-Fahrer hielten ihre Geschwindigkeit hier ebenfalls größtenteils konstant.

Nebenaufgabe. In die Kategorie der Nebenaufgabe zählte beispielsweise Telefonieren, das Tragen eines Gegenstandes oder eines Babys. Insgesamt waren 13 Personen mit einer Nebenaufgabe beschäftigt, die zumeist alleine überquerten. In der Mehrzahl der Fälle lief die Querung trotz Nebenaufgabe, nach dem Interaktionstyp mit hinreichend häufigen Sicherungsverhalten ab. Anzumerken ist allerdings, dass jedoch fast ein Drittel der Personen verlangsamten oder warteten, bevor sie überquerten und dass keine der Personen den Interaktionstyp ohne Absicherungsverhalten gezeigt hat. Vor der Überquerung bewegten die Fußgänger ebenfalls ihren Kopf einmal in die Richtung des Pkw. Die Pkw-Fahrer, die überwiegend konstant durchfuhren, verlangsamten nur in 15 % der Fälle und wichen zu 8 % aus, wenn der Fußgänger anderweitig beschäftigt war.

4. Diskussion

Bei der Analyse der Interaktionssequenzen konnten drei verschiedene Interaktionstypen unterschieden werden. Der häufigste Interaktionstyp, welcher als *Interaktionstyp mit hinreichend häufigen Absicherungsverhalten* bezeichnet wurde, ist charakterisiert durch eine meist einmalige Kopfbewegung des Fußgängers hin zum Auto, gefolgt vom Betreten der Fahrbahn. Fußgänger und Pkw-Fahrer halten ihre jeweilige Geschwindigkeit konstant. Bei dieser Form der Interaktion queren die Fußgänger meist hinter dem Pkw. Die einmalige Kopfbewegung hin zum Pkw, bevor die Fahrbahn betreten wird, spricht für ein Sicherungsverhalten seitens des Fußgängers [14]. Die konstante Gehgeschwindigkeit könnte darin begründet

sein, dass der Fußgänger sowohl mit der Infrastruktur, dem üblichen Verkehrsaufkommen, als auch der Art der Querung vertraut ist. Im Fall des Interaktionstyp mit häufigem Absicherungsverhalten finden mehrere Kopfbewegungen zum Fahrzeug statt, bevor die Fahrbahn gequert wird. Zudem verlangsamen die Fußgänger vor der Querung oder bleiben am Fahrbahnrand stehen. Hier zeigt sich wahrscheinlich ein höheres Maß an Absicherungsverhalten, sodass der Fußgänger möglichst sicher sein kann, dass er gesehen wurde. Auch der Pkw-Fahrer reagiert entsprechend auf das veränderte Kommunikationsverhalten des Fußgängers und ist eher geneigt stehen zu bleiben, um eventuelle ein-eindeutige Kommunikationssignale an den Fußgänger zu übermitteln. Der Interaktionstyp ohne Absicherungsverhalten zeichnet sich durch fehlende Kopfbewegungen aus bzw. finden diese zeitgleich mit dem Betreten der Fahrbahn statt. Es findet demnach kaum bis kein Sicherungsverhalten statt und auch hier reagieren die Pkw-Fahrer auf das veränderte Kommunikationsverhalten, indem sie in erhöhtem Maß verlangsamen oder ausweichen.

Es wird deutlich, dass insbesondere die Parameter Kopfbewegung und Gehverhalten – und Geschwindigkeit die verschiedenen Interaktionstypen und Handlungsweisen der Interaktionspartner bestimmen (z.B. Ausweichen des Fahrers im Fall einer nicht erfolgten Kopfbewegung des Fußgängers vor der Querung). Dass Kopfbewegungen bzw. Blickkontakt entscheidende Merkmale einer Querungsintention sind, konnte auch Šucha (2014) feststellen [7]. Weitere Studien argumentieren, dass durch Kopfbewegungen der explizite Blickkontakt gesucht wird, damit der Fußgänger für sich selbst absichern kann, dass er gesehen wurde und somit eine gefahrlose Querung möglich ist [8]. Demgegenüber nutzen Fahrer die vom Fußgänger gezeigte Kopfbewegung, um eine Querungsintention abzuschätzen [9]. In der Studie von Schmidt und Färber (2009) war die Kopfbewegung der am häufigsten genutzte Parameter, um eine Querung vorherzusagen. Schweizer und Kollegen (2009) fanden allerdings heraus, dass die meisten Personen ein beidseitiges Blickverhalten zeigen [11]. Dieser Befund konnte im Rahmen dieser Studie nicht repliziert werden. Hier spielt vermutlich der unterschiedliche Untersuchungskontext von Straßenübergang und Parkplatz eine Rolle. Der Parkplatzkontext dieser Studie kennzeichnet sich durch einen geringen Geschwindigkeitsbereich und vergleichsweise geringes Verkehrsaufkommen aus, was beidseitige Blicke im Sinne eines erhöhten Sicherungsverhalten weniger relevant erscheinen lässt. Die Sicherungsfunktion der Kopfbewegung wird im Fall der Interaktion ohne Absicherungsverhalten besonders deutlich. Hier betritt der Fußgänger die Fahrbahn ohne vorherige Kopfdrehung zum Pkw bzw. gleichzeitig zur Kopfbewegung und provoziert dadurch ein Sicherungsverhalten auf Seiten des Pkw. Das fehlende Sicherungsverhalten des Fußgängers ist hier ein möglicher Indikator für den Zeitpunkt des Betretens der Straße [14] und impliziert zudem, dass ein

Handeln des Pkw-Fahrers nötig wird. Weiterhin können dynamische Größen des Fußgängers, wie Gehgeschwindigkeit und das Betreten der Fahrbahn als ergänzende Parameter betrachtet werden, welche die Interaktion beeinflussen. Die Bedeutung von dynamischen Größen des Fußgängers konnte ebenfalls in weiteren Studien belegt werden [9][12]. Wohingegen die Parameter Oberkörperbewegung, Bewegung der Arme/Hände als auch Gruppengröße oder Nebenaufgabe eine eher untergeordnete Rolle für den Interaktionsablauf spielen.

Im Rahmen dieser Studie wurde mittels einer explorativen Beobachtungsstudie im Realverkehr analysiert, auf welche Art und Weise Fußgänger die Fahrbahn eines Parkplatzes queren. Mittels eines Kategoriensystems, welches von zwei Personen zur Annotation genutzt wurde, sollte eine möglichst hohe Aussagekraft erzielt werden. Dennoch sind Faktoren wie die zugrunde liegende Motivation oder Persönlichkeitseigenschaften, wie etwa die Risikoneigung, nicht erfasst, was die Interpretation der Daten möglicherweise beeinflusst.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es auf einem Parkplatzkontext drei verschiedene Interaktionstypen identifiziert wurden: die Interaktion mit hinreichend häufiger Absicherung, die Interaktion mit häufigem Absicherungsverhalten und die Interaktion ohne Absicherungsverhalten. Am häufigsten findet sich Interaktion mit hinreichend häufigem Absicherungsverhalten. Es stellte sich heraus, dass die Verläufe dieser verschiedenen Typen sich primär im Gehverhalten und in der Kopfbewegung unterscheiden. In Bezug auf sensorielle Gestaltungsfragen für automatisierte Fahrzeuge lässt sich festhalten, dass die Parameter Kopfbewegung und Gehverhalten sowie – Geschwindigkeit eine sinnvolle Ergänzung zur reinen Trajektorienbestimmung des Fußgängers darstellen, welche allein nicht hinreichend sicher für die Bestimmung der Querungsintention genutzt werden kann [9].

Diese Studie konnte darüber hinaus die Komplexität der Interaktionen zwischen VRUs und motorisierten Verkehrsteilnehmern deutlich machen, als auch das menschliche Akteure unter verschiedenen Bedingungen in der Lage sind, diese Art von Kommunikationssituation in komfortabler bis gefahrloser Art und Weise zu lösen. Automatisierte Fahrzeuge stehen hier vor besonderen Herausforderungen, deren Lösung zur Akzeptanz von automatisierten Fahrzeugen beitragen kann. Daraus lässt sich schließen, dass auch automatisierte Fahrzeuge das Verhalten der schwächeren Verkehrsteilnehmer interpretieren und die Intentionen verstehen können müssen, um entsprechend situationsgerecht zu handeln [4]. In diesem Zusammenhang werden Ansätze zur Mensch-Maschine-Gestaltung diskutiert, welche VRUs

und Fahrer mit gezielten Informationen unterstützen. Zu den wichtigsten Informationen für VRUs gehören demnach, dass es sich um ein autonomes Fahrzeug handelt, wann das Fahrzeug abbremst, wann es stillsteht und wann es losfährt [15], als auch die zusätzliche Information „Ich habe dich gesehen“ [4]. Für die konkrete Übermittlung solcher Informationen an den Fußgänger sind unterschiedliche HMI-Lösungen in Diskussion (wie bspw. projizierte Fußgängerüberwege, siehe auch [15]). Diese Optionen werden in zukünftigen Studien im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms vor dem Hintergrund der hier vorgestellten Ergebnisse evaluiert.

Abschließend ist festzuhalten, dass in naher Zukunft vorallem eine Teilautomatisierung in der Fahrzeugtechnologie Einzug halten wird. In dieser Übergangszeit zur Hochautomatisierung sollte eine möglichst große Nähe des Verhaltens der teilautomatisierten Fahrzeuge zum menschlichen Verhalten erreicht werden, um eine zukünftig hohe Akzeptanz zu sichern. Vor diesem Hintergrund sind Studien zum aktuellen Realverhalten von menschlichen Akteuren besonders wichtig und können als Muster für Automatisierungsumsetzungen dienen.

Danksagung

Die hier vorgestellte Studie wird im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1835 „Kooperativ interagierende Automobile“ gefördert und ist Teil des Projektes „Kooperative Interaktion mit schwächeren Verkehrsteilnehmern im automatisierten Fahren“ (KIVI). Zudem möchten wir Luka-Franziska Bluhm für die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Studie danken.

Literatur

- [1] Anderson, J. M., Nidhi, K., Stanley, K. D., Sorensen, P., Samaras, C., & Oluwatola, O. A. (2014). Autonomous vehicle technology: A guide for policymakers. Rand Corporation.
- [2] Banks, V. A., & Stanton, N. A. (2016). Keep the driver in control: Automating automobiles of the future. *Applied ergonomics*, 53, 389-395.
- [3] Hoff, K. A., & Bashir, M. (2015). Trust in automation integrating empirical evidence on factors that influence trust. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 57(3), 407-434.

- [4] Färber, B. (2015). Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern. In *Autonomes Fahren* (pp. 127-146). Springer Berlin Heidelberg.
- [5] Hölzel, A. (2008). Unterscheidung von formeller und informeller Kommunikation im Straßenverkehr. Diplomarbeit. Wien, Österreich: Universität Wien.
- [6] Merten, K. (1977). Kommunikationsprozesse im Straßenverkehr. In: Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg) *Symposion 77*. Köln: Bundesanstalt für Straßenwesen.
- [7] Šucha, M. (2014). Pedestrians and drivers: their encounters at zebra crossings. *Fit to drive: 8th International Traffic Expert Congress*. 08. bis 09. Mai 2014, Warschau, Polen.
- [8] Kloeden, H., Brouwer, N., Ries, S., & Raschofer, R. (2014). Potenzial der Kopfposen-erkennung zur Absichtsvorhersage von Fußgängern im urbanen Verkehr. In FAS Workshop Fahrerassistenzsysteme, Walting, Deutschland.
- [9] Schmidt, S., & Färber, B. (2009). Pedestrians at the kerb—Recognising the action intentions of humans. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 12(4), 300-310.
- [10] Gasser, T. M. (2015). Grundlegende und spezielle Rechtsfragen für autonome Fahrzeuge. In M. Maurer, J.C. Gerdes, B. Lenz & H. Winner (Hrsg.), *Autonomes Fahren* (S. 543-574). Springer Berlin Heidelberg.
- [11] Schweizer, T., Thomas, C., & Regli, P. (2009). Verhalten am Fussgängerstreifen. *Zürich, Schweiz: Fussverkehr Schweiz*.
- [12] Hamed, M. M. (2001). Analysis of pedestrians' behavior at pedestrian crossings. *Safety Science*, 38(1), 63-82.
- [13] Trimpop, R., Wieker, H., Ruttke, T., Brachwitz, J., Fünfroeken, M., & Gruber, M. (2014). FRAMES—Frühwarnsystem zur adaptiven Mensch-Fahrzeug-Erkennung und *Sicherheitsförderung* (Abschlussbericht zur Projektphase I). Jena, Deutschland: FSU Jena.
- [14] Hagen, K., Schulze, C., & Schlag, B. (2012a). Interaktionen zwischen Kraftfahrzeugen und Fußgängern. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 114(9), 722-727.
- [15] Lagström, T., & Lundgren, V.M. (2015) *AVIP-Autonomous vehicles interaction with pedestrians*. Masterarbeit. Göteborg, Schweden: Chalmers University of Technology.
- [16] Kuckartz, U. (2012). *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Beltz Juventa.

Eine erweiterte Bewertungsfunktion für umfassende Trajektorienplanung auf Autobahnen

An extended cost function for comprehensive trajectory planning on highways

Dipl.-Ing. **Astrid Rupp**, Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik, Technische Universität Graz;
Dipl.-Ing. Dr. techn. **Michael Stolz**, VIRTUAL VEHICLE Kompetenzzentrum – Das virtuelle Fahrzeug Forschungsgesellschaft mbH, Graz

Kurzfassung

Die Realisierung hochautomatisierter Fahrerassistenzsysteme auf Autobahnen benötigt eine umfassende Bewegungsplanung, um ein sicheres und für die Fahrzeuginsassen komfortables Verhalten des Fahrzeuges zu gewährleisten. In der Planungsebene eines Assistenzsystems bilden Umfeldinformationen die Basis für die Berechnung möglicher Fahrzeugtrajektorien. Die Auswahl der besten Trajektorie erfolgt durch eine Bewertung, die üblicherweise Sicherheit und Komfort berücksichtigt. Durch die hier vorgeschlagene erweiterte Bewertung der Gesamtsituation bereits innerhalb der Trajektorienplanung ist es möglich, die übergeordnete Entscheidungsebene maßgeblich zu entlasten. Die umfangreiche und aufwändige Auswahl von Fahrspuren oder sogenannten „Target-Fahrzeugen“ entfällt vollkommen. Simulationen zeigen, dass eine Planung basierend auf der vorgeschlagenen Bewertung sogar mit komplexen Situationen umgehen kann, für die sie ursprünglich nicht ausgelegt wurde.

Abstract (optional)

The implementation of advanced driving assistance functions requires extensive motion planning in order to guarantee safe and comfortable maneuvers. This planning level includes the generation of a set of trajectories based on a state of the art polynomial approach. The evaluation of this set is then carried out based on a comprehensive cost function, which is the main part of this work. By choosing the cost components in the proposed way, the decision unit in the higher level has less computational load since target selection and lane selection can be omitted. Simulation studies show that the planning level can even cope with situations that it has not been designed for.

1. Einleitung

Die bisher in der Serie verwendeten Fahrerassistenzfunktionen „Adaptive Cruise Control“ (ACC) und „Lane Keeping Assist“ (LKA) benötigen keine hoch-genaue Umfelderkennung oder -interpretation, sind vergleichsweise einfach zu realisieren und müssen vom Fahrer/von der FahrerIn überwacht werden. Neue Assistenzsysteme höherer Automatisierungsstufen, wie der untersuchte Autobahnchauffeur, erfordern hingegen weit komplexere Methoden, um ohne dauerhafte Überwachung durch den Fahrer gleichzeitig die Geschwindigkeit anzupassen und den Spurwechsel durchzuführen. Diese erforderliche Komplexität des FAS wird üblicherweise in drei Planungsebenen realisiert: Navigation, Entscheidungsebene und Trajektorienplanung [1].

Zur Entlastung der aufwändigen und dadurch fehleranfälligen Fallunterscheidungen innerhalb der zweiten Ebene wird im Folgenden eine erweiterte Betrachtung in der dritten Ebene vorgeschlagen. In dieser untersten Ebene wird zuerst eine Menge an Trajektorien über einen polynomiellen Ansatz durch eine vorbestimmte Variation des lateralen Versatzes und der Fahrgeschwindigkeit generiert. Danach wird das vorgeschlagene Bewertungskriterium für alle Trajektorien berechnet und die beste Trajektorie bezüglich Sicherheit und Komfort gewählt. Der Aufbau dieser erweiterten Bewertungsfunktion, auch Kostenfunktion genannt, ist Kern dieses Beitrags.

Ziel der Trajektorienplanung mit erweiterter Kostenfunktion ist es, in möglichst vielen Fällen das Verhalten eines menschlichen Fahrers ohne zusätzlichen Regeln der darüber liegenden Ebene nachzubilden. Autonome Fahrzeuge, die dem menschlichen Fahrverhalten ähneln, dabei aber keine Fehler machen, werden in der Praxis auch auf Zuspruch stoßen.

Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut: Zunächst wird die Planungsebene beschrieben, um die notwendigen Komponenten des FAS zu verstehen. Danach wird erläutert, wie die Trajektorien generiert und das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer (VT) präzisiert werden kann. Der Hauptteil der Arbeit befasst sich mit der Auslegung der einzelnen Komponenten der umfassenden Kostenfunktion, deren Auswertung das erwünschte Verhalten bewirkt. Zuletzt werden Ergebnisse der Simulation ausgewählter Fahrscenarien diskutiert. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2. Bewegungsplanung eines Fahrerassistenzsystems

Um ein hochautomatisiertes FAS umsetzen zu können, bedarf es einer umfassenden Informationserfassung und -auswertung. Die hier verwendete Architektur des FAS ist in Bild 1 gezeigt und wurde in ähnlicher Form zum Beispiel in [1] und [2] vorgestellt.

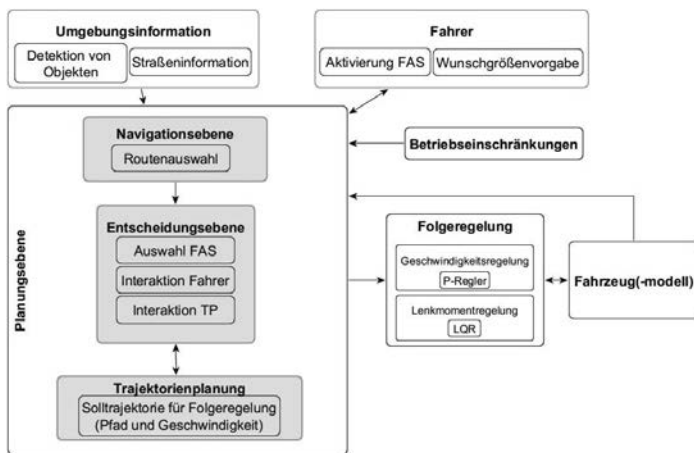


Bild 1: Architektur eines Fahrerassistenzsystems: Die Planungsebene stellt hier den Kern der Intelligenz dar.

Die Umgebungsinformation enthält Daten von Straßenkarten, die auch zur Laufzeit des Systems aktualisiert werden können, und fusioniert Informationen des Umfeldes. Für die Betrachtungen in dieser Arbeit wird vorausgesetzt, dass die Daten der Sensoren bereits entsprechend verarbeitet wurden und das System nur aktiviert werden kann, wenn alle notwendigen Bedingungen zur Funktionsausführung erfüllt sind.

Die Interaktion mit dem Fahrer ist von zentraler Bedeutung, da der Fahrer in hochautomatisierten FAS (SAE Level 3 [3]) die Rückfallebene ist. Darüberhinaus aktiviert und deaktiviert der Fahrer das System und gibt Sollwerte für Geschwindigkeit, Abstand und Routen vor. Diese Vorgaben werden vom FAS umgesetzt.

Die Routenführung und das Fahrverhalten auf der Autobahn werden in der Planungsebene definiert, die Sollgrößen für Lenkung und Geschwindigkeit werden berechnet und an die untergeordnete Folgeregelung weitergeleitet. Wie der Name schon besagt, sorgt diese dafür, dass das Fahrzeug den geplanten Sollgrößen folgt.

Es ist wichtig, die Planung so transparent wie möglich zu halten, um das System sinnvoll testen zu können. Die Planungsebene setzt sich wiederum aus drei Teilsystemen zusammen, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Die oberste Ebene ist die Navigationsebene, für die die Verwendung hochgenauer Karten und entsprechender Sensoren zur Lokalisierung des Fahrzeugs maßgeblich ist. In dieser Ebene wird die Reiseroute erzeugt. Die Navigationsebene kann vor Fahrtantritt ausgeführt

werden und muss wiederholt ausgeführt werden, wenn die Route geändert werden muss (z.B. bei Problemen im Verkehr).

Die zweite Ebene wird als Logik-Ebene oder Entscheidungsebene bezeichnet. Sie beinhaltet Abfragen zur Aktivierung des FAS und überwacht den Fahrer. Da Entscheidungen situationsbedingt getroffen werden müssen, ist diese Ebene ständig aktiv. Die übliche Umsetzung basierend auf Fallunterscheidungen ist oft sehr fehleranfällig, da gewisse Fälle unberücksichtigt bleiben.

Die Trajektorienplanung bildet die unterste Ebene der Planung. Da Querversatz und Geschwindigkeit des Fahrzeuges als Funktionen der Zeit vorgegeben werden, spricht man von Trajektorien, die dann vom Fahrzeug mit Hilfe einer Regelung eingehalten werden. Die Berechnung der besten Trajektorie teilt sich wiederum in mehrere Teile, wie in Bild 2 zu sehen ist: Zuerst wird eine Menge an Trajektorien zu unterschiedlichen Endpunkten unabhängig von anderen Verkehrsteilnehmern (VT) geplant. Gleichzeitig werden Fahrmanöver anderer Verkehrsteilnehmer prädiziert. Im nächsten Schritt wird dann die „beste“ Trajektorie aus dieser Menge unter Berücksichtigung der anderen VT ausgewählt. Im letzten Schritt wird diese dann auf Sollgrößen für die Regelung umgerechnet.

Die Auswahl der besten Trajektorie beinhaltet die „Intelligenz“ der Trajektorienplanung und ist daher umfangreich. Die einzelnen Schritte der Trajektorienplanung werden im Folgenden genauer ausgeführt.

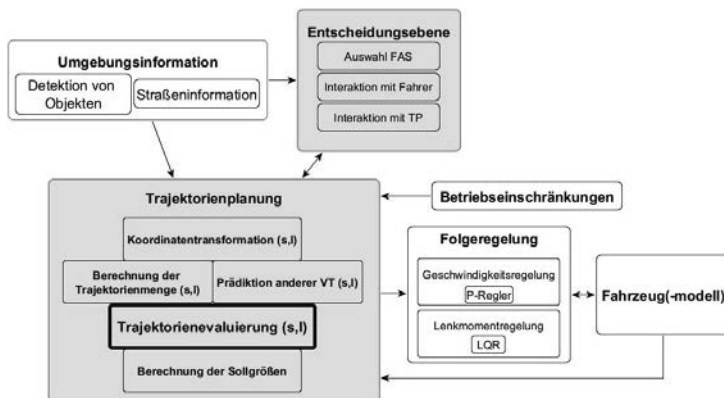


Bild 2: Architektur für die Trajektorienplanung: lokale Informationen des Umfeldes und Fahrzeugdaten sind notwendig, um eine zufriedenstellende Planung gewährleisten zu können.

3. Trajektoriengenerierung

Zunächst ist es hilfreich, eine Koordinatentransformation in Straßenkoordinaten wie in Bild 3 dargestellt durchzuführen. Werden die Sensordaten $(\Delta x, \Delta y)$ des Ego-Fahrzeuges in die lokalen Straßenkoordinaten (s, l) umgerechnet, ist es einfacher, Trajektorien entlang der Straße sowohl für das Fahrzeug selbst als auch für andere Verkehrsteilnehmer generieren zu können.

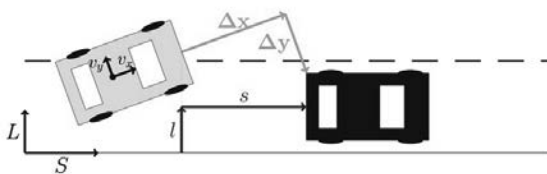


Bild 3: Koordinatensysteme zur Pfadplanung mit den globalen Straßenkoordinaten (S, L) . Die lokalen Straßenkoordinaten ausgehend vom Ego-Fahrzeug werden durch (s, l) dargestellt, während $(\Delta x, \Delta y)$ die von den Sensoren gelieferten Daten des Ego-Fahrzeuges repräsentieren.

In diesem Koordinatensystem werden dann Trajektorien für zwei Größen bestimmt: Einerseits für den lateralen Versatz l , andererseits für die Längsgeschwindigkeit $v_s = \frac{ds}{dt}$.

Die Trajektorien werden wie zum Beispiel in [4] und [5] über einen polynomiellen Ansatz über einen festgelegten Zeithorizont generiert. Für den lateralen Versatz wird dazu ein Polynom 5. Grades angesetzt, um den seitlichen Ruck zu minimieren, und man erhält

$$l(t) = C_1 t^5 + C_2 t^4 + C_3 t^3 + C_4 t^2 + C_5 t + C_6, \quad (1)$$

mit den Koeffizienten C_1, \dots, C_6 . Diese Koeffizienten werden über die Anfangs- und Endbedingungen des lateralen Versatzes und dessen ersten beiden Ableitungen berechnet. Die Anfangsbedingungen ergeben sich aus den aktuellen Werten, die Endbedingungen sind die Wunsch-Endwerte der Trajektorie. Für den lateralen Versatz fordert man, dass am Ende der Trajektorie die seitliche Geschwindigkeit und seitliche Beschleunigung null sind. Die Endpunkte des Versatzes l_f sind die zur Verfügung stehenden Fahrspurmitten, also bei zwei Fahrspuren mit Fahrspurbreite b_{spur} erhält man $l_f = \{\frac{b_{\text{spur}}}{2}, \frac{3b_{\text{spur}}}{2}\}$. Die Endzeit t_f des Polynoms wird über die vorgegebene maximale Beschleunigung $a_{l, \text{trajmax}}$ berechnet. Ähnlich wird bei den Trajektorien für die Geschwindigkeit v_s vorgegangen. Man erhält ein Polynom 4. Grades, da die Bedingungen für die Position entfallen und auf Autobahnen nur die Geschwindigkeit in s relevant ist. Für die Endpunkte der Geschwindigkeit erwies sich die

Wahl $v_f = \{v_{VT}, v_{ego}, v_{soll}, v_{min}, v_{max}\}$ als sinnvoll. Damit kann das Ego-Fahrzeug einem anderen VT mit Geschwindigkeit v_{VT} folgen, die Sollgeschwindigkeit des Fahrers v_{soll} einhalten, die minimalen und maximalen Geschwindigkeitsgrenzen v_{min}, v_{max} zur Kollisionsvermeidung ausloten oder aber die aktuelle Geschwindigkeit v_{ego} beibehalten.

Die Trajektoriengenerierung in Straßenkoordinaten (s, l) entspricht einer Planung auf geraden Straßenabschnitten. Die Krümmung der Fahrbahn kann separat über die maximale Querbeschleunigung berücksichtigt werden: diese wird für die Polynomgenerierung auf dem entsprechenden Abschnitt herabgesetzt, also $a_{l, trajmax} = a_{l, max} - a_{Straße}$, wobei $a_{l, max}$ die maximal erlaubte Querbeschleunigung des Fahrzeuges in Betrieb mit dem FAS ist und $a_{Straße}$ die Querbeschleunigung durch die Fahrbahnkrümmung bei entsprechender Geschwindigkeit darstellt.

Ein Manöver kann aus mehreren einzelnen Trajektorien bestehen. Daher werden zwei unterschiedliche Arten der Trajektorienplanung eingeführt:

- a. Manöverplanung: Diese Planung besteht aus zwei Planungszyklen. Im ersten Zyklus werden Trajektorien über einen festgelegten Zeithorizont von beispielsweise 3s berechnet, wobei n_1 Trajektorien für den Querversatz und n_v Trajektorien für die Geschwindigkeit geplant werden. Danach wird eine weitere Trajektorie über eine ebenfalls festgelegte Zeitspanne von 1.5s berechnet, wobei nur der Querversatz geändert wird. Die Geschwindigkeit wird im zweiten Zyklus als konstant angesetzt, wie in Bild 4a zu sehen ist. Dadurch ergeben sich $n_1 \cdot n_v \cdot n_1$ Trajektorien, die im Anschluss ausgewertet werden müssen. Man erhält als Gesamtrajektorien dann Überholvorgänge anstatt einfache Spurwechsel. Dies ist vor allem dann von Vorteil, wenn sich von hinten ein schnelleres Fahrzeug nähert und das Ego-Fahrzeug das vordere langsamere Fahrzeug überholen möchte. Mit dieser Betrachtung erreicht man, dass das Ego-Fahrzeug bei genügend Abstand zum schnelleren Fahrzeug überholt, weil es präzisieren kann, dass es danach die Spur wechselt und für das nachkommende Fahrzeug die Überholspur wieder freigibt.
- b. Wiederholte Planung zur Kollisionsvermeidung: wenn das Ego-Fahrzeug schnellere Manöver ausführen muss, um zum Beispiel mehreren stehenden Fahrzeugen ausweichen zu können, so ist es notwendig, mehrmals hintereinander zu planen, wie in Bild 4b gezeigt wird. Diese Zyklen weisen dann einen geringeren Zeithorizont auf. Simulationen mit einem Zeithorizont von 1.5s und drei Zyklen zeigten bereits ein viel besseres Verhalten in der Kollisionsvermeidung als die Manöverplanung. Auf mehr als drei Zyklen wurde verzichtet, um Speicherplatz zu sparen, da bei n_1 Trajektorien für den Querversatz und n_v

Trajektorien für die Geschwindigkeit mit n_z Zyklen eine Menge von $(n_l \cdot n_v)^{n_z}$ Trajektorien entsteht und für die Auswertung entsprechend viel Zeit benötigt wird.

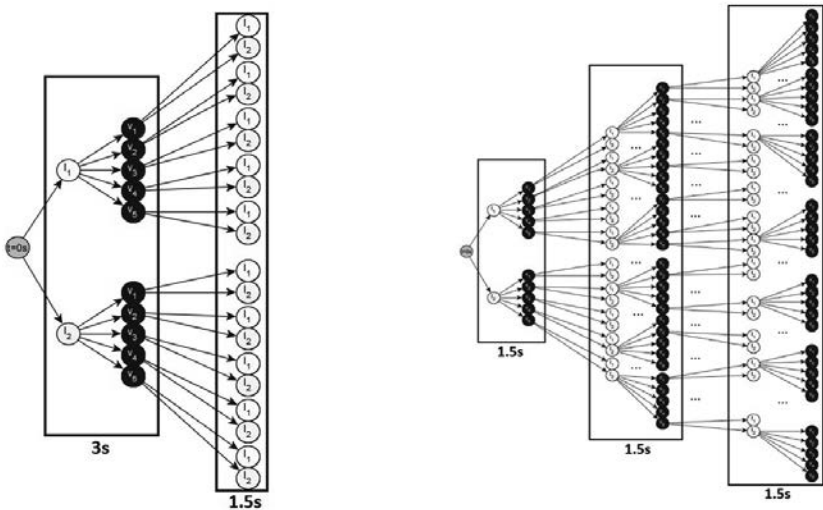


Bild 4: a) Generieren eines Manövers. hell: Polynome im seitlichen Versatz l , dunkel: Polynome in der Geschwindigkeit v_s . Einfache Trajektorien für Spurwechsel bzw. Überholmanöver können mit dieser Planung generiert werden.

b) Generieren eines Ausweichmanövers mit mehreren Planungszyklen in l und in v_s . Durch das wiederholte Planen können zum Beispiel Ausweichmanöver berechnet werden, die mit einer einfachen Manöverplanung nicht möglich sind.

Für komfortables Fahren auf Autobahnen wird die Manöverplanung bevorzugt, da sie weniger Rechen- und Speicheraufwand benötigt. Wenn alle Trajektorien der Manöverplanung in einer Kollision enden, kann die wiederholte Planung verwendet werden, die zwar mehr Rechenzeit pro Zeitschritt benötigt, schlussendlich aber besser Hindernissen ausweichen kann. Die Wahl des Zeithorizonts ist nicht trivial: Ist er zu klein, so können Kollisionen nicht rechtzeitig erkannt werden; ist er zu groß, so ist die Wahrscheinlichkeit, sehr hoch, dass die Prädiktion anderer Verkehrsteilnehmer und somit die Kollisionsbetrachtung nicht mehr stimmt. Ein Zeithorizont von 4.5s für die Gesamttrajektorie hat sich in Simulationen bewährt. In Bild 5 sind die generierten Trajektorien der Manöverplanung für das Ego-Fahrzeug dargestellt.

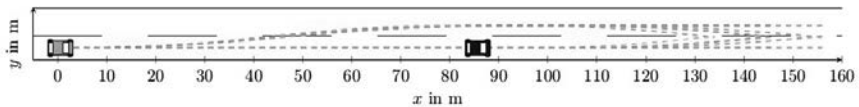


Bild 5: In der Manöverplanung generierte Trajektorien mit $n_t = 2$, $n_v = 5$.

Für die Bewertung der Trajektorien werden diese mit einer Abtastzeit T_s zeitdiskret dargestellt, um die Auswertung durchzuführen. Diese Diskretisierung erzeugt N Punkte pro Trajektorie. Je größer die Abtastzeit, desto weniger Punkte werden generiert, was Rechenzeit spart. Allerdings läuft man mit zu großer Abtastschrittweite auch Gefahr, Kollisionen oder hohe Beschleunigungen zwischen diesen Punkten in der Bewertung zu übersehen.

Das Ergebnis dieser Trajektoriengenerierung sind also zeitdiskrete Werte unterschiedlicher Trajektorien für den lateralen Versatz und die Geschwindigkeit, durch deren Kombination sehr viele Fahrmanöver auf der Autobahn abgedeckt werden können, wenn „oft genug“ neu geplant wird. Eine Neuplanung alle 10 bis 100 ms erscheint für den Autobahnassistenten sinnvoll.

4. Prädiktion anderer Verkehrsteilnehmer

Um Kollisionen in der Zukunft abschätzen zu können, muss das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer präzisiert werden. Dazu wird für diese Fahrzeuge ebenso eine Menge an Trajektorien generiert und ausgewertet, hier jedoch unter der Annahme, dass die Geschwindigkeit konstant bleibt, um Rechenleistung einzusparen. In Analogie zum Ego-Fahrzeug werden die zeitdiskreten Werte der Trajektorien mit der Abtastzeit T_s verwendet.

Die Auswertung ist ebenfalls etwas vereinfacht und berücksichtigt nur mögliche Kollisionen. Dazu wird die beste Trajektorie des Ego-Fahrzeuges aus dem letzten Zeitschritt herangezogen. Außerdem wird ein Beobachter verwendet, der die Verkehrsteilnehmer als „nicht prädictierbar“ einstuft, falls sie sich über einen gewissen Horizont hinweg nicht wie vom System prädictiert verhalten. Dann wird angenommen, dass der VT den aktuellen Querversatz beibehält, bis die Prädiktion wieder übereinstimmt.

Wenn ein Verkehrsteilnehmer blinkt, so wird der Fahrspurwechsel auf die entsprechende angezeigte Spur als Prädiktion verwendet. Führt der VT diesen Spurwechsel nicht durch, so wird er ebenfalls als „nicht prädictierbar“ eingestuft.

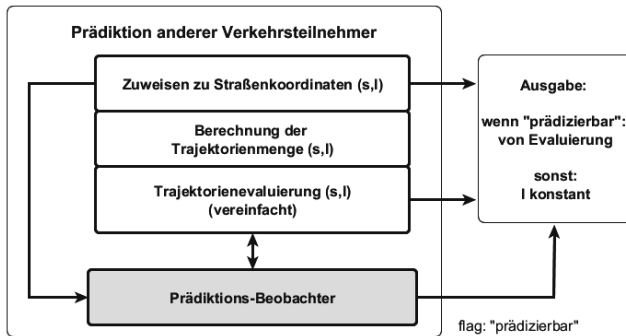


Bild 6: Schematische Darstellung der Prädiktion anderer Verkehrsteilnehmer. Der Prädiktions-Beobachter berechnet den Fehler zwischen Prädiktion und tatsächlichem Verhalten über eine gewisse Zeit. Überschreitet der Fehler einen voreingestellten Wert, wird der VT als „nicht präzifizierbar“ eingestuft.

5. Trajektorienevaluierung

Dieses Kapitel beschreibt die Auslegung der einzelnen Komponenten der Kostenfunktion. Die wichtigsten Kriterien sind Sicherheit zur Kollisionsvermeidung, Komfort zur Vermeidung hoher Beschleunigungen und Akzeptanz durch den Fahrer durch passende Wahl von Geschwindigkeit und Spur. Die Wahl der Kostenfunktion in [4] wurde hierbei als Ausgangspunkt verwendet und dann um dynamische Komponenten erweitert, siehe auch [5].

Kollisionsvermeidung

Um Kollisionen von zwei Fahrzeugen zu detektieren, werden Ellipsen berechnet, die einzuhaltende Abstände zwischen den Fahrzeugen darstellen. Sie besitzen unterschiedliche Achsenlängen, um vor bzw. hinter einem anderen Fahrzeug eine von der Geschwindigkeit abhängige Distanz vorzugeben. Die zeitdiskreten Werte der Prädiktion anderer VT werden dann mit diesen Ellipsen versehen. Wenn die Trajektorie des Ego-Fahrzeuges zum entsprechenden Zeitpunkt die Ellipse schneidet, die minimale Distanz also unterschritten wird, so wird dies in der Evaluierung als Kollision angesehen.

Die Berechnung der Ellipsen ist ein wichtiger Punkt der Evaluierung und wird nachfolgend beschrieben. Zunächst definiert man die Halbachsenlängen der Ellipsen für den Abstand in Längs- und Querrichtung wie in Bild 7.

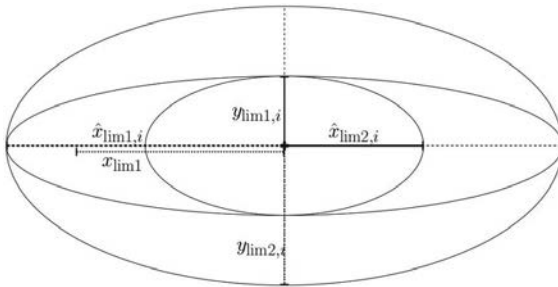


Bild 7: Ellipsen für die Kollisionsvermeidung. Zwei unterschiedliche Achsenlängen werden jeweils für Längs- und Querrichtung definiert, um die geschwindigkeitsabhängigen Distanzen einzuhalten.

Zur Berechnung der Längsachsen der Ellipse definiert man zunächst zwei Distanzen. Die erste Distanz ist unabhängig von anderen Fahrzeugen, sie hängt nur von Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeuges v_{ego} ab:

$$x_{lim1} = D + v_{ego} c_x, \quad (2)$$

wobei D die Distanz bei Stillstand und c_x einen vorgebbaren Parameter darstellt. Dies ist auch vergleichbar mit dem Abstand eines ACC Systems, wie zum Beispiel in [6] oder [7] beschrieben. Abhängig von der Relativgeschwindigkeit zum i -ten VT ergibt sich eine zusätzliche Distanz als

$$x_{lim2,i} = (v_{VT(i)} - v_{ego}) t_h, \quad (3)$$

wobei t_h der sogenannte „time headway“ ist und vom Fahrer gewählt werden kann. Für die tatsächlichen Halbachsenlängen in Längsrichtung erhält man für den i -ten VT

$$\begin{aligned} \hat{x}_{lim1,i} &= \max(x_{lim1} + x_{lim2,i}, D), \\ \hat{x}_{lim2,i} &= \max(x_{lim1} - x_{lim2,i}, D). \end{aligned} \quad (4)$$

Für die Querachse der Ellipse, die den seitlichen Abstand darstellt, berechnet sich eine Halbachsenlänge über

$$y_{lim1,i} = \frac{b_{ego} + b_{VT(i)}}{2} + d_{min}, \quad (5)$$

wobei b_{ego} und $b_{VT(i)}$ die Fahrzeugbreite des Ego-Fahrzeuges und des i -ten Verkehrsteilnehmers darstellen und d_{min} der minimale seitliche Abstand ist. Diese Berechnung folgt aus der Positionsbetrachtung beider Fahrzeuge im Schwerpunkt.

Da das Überholen auf der rechten Spur in Europa in der Regel verboten ist, wird die Ellipse auf der rechten Seite eines langsameren Fahrzeuges über alle rechten Fahrspuren erweitert durch

$$y_{\text{lim}2,i} = N_{\text{spur}} \cdot b_{\text{spur}}, \quad (6)$$

also Anzahl der Fahrspuren N_{spur} multipliziert mit der Spurbreite b_{spur} .

Dies verhindert das Überholen eines Fahrzeuges nicht nur auf der nächsten, sondern auf allen rechten Fahrspuren. Will man nur das Überholen auf der angrenzenden rechten Spur verbieten, so kann man hier $y_{\text{lim}2,i} = y_{\text{lim}1,i} + b_{\text{spur}}$ wählen. Für Kolonnenverkehr gilt dieses Verbot nicht und man setzt $y_{\text{lim}2,i} = y_{\text{lim}1,i}$. Diese Information wird in der Regel von übergeordneten Ebenen vorgegeben.

Die Achsenlängen werden dann um den Faktor c skaliert,

$$\sigma_{xj,i} = \frac{\hat{x}_{\text{lim}j,i}}{\frac{1}{c} - 1}, \quad \sigma_{yj,i} = \frac{y_{\text{lim}j,i}}{\frac{1}{c} - 1}. \quad (7)$$

Für die Kollisionsvermeidung eines Fahrzeuges werden nun die Ellipsengleichungen herangezogen, um den Wert $g_{k,i} = f(\sigma_{xk,i}, \sigma_{yk,i})$ zu berechnen, wobei

$$f(\sigma_x, \sigma_y) = \sqrt{\frac{\Delta x^2}{\sigma_x^2} + \frac{\Delta y^2}{\sigma_y^2}} \quad (8)$$

gilt mit den Abständen Δx und Δy zwischen Trajektorienpunkt des Ego-Fahrzeuges und Trajektorienpunkt des i -ten VT. Die Werte $g_{k,i}$ dieser Berechnung geben Auskunft darüber, ob sich der Punkt $(\Delta x, \Delta y)$ außerhalb oder innerhalb der Ellipse befindet. Diese werden dann ebenso skaliert zu $\hat{g}_{k,i} = \frac{1}{1+g_{k,i}}$. Überschreitet $\hat{g}_{k,i}$ den Faktor c , so bedeutet dies, dass der Punkt innerhalb der Ellipse ist und damit die minimale Distanz unterschritten wurde. Um die unterschiedlichen Ellipsen richtig auswerten zu können, wird der Wert für die Bewertung über eine Schalfunktion der Art

$$p(\Delta x_i) = \frac{1}{1 + e^{-\beta \Delta x_i}} \hat{g}_{1,i} + \frac{1}{1 + e^{\beta \Delta x_i}} \hat{g}_{2,i} \quad (9)$$

mit dem Parameter β verwendet, wie in [5] beschrieben.

Je nach Relativposition und Relativgeschwindigkeit wird zwischen den Ellipsen mit unterschiedlichen Achsenlängen geschaltet. Ist das andere Fahrzeug schneller als das Ego-Fahrzeug, so können die Spuren neben diesem Fahrzeug befahren werden. Ist das Fahrzeug allerdings langsamer, so darf es rechts nicht überholt werden. Zusätzlich wird noch überprüft, ob sich das andere Fahrzeug vor oder hinter dem Ego-Fahrzeug befindet, um die passende Längsachse für die Ellipse zu finden. Dadurch ergibt sich folgende Berechnung:

$$p(\Delta y_i) = \begin{cases} p(\Delta x_i) & \text{wenn } v_{ego} - v_{VT(i)} \leq 0 \\ \frac{1}{1 + e^{-\beta \Delta y_i}} \hat{g}_{1,i} + \frac{1}{1 + e^{\beta \Delta y_i}} \hat{g}_{3,i} & \text{wenn } v_{ego} - v_{VT(i)} > 0 \text{ und } \Delta x_i > 0 \\ \frac{1}{1 + e^{-\beta \Delta y_i}} \hat{g}_{2,i} + \frac{1}{1 + e^{\beta \Delta y_i}} \hat{g}_{4,i} & \text{wenn } v_{ego} - v_{VT(i)} > 0 \text{ und } \Delta x_i \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

Die unterschiedlichen Ellipsen für die Kollisionsvermeidung in unterschiedlichen Situationen sind in Bild 8 dargestellt.

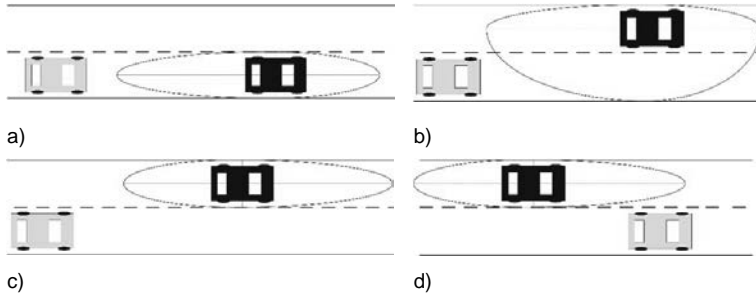


Bild 8: Ellipsenberechnung in unterschiedlichen Situationen. a) Das langsamere Fahrzeug kann links überholt werden. b) Langsamere Fahrzeuge dürfen nicht rechts überholt werden, daher wird auch die erste Fahrspur durch die Ellipse abgedeckt. c) und d) Die Querachsen der Ellipsen für schnellere Fahrzeuge sind gleich groß, da ein Überholen auf der rechten Fahrspur ohnehin ausgeschlossen ist.

Für die Berechnung der Kosten wird nun noch eine Gewichtung eingeführt, um Fahrzeuge vor dem Ego-Fahrzeug stärker zu gewichten als Fahrzeuge dahinter:

$$w_{k,i} = \begin{cases} 0.1 k_{\text{Kollision},i} & \text{wenn VT } i \text{ hinter Egofahrzeug} \\ 1 & \text{wenn VT } i \text{ vor Egofahrzeug} \end{cases} \quad (11)$$

wobei $k_{\text{Kollision},i}$ den Zeitpunkt darstellt, an dem die Trajektorie erstmalig innerhalb der relevanten Ellipse des i -ten VT ist. Schlussendlich berechnen sich die Kosten für einen VT zu

$$f_{VT,i} = \begin{cases} w_{k,i} \cdot \frac{M_i}{c} & \text{wenn } M_i < c \text{ (keine Kollision),} \\ \alpha + \left| w_{k,i} \cdot \frac{(M_i + M_{yi})}{c} \cdot v_{\text{Kollision},i} \right| & \text{wenn } M_i > c \text{ (Kollision),} \end{cases} \quad (12)$$

mit $M_{xi} = \max_h p(\Delta x_i)$, $M_{yi} = \max_h p(\Delta y_i)$, $M_i = \max(M_{xi}, M_{yi})$ und der Relativgeschwindigkeit $v_{\text{Kollision},i}$ der beiden Fahrzeuge zum Zeitschritt $k_{\text{Kollision},i}$. $h \in T_{\text{pred}}$ beschreibt die Zeitpunkte der abgetasteten Trajektorie, mit $T_{\text{pred}} = \{0, T_s, 2T_s, \dots, NT_s\}$.

Die Gesamtkosten zur Kollisionsvermeidung sind dann die über alle Verkehrsteilnehmer aufsummierten Kollisionskosten,

$$f_o = \sum_{i \in N_o} f_{VT,i}, \quad (13)$$

mit N_o der Menge der von den Sensoren detektierten Verkehrsteilnehmer. Der Hauptvorteil dieser Kosten zur Kollisionsvermeidung liegt darin, dass auch bei unvermeidbaren Kollisionen das Manöver mit dem geringsten Schaden gewählt werden kann. In [5] werden die Kosten auf einen sehr hohen Wert gesetzt, unabhängig von der Geschwindigkeit oder dem Zeitpunkt. Dies wäre allerdings eine starke Einschränkung, da das Fahrzeug somit sehr zurückhaltend plant. In Simulationen wurde dieses Verhalten als nicht zufriedenstellend empfunden.

Geschwindigkeit

Die Kosten für das Erreichen der Wunschgeschwindigkeit, die von einer übergeordneten Ebene oder durch den Fahrer vorgegeben wird, werden berechnet als

$$f_{v_f} = \frac{|v_f - v_{soll}|}{v_{max}}. \quad (14)$$

Diese Kosten beschreiben nur das Erreichen der Geschwindigkeit am Ende der Trajektorie. Zusätzlich ist aber auch die Dauer interessant, die benötigt wird, um die Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Daher wird eine dynamische Komponente der Form

$$f_{v,dyn} = \sum_{h \in T_{pred}} (|v_h - v_{soll}| > tol_v) \quad (15)$$

addiert und man erhält als Gesamtkosten für die Geschwindigkeit

$$f_v = f_{v_f} + w_{v,dyn} \cdot f_{v,dyn}. \quad (16)$$

mit dem Gewichtungspareter $w_{v,dyn}$ und der Geschwindigkeitstoleranz tol_v .

Spurwahl

Analog zu den Geschwindigkeitskosten wird unterschieden zwischen statischen (End-)Kosten und dynamischen Kosten, die das schnelle Erreichen der Wunschvorgabe begünstigen,

$$f_{l,f} = \frac{|l_f - l_{soll}|}{b_{spur}}, \quad f_{l,dyn} = \sum_{h \in T_{pred}} (|l_h - l_{soll}| > tol_l). \quad (17)$$

Werden pro Fahrspur mehrere Endpunkte generiert, so soll die Fahrspurmitte bevorzugt werden. Dies erhält man durch

$$f_{center} = 1 - \frac{\left| \cos \left(\frac{2\pi \cdot (2l_f - b_{spur} \cdot (N_{spur} - 1))}{2b_{spur}} \right) - 1 \right|}{2}. \quad (18)$$

Das Planen mehrerer Endpunkte pro Spur ist durchaus von Interesse, zum Beispiel zur Kollisionsvermeidung bei Unfällen oder wenn auf der Nebenspur ein sehr breiter Lastwagen fährt und etwas mehr Abstand innerhalb der eigenen Spur eingehalten werden soll.

Zusammenfassend erhält man für die Bewertung der Fahrspur

$$f_{\text{spur}} = f_{l,f} + w_{l,\text{dyn}} f_{l,\text{dyn}} + w_c f_{\text{center}} \quad (19)$$

mit den Gewichtungparametern $w_{l,\text{dyn}}, w_c$.

Beschleunigung

Langsame, komfortable Manöver sind zu bevorzugen, daher wird die Beschleunigung einer Trajektorie sowohl in Längs- als auch in Querrichtung gewertet über

$$f_{\text{stat},l} = \sum_{h \in T_{\text{pred}}} \frac{|a_{l,h}|}{a_{l,\text{max}}}, \quad f_{\text{stat},s} = \sum_{h \in T_{\text{pred}}} \frac{|a_{s,h}|}{a_{s,\text{max}}}. \quad (20)$$

Die Gewichtung dieser Manöver w_{stat} wird angepasst, wenn das Ego-Fahrzeug sich einordnen oder anderen Fahrzeugen ausweichen muss, also

$$w_{\text{stat},l} = w_{\text{stat}} + \max_h a_{s,h} \cdot (1 - \text{flag}), \quad (21)$$

wobei flag von einer übergeordneten Ebene vorgegeben wird.

Gesamt erhält man für diese Kosten

$$f_{\text{stat}} = w_{\text{stat},l} f_{\text{stat},l} + f_{\text{stat}} \quad (22)$$

mit dem Gewichtungparameter $w_{\text{stat},l}$.

Filter

Damit die Kosten zwischen 0 (keine Kosten) und 1 (maximale Kosten) liegen, wird die Funktion

$$J = \tanh\left(\alpha(w_o f_o + w_v f_v + w_{\text{spur}} f_{\text{spur}} + w_{\text{stat}} f_{\text{stat}})\right) \quad (23)$$

mit Gewichtungen $w_o, w_v, w_{\text{spur}}, w_{\text{stat}}$ und dem Skalierungsfaktor α verwendet, um die Kosten auf sinnvolle Werte abzubilden.

Um schnelles Schalten zwischen Trajektorien zu vermeiden, wird ein Filter

$$\hat{J}_k = \hat{J}_{k-1} + \frac{(J - \hat{J}_{k-1})T_s}{\tau_f} \quad (24)$$

mit Zeitkonstante τ_f verwendet.

Schlussendlich erhält man die beste Trajektorie für das Ego-Fahrzeug durch Vergleich der Kosten. Für die Regelung wird nun der erste Teil dieser Trajektorie verwendet bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Planung erneut aktiv wird. In Bild 9 sind die generierten Trajektorien gestrichelt dargestellt, die beste Trajektorie des Ego-Fahrzeugs und die prädiizierte Trajekto-

rie des anderen durchgezogen. Die Ellipse zur Kollisionsvermeidung des anderen VT ist ebenfalls abgebildet.

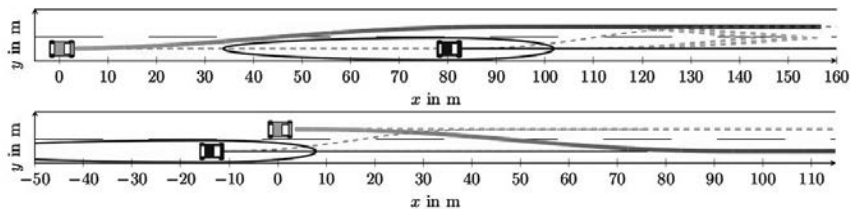


Bild 9: Die generierten Trajektorien (gestrichelt) und die Ellipse um den anderen VT werden in der Evaluierung verwendet, um die besten Trajektorien für die Fahrzeuge (durchgezogen) zu berechnen.

6. Untersuchte Fahrscenarien

Um diese erweiterte Bewertung zu testen, wurden mehrere mögliche Szenarien auf Autobahnen ausgewählt.

Überholmanöver

Hier wurden unterschiedliche Startbedingungen und Sollwerte für die Fahrzeuge gewählt. Zunächst wurde nur das Überholen eines einzigen Fahrzeuges ohne weiteren Verkehr betrachtet. Bei einem einfachen Überholmanöver erhöhen sich die Kosten durch (12) signifikant, sobald die Ellipse des vorderen VT zu irgendeinem Zeitpunkt in T_{pred} geschnitten wird. Daher wird die Spur gewechselt, um die Wunschgeschwindigkeit beizubehalten. Nähert sich ein zusätzliches Fahrzeug von hinten, wird je nach Abstand und Relativgeschwindigkeit des hinteren Fahrzeuges das vordere Fahrzeug überholt oder nicht. Die Gewichtung für ein Fahrzeug, das weit hinter dem Ego-Fahrzeug liegt, ist niedriger als die des Vorderfahrzeuges, damit das Ego-Fahrzeug nicht allzu zurückhaltend fährt. Dies entspricht eher dem Fahrverhalten eines Menschen. Würde das FAS hier warten, so könnte der Fahrer ungeduldig werden und das Assistenzsystem wird nicht akzeptiert.

Einordnen

Wenn die Navigationsebene das Einordnen auf eine gewisse Spur fordert, so wird diese Information an die Trajektorienplanung weitergegeben. In der Evaluierung werden dann Gewichtungen in (19) geändert, um die entsprechende Spur bei nächster Gelegenheit erreichen zu können. Gegebenenfalls können auch die Ellipsenachsen angepasst werden, da gerade bei starkem Verkehrsaufkommen der Abstand zwischen den Fahrzeugen sehr gering ist.

Kollisionsvermeidung (Parcours)

Um Kollisionen mit stehenden Fahrzeugen vermeiden zu können, wird das wiederholte Planen aktiviert. Diese wird aktiviert, wenn die einfache Manöverplanung keine kollisionsfreie Trajektorie liefern kann.

ACC-Ersatz

Die Auswahl des „Targets“ für den „Following“-Modus eines ACC-Systems wie in [7] entfällt, wenn die Trajektorienplanung für das Einstellen der Längsgeschwindigkeit zuständig ist. Dazu wird die Trajektoriengenerierung auf die derzeitige Spur eingeschränkt. Die Entscheidungsebene enthält dann weniger Abfragen, wodurch die Fehleranfälligkeit in der Logik-Ebene deutlich sinkt.

Unpräzizable Situationen

Wenn ein VT nicht präzizable ist, da er beispielsweise in der Fahrbahnmitte fährt, soll das Ego-Fahrzeug hinter diesem Fahrzeug mit ausreichendem Abstand nachfahren. Ohne den Beobachter für andere VT würde das Ego-Fahrzeug erst relativ spät auf diese Situation reagieren, da die Prädiktion des anderen VT nicht stimmt.

7. Simulationsergebnisse in MATLAB/Simulink mit IPG CarMaker

Die oben beschriebenen Fahrscenarien wurden mit IPG CarMaker ® [8] getestet und die Ergebnisse werden hier kurz vorgestellt. Die Parameter wurden so gewählt, dass die im Lastenheft des Fahrerassistenzsystems definierten Abstände und Beschränkungen eingehalten werden. Die Gewichtungen wurden so gewählt, dass die Kollisionen höchste Priorität besitzen, gefolgt von Geschwindigkeit und Fahrspur. Die Kosten für die Beschleunigungen haben die niedrigste Priorität und somit die kleinste Gewichtung.

Überholmanöver auf der Autobahn

Das Ego-Fahrzeug überholt ein anderes Fahrzeug und reiht sich dann wieder auf der rechten Spur ein, wie in Bild 10a zu sehen ist. Die Wunschgeschwindigkeit wird nach kurzer Zeit erreicht, wie man durch die Kosten für die Geschwindigkeit in Bild 10b erkennen kann. Die Kosten für die Spurwahl sind beim dritten Zeitschritt am größten, da sich das Fahrzeug nicht auf der rechten Spur befindet und durch den dynamischen Anteil auch die nächsten Sekunden auf der linken Spur bestraft werden. Die statischen Kosten sind beim Beschleunigen (a_s) und direkt vor dem Spurwechsel (a_1) am größten.

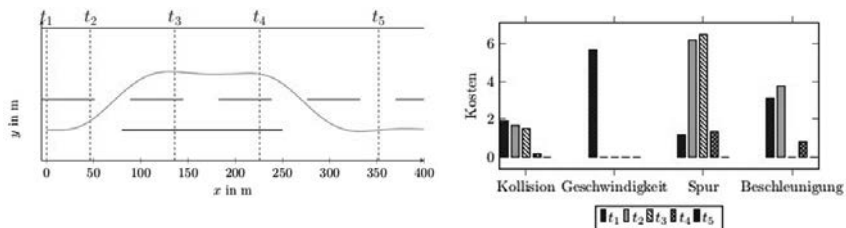


Bild 10 a) Überholmanöver auf der Autobahn mit $v_{ego} = 130 \text{ km/h}$ und $v_{VT(1)} = 100 \text{ km/h}$. Der zurückgelegte Weg des überholenden Ego-Fahrzeugs und des VT sind durchgezogen dargestellt. Die Zeitpunkte für die Kostenbetrachtung sind strichliert eingezeichnet.

b) Kosten der besten Trajektorie zu den unterschiedlichen Zeiten während dem links dargestellten Überholmanöver.

Einordnen

Wenn das Ego-Fahrzeug sich einordnen muss, wird dies von übergeordneten Ebenen angefordert und Parameter in der Evaluierung werden angepasst. In Bild 11 ist das Einordnen mit angepassten Parametern dargestellt und zeigt, dass die Bewertung auch in diesen Situationen herangezogen werden kann.

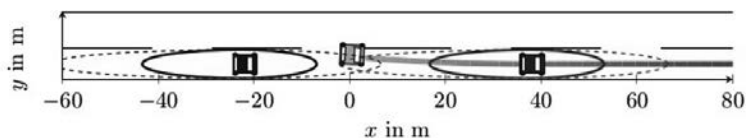


Bild 11: Beim Einordnen kann vorübergehend die Ellipse angepasst werden, um kurzzeitig geringere Abstände zu erlauben. In dieser Abbildung werden die Achsenlängen in Längsrichtung halbiert (durchgezogen dargestellt), da ohne diese Skalierung (strichliert) kein Einordnen möglich wäre. Das Ego-Fahrzeug kann so eine Position einnehmen, die genau zwischen den beiden Fahrzeugen liegt.

ACC – Ersatz

Verwendet man die Trajektorienplanung anstatt des ACC Systems, so erhält man je nach Parameterwahl ähnliche Ergebnisse, ohne dabei ein vorausfahrendes Fahrzeug als Zielfahrzeug auszuwählen. In diesem Fall wurden die Parameter nicht angepasst. Man sieht in Bild

12, dass ein Standard-ACC-System konservativer fahren würde. Die minimal einzuhaltende Distanz ist von der aktuellen Geschwindigkeit abhängig und dadurch leicht unterschiedlich, wird aber eingehalten, ohne diese Distanz zu unterschreiten.

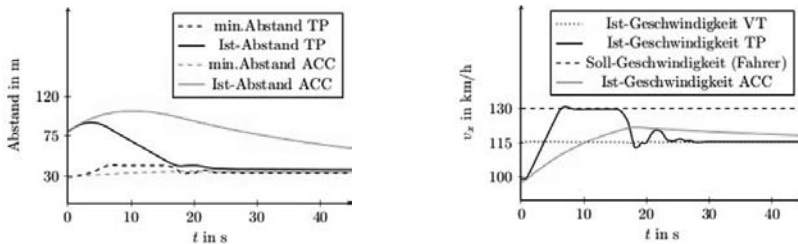


Bild 12 a) Vergleich des eingehaltenen Abstandes mit ACC und mit dem neuen FAS

b) Vergleich der Geschwindigkeiten mit ACC und mit dem neuen FAS

Wiederholtes Planen zur Kollisionsvermeidung

Da beim wiederholten Planen unterschiedliche Trajektoriensegmente aneinandergereiht werden, ist es nun möglich, zwei versetzt stehenden Fahrzeugen auszuweichen. Damit das Fahrzeug schneller reagieren kann, wird die beste Trajektorie schneller übernommen, indem die Filterkonstante τ_f in (24) für die Kostenfunktion angepasst wird.

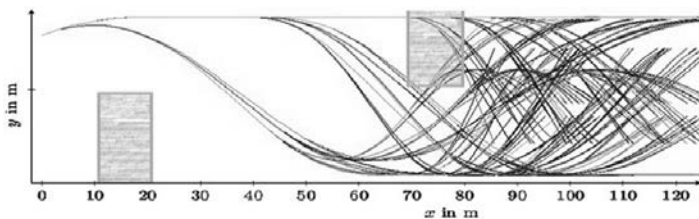


Bild 13: Wiederholtes Planen mit 3 Zyklen für Ausweichmanöver resultiert in einer größeren Menge an Trajektorien. Die grau hinterlegten Bereiche werden durch andere VT belegt und führen zu Kollisionen.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Bewertungsfunktion für Trajektorien ermöglicht es dem FAS, unterschiedlichste Szenarien zu meistern, wobei Komfort und Sicherheit gewährleistet werden. Die Berücksichtigung mehrerer Komponenten in der Bewertung zeigt in Simulationen vielversprechende Ergebnisse in unterschiedlichsten Szenarien. Zusätzlich können Parameter so ge-

wählt werden, dass das Verhalten nicht zu konservativ ist, was die Akzeptanz des Fahrers fördern kann. Die Trajektorienplanung kann existierende Assistenzsysteme wie ACC durch entsprechende Anpassung der Parameter ersetzen. In Zukunft soll das Einordnen bei Fahrspurveränderungen oder Auf- und Abfahrten bei höherem Verkehrsaufkommen genauer betrachtet werden.

Förderhinweis

Diese Arbeit entstand am VIRTUAL VEHICLE Research Center in Graz, Österreich. Die Autoren bedanken sich für die Förderung im Rahmen des COMET K2 - Competence Centers for Excellent Technologies Programms des Österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), des Österreichischen Bundesministeriums für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (bmfwf), der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG), des Landes Steiermark sowie der Steirischen Wirtschaftsförderung (SFG).

Ebenfalls danken sie den unterstützenden Firmen und Projektpartnern AVL LIST GmbH und MAGNA STEYR Engineering AG & Co KG sowie dem Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Graz.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Ferguson, T. Howard und M. Likhachev, „Motion Planning in Urban Environments: Part I,“ in *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, IEEE, 2008, pp. 1063-1069.
- [2] D. Gonzalez, J. Perez, V. Milanés und F. Nashashibi, „A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles,“ *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1135-1145, April 2016.
- [3] „Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems (SAE Standard J3016_201401),“ SAE International, United States, 2014.
- [4] R. Hult, „Path Planning for Highly Automated Vehicles,“ Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2013.
- [5] M. Werling, J. Ziegler, S. Kammel und S. Thrun, „Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a frenet frame,“ in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Anchorage, Alaska, USA, IEEE, 2010, pp. 987--993.

- [6] R. Rajamani und S. Shladover, „An experimental comparative study of autonomous and co-operative vehicle-follower control systems,“ in *Transportation Research Part C 9*, Elsevier Science Lt, 2001.
- [7] N. Benalie, W. Pananurak, S. Thanok und M. Parnichkun, „Improvement of adaptive cruise control system based on speed characteristics and time headway,“ in *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2009, pp. 2403-2408.
- [8] „IPG: CarMaker,“ IPG, [Online]. Available: <http://ipg.de/de/simulation-software/carmaker/>. [Zugriff am 23. August 2016].

Methodische Definition von sicherem Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge

Ganzheitliche Bewertung von Verhaltensspezifikationen auf Basis von abstrakten Szenarien

David Wittmann, M. Sc., Dr.-Ing. **Frank Diermeyer**,
Technische Universität München;
Cheng Wang, AUDI AG, Ingolstadt

Kurzfassung

Es wird ein methodisches Vorgehen und dazu benötigte Beschreibungsmittel vorgestellt, um in der Entwurfsphase von hochautomatisierten Fahrzeugen Anpassungen effizient bewerten zu können. Die grundlegenden, entwurfsrelevanten Bestandteile, wie Szenarien, Systemgrenzen und Systemverhalten werden mit Hilfe einer formalen Szenarienbeschreibungssprache abgebildet. Die Integration von Bewertungsmodellen der Faktoren Sicherheit, Kundennutzen und Kosten erlaubt eine effiziente Abschätzung der Auswirkungen von Systemauslegungen. Das Vorgehen wird mit einem Beispiel aus der Bewertung einer autonomen Autobahnfunktion veranschaulicht.

Abstract

A methodical approach and description tools for the efficient assessment of variable specifications of automated vehicles during the development process are presented. Crucial Parts such as scenarios, system boundaries and behavior are modeled based on a formal description of relevant scenario aspects. Through the integration of assessment models for safety, customer benefit and costs the influence of design decision can be estimated efficiently. Exemplary assessment results of an autonomous highway system illustrate the approach.

1. Einleitung

Ab dem Automationsgrad Level 3 (Hochautomatisiert nach [1]) gibt es Situationen, in denen sich der Fahrer vollständig aus der Fahraufgabe zurückziehen kann. Daraus lassen sich zwei wichtige Aspekte ableiten. Einerseits steigen durch die fehlende Fahrerüberwachung die Sicherheitsanforderungen an das System, andererseits kann jetzt aktiv das gesamte Verhalten des Fahrzeugs durch das automatisierte Fahrsystem bestimmt werden. Dementsprechend können durch eine entsprechende Konzeption des Fahrverhaltens der hochautomatisierten Funktionen potentiell riskante Verkehrssituationen deeskaliert oder vermieden werden.

Dadurch ergeben sich neue Herausforderungen bei der Entwicklung solcher Systeme. Im Gegensatz zu klassischen Fahrerassistenzsystemen muss das Verhalten im hochautomatisierten Zustand nicht mehr primär am Fahrer, sondern an der umgebenden Verkehrssituation ausgerichtet werden. Es ergibt sich eine Komplexitätssteigerung aufgrund der unendlichen Anzahl an möglichen Situationen. Einerseits bei der Bewertung von unterschiedlichen Verhaltensweisen in der Konzeptphase als auch bei der Handhabung der komplexen Zusammenhänge zwischen Systemausprägung und Auswirkungen auf die Situationen.

Das Ziel der hier vorgestellten Methodik ist die Spezifikation des hochautomatisierten Fahrverhaltens vor dem Hintergrund der Szenarienvielfalt zu unterstützen und eine ganzheitliche Bewertung dieses Verhaltens während der Entwicklung zu ermöglichen. Dabei müssen teils widersprüchliche Anforderungen an das Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge berücksichtigt werden. Primär muss das System entsprechende Sicherheitsanforderungen erfüllen und sowohl im Normal- als auch im Fehlerfall ausreichend sicher sein. Dem gegenüber muss der verbleibende Kundennutzen gestellt werden, der durch übervorsichtiges Verhalten oder häufige Übernahmeaufforderungen geschmälert wird. Außerdem spielen auch rechtliche Aspekte und der benötigte technische Aufwand eine entscheidende Rolle.

In diesem Beitrag wird zunächst in Abschnitt 2 die relevante Literatur zu den wichtigsten Bestandteilen der Methodik vorgestellt. In der selben Reihenfolge wird dann zunächst die vorgeschlagene Methodik dargestellt (Abschnitt 3), bevor in den Teilen 4 und 5 die Beschreibungsmittel für Szenarien und Systemspezifikation vorgestellt werden. In Abschnitt 6 wird kurz auf die notwendige Bewertung der Spezifikation eingegangen bevor das Konzept zur umfangreichen exemplarischen Umsetzung dargestellt und ein Ausblick gegeben wird.

2. Stand der Technik

Die bisher etablierten Fahrerassistenzentwicklungsmethoden haben hauptsächlich den Fahrer im Fokus, wie beispielsweise der Response3 Code of Practice [2]. Dabei wird der gesamte Funktionsentwurf in erster Linie am Fahrer ausgerichtet. Das eigentliche Funktionsverhalten ohne Fahrerinteraktion wird dementsprechend knapp behandelt. Bei der Sicherheitsbewertung aus Sicht der funktionalen Sicherheit nach ISO 26262 [3] wird das nominale Funktionsverhalten explizit ausgeschlossen. Dementsprechend stellen sich im Hinblick auf hochautomatisierte Funktionen vor allem die Frage, wie das Funktionsverhalten unter Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten spezifiziert werden kann.

Für die Entwicklung sicherer, komplexer Systeme ist eine frühzeitige Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten unerlässlich [4]. Gerade bei der Auslegung sicherer automatisierter Fahrzeuge ist dementsprechend eine durchgängige und ganzheitliche Sicherheitsbewertung

notwendig. Aufgrund des großen Einflusses des Systemverhaltens auf die Sicherheitsbewertung wird nach ISO 26262 auf einer bereits definierten Sollfunktion aufgesetzt und lediglich funktionale Fehler betrachtet. Da aber auch die Bewertung im Sinne der funktionalen Sicherheit einen Einfluss auf die Verhaltensspezifikation haben und damit zu potentiellen Anpassungen während der Entwicklung führen kann, führt eine getrennte Betrachtung von Sollverhalten und funktionalen Fehlern zu erhöhtem Aufwand bei der iterativen Verbesserung der Funktionsspezifikation.

Als Grundlage für eine nachvollziehbare Bewertung der Sicherheit und anderer Aspekte eines automatisierten Fahrsystems werden Verkehrssituationen benötigt. Diese werden bisher meist informell beschrieben und in Katalogen gesammelt. Dabei werden häufig auch unterschiedliche Kataloge für unterschiedliche Entwicklungsphasen, Perspektiven oder Komponenten angelegt. Es gibt bereits Ansätze, mit Hilfe von formaleren Szenarienbeschreibungen die Entwicklung zu verbessern. Bengler et al. präsentieren eine klare Checklistenstruktur zur Szenarienerstellung, um eine einheitlichen Dokumentation und damit besserer Austauschbarkeit von Entwicklungsergebnissen zu ermöglichen [5]. Domsch schlägt vor, die Entwicklung anhand weniger, klar definierter Referenzsituationen durchzuführen um die Durchgängigkeit zu erhöhen [6]. Allerdings wird dadurch kein Beitrag zur Beherrschung der Szenarienvielfalt geleistet. Um ein einheitliches Verständnis für die verwendeten Begriffe zu schaffen und die Bestandteile von Szenarien zu definieren sind die Arbeiten von Ulbrich [7] aufbauend auf Geyer [8] zu nennen. Als einzigen Unterschied zu den Definitionen von Ulbrich beinhaltet der hier verwendete Szenarienbegriff auch abstrakte Szenarien, die lediglich den als relevant erachteten Ausschnitt eines Szenarios beschreiben.

Vacek [9] versucht eine hierarchische Beschreibung von Fällen mittels Generalisierung und Spezialisierung. Allerdings ist die gewählte hierarchische Einteilung von Fällen nicht eindeutig und beliebig wählbar.

Ganz aktuell hat Bach [10] einen Ansatz vorgestellt, durch abstrakte Modellierung von Szenarien den Entwicklungsprozess für automatisierte Fahrfunktionen zu unterstützen. Darin sind viele, für den hier vorgestellten Ansatz relevante Überlegungen, wie beispielsweise eine abstrakte Szenarienmodellierung, die Verhaltensbeschreibung mittels Manöver, sowie die Ablaufbeschreibung mittels definierten Ereignissen, bereits vorweggenommen.

Allerdings wird dabei strikt zwischen einer abstrakten und einer parametrisierten Beschreibung unterschieden. Für eine effektive Spezifikation und Bewertung von Verhalten kann bereits in der frühen Entwurfsphase die Kombination aus der Definition von abstrakten Szenarienelementen und der Präzisierung bestimmter Parameter notwendig sein. Darüber hinaus

wird das Verhalten durch einen definierten Ablauf von Manövern beschrieben, wodurch Handlungsalternativen nicht in einem Szenario berücksichtigt werden können.

Die Verhaltensbeschreibung im Verkehr mittels Manöver ist weit verbreitet und akzeptiert [11–13]. Die dabei gelisteten Manöver unterscheiden sich meist geringfügig, je nach Anwendungsfall. Allerdings wird dabei angenommen, dass jeweils nur ein Manöver aktiv ist und eine Fahrt durch Aneinanderreihung von Manövern beschrieben werden kann [13, S. 32].

Ein entscheidender Bestandteil der Methodik ist die Bewertung der aktuellen Systemspezifikation auf Basis aller Szenarien, um entscheiden zu können, ob das Systemverhalten gegebenenfalls angepasst werden muss und somit iterativ verbessert werden kann. Gerade für die Sicherheitsbewertung von Systemen gibt es zahlreiche Methoden und Verfahren, wie beispielsweise HAZOP, FMEA, FTA und ETA [14]. Diese Verfahren benötigen dabei unterschiedlich präzise Systemdefinitionen. Zur funktionalen Sicherheit von Systemen gibt es außerdem mit der ISO26262 [3] auch ein standardisiertes Vorgehen zur Risikoanalyse für E/E-Fehler von Fahrzeugsystemen.

Die meisten dieser Verfahren analysieren allerdings explizit die Gefahren durch Systemfehler. Im Bereich der Robotik gibt es bereits Ansätze diese Einschränkung aufzuheben und situative Gefahren zu berücksichtigen, um eine ganzheitliche Gefahrenanalyse zu erreichen [15].

Aufbauend auf den vorgestellten Ansätzen ermöglicht die entwickelte Methodik eine adaptive, ganzheitliche Bewertung und dadurch die effektive Spezifikation von sicherem Verhalten durch iterative Anpassungen.

3. Szenarienbasierte Entwicklungsmethodik

Da das zu spezifizierende Verhalten beschreiben soll, wie sich das System in Verkehrssituationen verhält, kann dieses nur im Kontext mit den Verkehrssituationen bewertet werden. Deshalb basiert die vorgestellte Methodik auf Szenarien. Wie in Bild 1 schematisch dargestellt, werden den Szenarien Systemgrenzen und Verhalten zugeordnet und bezüglich der relevanten Kategorien bewertet. Dieses Vorgehen kann dabei auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen, von abstrakten ersten Abschätzungen zu detaillierten simulativen/prototypischen Bewertungen, durchgeführt werden. Die Systemgrenzen und Verhaltensregeln stellen die Verhaltensspezifikation des Systems dar.

Da es in einem frühen Stadium der Produktentwicklung nicht möglich ist, bereits eine gefahrenfreie, beabsichtigte Funktion zu beschreiben, ist ein iteratives Vorgehen notwendig [16, S. 89]. Dies gilt für die hier vorliegende Problemstellung in besonderem Maße, da weder alle relevanten Szenarien noch alle notwendigen Verhaltensregeln von Beginn an berücksichtigt

und ausreichend detailliert werden können. Um diese Iterationen möglichst effizient durchführen zu können, muss die Methodik folgende Anforderungen erfüllen.

- Szenarien müssen jederzeit hinzugefügt werden können und mit dem bisher definierten Systemverhalten verknüpft werden.
- Beim Ändern von Systemgrenzen oder Verhaltensregeln müssen die Auswirkungen auf die Gesamtbewertung aller Szenarien ersichtlich sein.
- Bei der Präzisierung eines Szenarios oder einer Verhaltensweise muss die geänderte Bewertung mit der ursprünglichen Abschätzung verglichen werden können.

Um diese Anforderungen zu erfüllen und gleichzeitig die zu erwartende Menge an notwendigen Szenarien stemmen zu können, wird eine formale Szenarienbeschreibungssprache vorgeschlagen, die weitreichende Abstraktionsgrade ermöglicht. Die Beschreibung der Verhaltensspezifikation mittels Systemgrenzen und Verhaltensregeln basiert dann ebenfalls auf dieser Beschreibungssprache um sie modellierten Szenarien zuordnen zu können. Die Bewertung von Systemen in der Konzeptphase beruht in der Regel zunächst auf Expertenschätzungen, die dann gegebenenfalls durch weitere Untersuchungen und prototypische Umsetzungen präzisiert bzw. angepasst werden. Um den Aufwand für Neubewertungen von Änderungen während der Iterationsschleifen gering zu halten, können Bewertungsmodelle in das Vorgehen integriert werden und damit Bewertungen teilweise automatisiert werden.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Bestandteile der Methodik präzisiert und anhand dem Beispielszenario eines Einscherers veranschaulicht.

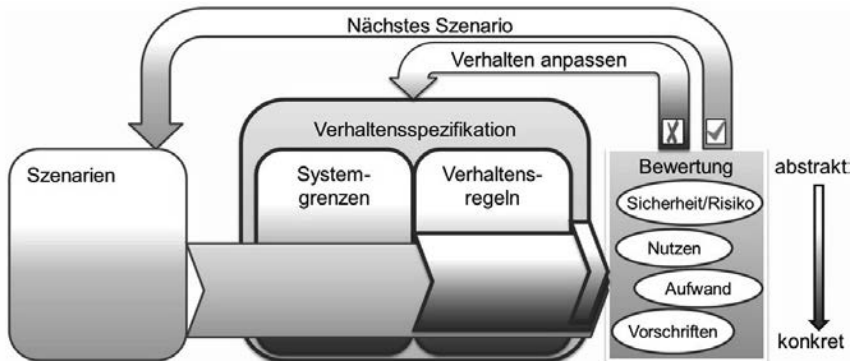


Bild 1: Schematische Darstellung der iterativen, szenarienbasierten Methodik zur Bewertung und Anpassung der Verhaltensspezifikation auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen.

4. Szenarienbeschreibung

Grundlage für eine iterative Erweiterung und Anpassung der Funktionsspezifikation ist eine einheitliche, formale Beschreibungssprache für die Szenarien, Systemgrenzen, Verhaltensregeln und Bewertungen. Das Ziel dieser Beschreibung ist durch Verknüpfung der Systemgrenzen, Verhaltensregeln und Bewertungen mit den Elementen der Szenarienbeschreibungssprache Verbindungen zwischen ähnlichen Szenarien automatisch auswerten zu können und damit den Überblick über die sukzessiv wachsende Gesamtbewertung gewährleisten zu können.

Dafür muss die Beschreibungssprache eine Reihe von Anforderungen erfüllen können:

- 1) Die Beschreibung muss effizient sein. Szenarien müssen ohne großen Aufwand erstellt werden können, damit neue Erkenntnisse/Probleme auch formal beschrieben werden und nicht aufgrund zu großen Aufwands anders dokumentiert werden.
- 2) Alle für das Systemverhalten relevanten Aspekte müssen beschrieben werden können.
- 3) Die Beschreibung muss eindeutig und verständlich sein. Auch bei unterschiedlichen Anwendern müssen dieselben relevanten Zusammenhänge in der Realität mit denselben Beschreibungselementen abgebildet werden.

Um diese teils konkurrierenden Anforderungen zu erfüllen, wurde ein Konzept für eine abstrakte Szenarienbeschreibungssprache entwickelt. Die Grundidee der hier definierten Szenarienbeschreibungssprache ist, es durch einen völlig frei wählbaren Abstraktionsgrad zu ermöglichen, nur die relevanten Bestandteile zu beschreiben.

Von der sehr abstrakten Beschreibung einzelner Elemente, beispielsweise um eine Systemgrenze zu definieren, bis hin zur detaillierten Beschreibung aller möglichen Szenarienbestandteile um ein reales Szenario abzubilden ist alles möglich. Dabei gilt die sogenannte „open world assumption“ die besagt, dass nicht definierte Elemente beliebig sind [17, S. 995]. Demnach können Szenarien völlig frei jeweils Über-, Teil- oder Untermengen anderer Szenarien sein. Das Ziel dieser Abstraktion ist eine effiziente Szenarienerstellung zur Erfüllung von Anforderung 1). Durch die frei wählbare Abstraktion muss keine umfangreiche Beschreibung aller Situationsbestandteile erstellt werden, sondern lediglich die relevanten Elemente beschrieben werden.

Während für Anforderung 1) eine möglichst kompakte Beschreibungssprache vorteilhaft wäre, erfordert die zweite Anforderung genau Gegenteil eine möglichst allumfassende Sprache. Um diesen Zielkonflikt zu entschärfen, wird die Beschreibungssprache einerseits hierarchisch aufgebaut und kann andererseits bei Bedarf erweitert werden. Durch den hierarchischen Aufbau wird mittels Top-Down Vorgehen versucht bereits eine möglichst umfassende

Beschreibung relevanter Szenarienbestandteile abzuleiten. Dabei werden Szenarien aus drei unterschiedlichen Beschreibungsarten zusammengesetzt. Als Basis dienen Szenarienelemente, die jeweils Parameter und Ereignisse besitzen. Ein Szenario setzt sich damit durch die beinhalteten Szenarienelemente, deren präzisierten Parametern sowie der Abfolge der möglichen Ereignisse zusammen. Dabei gilt auch wieder das Prinzip der Abstraktion, womit nur eine beliebige Teilmenge der möglichen Parameter und Events definiert werden muss.

Für eine strukturierte Beschreibung der Szenarienelemente mit den jeweiligen Parametern und Events wird das aus der objektorientierten Programmierung bekannte Prinzip der Vererbung adaptiert. Das bedeutet, dass die Szenarienelemente jeweils durch Ableitung präzisiert werden können und dabei die Parameter und Events der Basisklasse erben. Dementsprechend bietet sich die Visualisierung der Struktur mit Hilfe von Klassendiagrammen an. In Bild 2 ist die abstrakteste Ebene der Szenarienbeschreibungssprache dargestellt. Demnach setzt sich ein Szenario aus beliebig vielen Szenarienelementen zusammen. Um eine möglichst vollständige und nachvollziehbare Ableitung der benötigten Elemente zu erreichen wurden zunächst die Kategorien Infrastruktur, Hindernisse, Umweltbedingungen, Dynamische Objekte, Egosystem sowie Verhaltensweisen definiert. Für eine solche Einteilung existieren grundsätzlich viele unterschiedliche Möglichkeiten, wobei häufig ähnliche Kategorien gewählt werden [vgl. 5, 5, 7, 10, 18]. Die vorliegende Struktur hat sich für eine strukturierte Ableitung der benötigten Elemente bewährt.

In dem Klassendiagramm sind die Szenarienparameter als Attribute und die Ereignisse als Operationen der Klassen dargestellt. Das Klassendiagramm wird hier allerdings nur zu Visualisierungszwecken verwendet, die Umsetzung der Sprache wird mit Hilfe von relationalen Datenbanken realisiert.

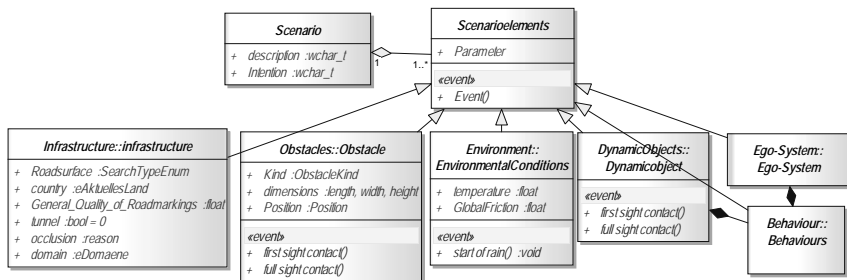


Bild 2: Struktur der Szenarienbeschreibungssprache mit Szenarienelementen, Parametern und Ereignissen auf oberster Ebene

Für eine detailliertere Beschreibung von Szenarien wird nun jede dieser Elementklassen weiter präzisiert. So kann beispielsweise die Infrastruktur durch die Elemente Strecken, Knoten und sonstige Elemente wie Parkplätze und Baustellen weiter untergliedert werden, wobei alle diese Elemente Spezialisierungen beinhalten können. Eine exemplarische Untergliederung von Infrastrukturelementen ist in Bild 3 dargestellt.

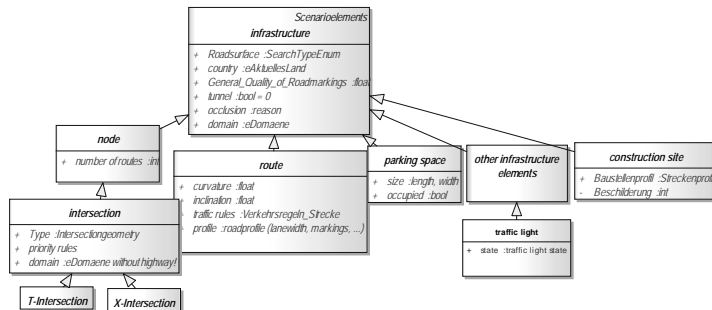


Bild 3: Exemplarische Präzisierung der Szenarienelemente in der Kategorie Infrastruktur

Durch diese strukturierte Einteilung und Ableitung von Szenarienelementen sowie deren Parametern kann bereits eine recht umfassende Beschreibungssprache entworfen werden. Jedoch ist es nicht möglich, eine vollständige Beschreibungssprache bis ins letzte Detail zu definieren. Während auf den höchsten Abstraktionsebenen noch von Vollständigkeit der Einteilung ausgegangen werden kann, wird es immer spezifische Szenarienbestandteile geben, die nicht von Anfang an bedacht werden. Aus diesem Grund muss es möglich sein, die Beschreibungssprache bei Bedarf zu erweitern.

Eine weitere Herausforderung birgt die Anforderung bezüglich Eindeutigkeit. Bisher werden Szenarien häufig textuell beschrieben (meistens unterstützt durch schematische Abbildungen) und ermöglichen somit eine einfache Beschreibung von beliebigen Szenarien. Allerdings sind diese Beschreibungen dann schlecht vergleichbar. Je stärker die Beschreibungsmittel formalisiert werden, desto größer wird zwar die Vergleichbarkeit, desto schwieriger wird aber auch die Anwendung da nur vorgegebene Beschreibungsmöglichkeiten genutzt werden können. In diesem Konzept wird der Lösungsansatz verfolgt, in der zugrundeliegenden Beschreibungssprache keine Mehrdeutigkeiten zuzulassen aber durch vordefinierte Kombinationen von Szenarienbestandteilen dennoch eine einfache Szenarienbeschreibung zu ermöglichen. Dabei werden nur die für die Beschreibung häufig genutzten und praktikablen Mehrdeutigkeiten explizit modelliert und somit ein sinnvoller Kompromiss für diesen Zielkonflikt gewählt.

Beispielsweise ist für die Verhaltensspezifikation ein vor dem Ego-Fahrzeug einscheresendes Fahrzeug relevant. Durch die formale Beschreibung einer abstrakten Klasse „Einscherer“, als Fahrzeug mit der Verhaltensweise Fahrstreifenwechsel und der entsprechenden Parametrierung bezüglich Ausgangsposition und Zielfahrstreifen, wird eine einfache und leicht nachvollziehbare Modellierung des Szenarios und des Verhaltens ermöglicht. Aufgrund der angestrebten Abstraktion kann diese Definition unabhängig von einer konkretisierten Infrastruktur erfolgen und gilt somit für Einschervorgänge allgemein.

5. Systemspezifikation mit Systemgrenzen und Verhaltensregeln

Als Ziel des hier vorgestellten Entwurfsvorgehens soll eine Verhaltensspezifikation des hochautomatisierten Systems entstehen, die hinsichtlich Sicherheit, technischer Machbarkeit und Kundennutzen einen nachvollziehbaren und sinnvollen Kompromiss darstellt. Dabei liegt der Fokus des zu definierenden Verhaltens auf der Bahnführungsebene nach dem Drei-Ebenen-Modell von Donges [19]. Für die Stabilisierungsebene wird lediglich eine Umsetzung dieses Verhaltens innerhalb gewisser Toleranz gefordert. Das Verhalten beschreibt hier demnach das physikalische Verhalten des HAF in dem jeweiligen Szenario.

Dafür wird das Systemverhalten mit Hilfe von Systemgrenzen und Verhaltensregeln spezifiziert. Erstere grenzen den Situationsraum ein, in dem das HAF sicher betrieben werden kann. Aufbauend auf [18] werden zwei Arten von Systemgrenzen unterschieden. Einerseits funktionale Systemgrenzen die umreißen, in welchen Situationen das System aktiv sein soll. Diese bedingen entsprechende Verhaltensweisen die das Systemverhalten beim Erreichen dieser Grenzen definieren. Andererseits sogenannte Leistungsgrenzen die klar kennzeichnen, dass die Leistungsfähigkeit des Systems in diesen Situationen nicht mehr ausreichend ist. Diese Situationen können demnach selbst bei voller Funktionsfähigkeit des Systems zu Schäden führen und beeinflussen das verbleibende Restrisiko.

Aufgrund der Abhängigkeiten von externen Faktoren, physikalischen Einschränkungen und nicht hundertprozentig vermeidbaren Fehlern in technischen Systemen sowie der Notwendigkeit einer ausreichenden Übergabezeit an den Fahrer kann ein Verlassen des sicheren Bereichs nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Entscheidend ist dabei nur, diese Risiken ebenfalls in der Entwicklung zu berücksichtigen und entsprechende Risikoprinzipien, wie beispielsweise ALARP [20, S. 16], anzuwenden.

Zur Spezifikation des Gesamtverhaltens der Funktion werden Verhaltensregeln definiert, die von dem System eingehalten werden müssen. Diese werden ebenfalls während der Entwicklung iterativ präzisiert und ergänzt. Dadurch ist es möglich, ausgehend von trivialen und abstrakten Verhaltensregeln für HAF, wie z.B. auf Basis von Verkehrsregeln in [21], das Verhal-

ten aufgrund von kritischen Szenarien und Bewertungen iterativ anzupassen und zu konkretisieren, wie in Bild 1 dargestellt. Dabei werden die Verhaltensregeln so definiert, dass sie einen Verhaltensspielraum eingrenzen, in dem sich das HAF-Verhalten bewegen darf. Das ist notwendig, da aufgrund der komplexen Anforderungen an ein automatisiertes Fahrzeug keine eindeutige Verhaltensdefinition möglich ist. Diese Grenzen können dann als Grundlage für die spezifizierte Mindestleistungsfähigkeit und Abweichungen davon für die Gefahren und Risikoanalyse im Sinne der funktionalen Sicherheit verwendet werden.

Als Grundlage für die Verhaltensbeschreibung wird hier eine Kombination aus den Manövern von [12] und [13] verwendet, die jeweils durch Parameter konkretisiert werden und je nach Situation benötigt oder ausgeschlossen werden. Allerdings ist nach Ansicht der Autoren die häufig postulierte, klare zeitliche Trennung von Manövern nicht möglich, da beispielsweise Manöver wie „Fahrzeug Folgen“ und „Hindernis passieren“ durchaus parallel ablaufen können. Demnach werden die verwendeten Manöver zur strukturierten Einteilung der Verhaltensmöglichkeiten verwendet, um auch bei der Verhaltensdefinition die Anforderungen an die Beschreibungssprache zu erfüllen. Dabei können die Parameterräume der einzelnen Manöver situationsabhängig eingeschränkt werden. Der gesamte Verhaltensspielraum für das System ergibt sich dann aus der Überlagerung der Einschränkungen.

Angewendet auf das Beispielszenario eines langsameren Einscherers muss das System parallel zum Manöver *Fahrstreifenfolgen* das Manöver *An Objekt annähern* ausführen oder könnte alternativ einen *Fahrstreifenwechsel* durchführen. Für das Manöver *An Objekt annähern* ist die Beschleunigung des Egofahrzeugs die entscheidende Größe. Demnach wird der Verhaltensspielraum durch eine mindestens nötige Verzögerung eingeschränkt. Diese setzt sich beispielsweise zusammen aus einer Verzögerung

$$a_{dst} = \frac{v_{rel}^2}{2(x - v_{obj}T_{min} - d_{min})}$$

zum Einhalten der minimalen Zeitleücke T_{min} und einer Verzögerung

$$a_{dttg} = \frac{v_{ego}T_{des} - x - v_{rel}T_{dip}}{T_{dip}^2}$$

um die angestrebte Zeitleücke T_{des} in der Zeit T_{dip} zu erreichen. Dabei ist x der Abstand, v_{rel} , v_{ego} und v_{obj} die Relativ-, Eigen- und Objektgeschwindigkeit. Bei der Modellierung des Verhaltensspielraums müssen zusätzlich noch relevante Systemparameter wie beispielsweise die maximale Gesamtlatenzzeit, die maximale Verzögerung und Mindesterkennungsreichweiten berücksichtigt werden. Die resultierende Mindestverzögerung mit einer maximalen Systemlatenzzeit, einer maximal möglichen Verzögerung und eines max. Verzögerungsrucks ist für ein exemplarisches Einscherszenario in Bild 4 dargestellt. Auf der linken Seite setzt

das System die Minimalanforderungen genau um, während auf der rechten Seite bereits deutlich früher eine Komfortverzögerung einsetzt und dementsprechend auch geringere Verzögerungswerte gefordert werden.

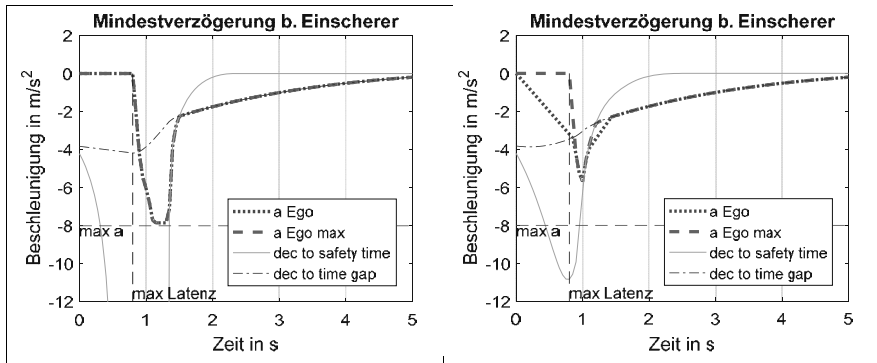


Bild 4: Aus Verhaltensregeln für Manöver "An Objekt Annähern" resultierende Mindestverzögerungen für ein Einscherszenario (Einscherabstand 40 m, Relativgeschwindigkeit $-5,6 \text{ m/s}^2$) bei genauer Einhaltung des Minimums (links) sowie frühzeitiger moderater Bremsreaktion (rechts)

6. Bewertung der Verhaltensspezifikation

Das spezifizierte Verhalten muss bezüglich mehrerer Kategorien bewertet werden, wie in Bild 1 angedeutet. Für eine Spezifikation, die einen optimalen Kompromiss darstellen soll, müssen Bewertungsmodelle für diese Kategorien erstellt werden. Der Kundennutzen wird unter anderem durch die Wahl der Systemgrenzen und die sich dadurch ergebende Verfügbarkeit des Systems beeinflusst. Die Kosten hängen beispielsweise von dem Umsetzungsaufwand, von Verhaltensregeln und der Sicherheitsbewertung im Sinne der funktionalen Sicherheit ab. In diesem Beitrag wird zunächst nur die Sicherheitsbewertung genauer betrachtet. Wie in Abschnitt 2 kurz dargestellt, gibt es zahlreiche etablierte Methoden zur Risikobewertung, die sowohl unterschiedlich detaillierte Systemspezifikationen benötigen als auch unterschiedliche Vorgehensweisen (Top-Down, Bottom-Up) besitzen. Allerdings gehen diese meistens bereits von einer sicheren Nominal-Funktion aus und analysieren lediglich Abweichungen. Außerdem sind sie relativ aufwendig durchzuführen. Deshalb wird in den meisten Entwicklungsprozessen zunächst das System definiert und anschließend bewertet, da eine iterative Anpassung zu aufwendig ist. Die Herausforderung ist somit, die etablierten Methoden und Möglichkeiten so in die Technik zu integrieren, dass möglichst effizient iterative Anpassungen vorgenommen werden können.

Dafür können die bisherigen Methoden zur Identifikation und Bewertung von Risiken wie gewohnt angewendet werden, nur anstatt die ermittelten Ergebnisse lediglich zu dokumentieren, werden die Modelle und das Wissen, die zu diesen Bewertungen geführt hat, mit der Szenarienbeschreibungssprache und den Verhaltensregeln verknüpft. Durch die explizite Modellierung der Zusammenhänge die zu den Risikobewertungen führen, können sowohl neue Szenarien als auch Anpassungen der Verhaltensspezifikation teilweise automatisiert bewertet werden, wie in Bild 5 schematisch dargestellt. Basierend auf einem Szenario und dessen Häufigkeit kann das damit verknüpfte Verhalten, wie beispielsweise aus Bild 4, durch ein Risikomodell bewertet werden.

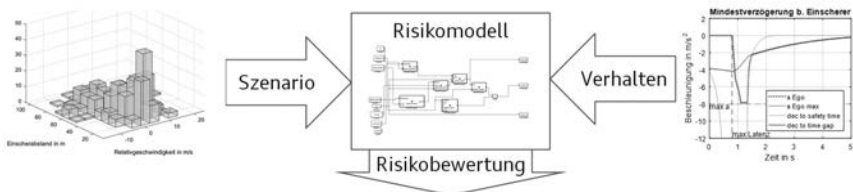


Bild 5: Schematische Darstellung eines Risikomodells zur adaptiven Risikobewertung in Abhängigkeit des spezifiziertem Verhaltens

Beispielsweise hängt die ASIL-Einstufung von E/E-Fehlern ja unter anderem von der zu erwartenden Schadensschwere ab. Betrachtet man wieder das Beispiel eines Naheinschlers, auf den aufgrund zu geringer Verzögerung aufgefahren wird, wird die Schadensschwere des Auffahrunfalls aufgrund der Geschwindigkeitsänderung durch die Kollision abgeschätzt. Dafür existieren abgestimmte statistische Auswertungen, welche Geschwindigkeitsänderungen zu welchen Schadensklassen führen. Anstatt nun einfach die resultierende Einstufung für ein bestimmtes Szenario und das durch Fehler beeinträchtigte Verhalten zu ermitteln, kann die Schadensfunktion sowie das Szenario und Systemverhalten modelliert werden und damit bei geänderten Systemparametern eine neue ASIL Abschätzung direkt erzeugt werden. Für den finalen Stand der Sicherheitsbewertung muss diese kritisch hinterfragt werden, aber eine erste Abschätzung für mögliche Systemänderungen kann dadurch abgebildet werden und somit deutlich effizienter iterative Anpassungen vorgenommen werden.

7. Exemplarische Umsetzung und Anwendung

Nach der theoretischen Beschreibung des Vorgehens sowie der benötigten Beschreibungsmittel soll die praktische Anwendbarkeit untersucht werden. Dafür ist eine prototypische Umsetzung nötig. Grundsätzlich sind unterschiedliche Tools denkbar, um die vorgestellte Methode zu unterstützen und die Beschreibungsmittel abzubilden.

Eine mögliche Auswahl an Tools, die im Bereich Systementwicklung und Szenarienmodellierung eingesetzt werden, umfasst Tabellenkalkulation (klassisch für Szenarienkataloge), UML/SysML (für System-Entwicklung prädestiniert), xml-basierte Darstellungen und Editoren (Simulationsszenarien), Ontologien (Wissensmodellierung) und relationale Datenbanken (verlinkte Datensätze). Alle diese Tools haben für den hier vorliegenden Anwendungsfall Vor- und Nachteile auf die nicht näher eingegangen wird. Für die Umsetzung wurde aufgrund der guten Darstellbarkeit von den nötigen Verbindungen zwischen Szenarienbeschreibungssprache, Szenarien, Systemgrenzen, Verhaltensregeln und Bewertungen eine prototypische Umsetzung mit Hilfe einer relationalen PostgreSQL-Datenbank gewählt. Als Anwendungsbeispiel wird eine hochautomatisierte Autobahnfunktion verwendet, wie beispielsweise in [1] als Autobahnchauffeur bezeichnet und grob spezifiziert.

Die Datenbankstruktur beinhaltet die Repräsentation der in Abschnitt 4 vorgestellten Szenarienbeschreibungssprache, wodurch die definierten Szenarien, Systemgrenzen und Verhaltensregeln durch Verbindungstabellen mit den entsprechenden Elementen, Parametern und Events verknüpft werden können. Durch Auswahl der Bewertungsmodellen je nach definierten Verbindungen wird damit eine ganzheitliche und automatisierte Bewertung über alle Szenarien möglich.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine Methode präsentiert, die eine effektive Spezifikation von automatisiertem Fahrverhalten unter Berücksichtigung einer ganzheitlichen Bewertung in der frühen Konzeptphase ermöglicht. Die notwendigen Schritte des Vorgehens wurden erläutert und anhand von relevanten Beispielen veranschaulicht. Der Aufbau der exemplarischen Umsetzung ist dargestellt. Aufgrund des vorläufigen Standes der Modellierung wurde auf eine Ergebnisdarstellung verzichtet.

Ein Kernelement der präsentierten Methode sind die Bewertungsmodelle, mit denen das Systemverhalten bezüglich der relevanten Kategorien evaluiert wird. Je präziser diese Modelle sind, desto mehr relevante Einflüsse können bei der Spezifikation berücksichtigt werden. Neben der vorgestellten Ansätzen zur Risikomodellierung können auch die Modelle zur Abschätzung des Kundennutzens und der Kosten vielschichtige Zusammenhänge berücksichtigen. Dabei ist vor allem die Validierung der Modelle eine große Herausforderung.

Literaturverzeichnis

- [1] T. M. Gasser, *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wissenschaft, 2012.
- [2] RESPONSE 3, "Code of Practice: for the Design and Evaluation of ADAS," V5.0, 2009. [Online] Verfügbar:
https://www.acea.be/uploads/publications/20090831_Code_of_Practice_ADAS.pdf.
- [3] 26262-3 *Road vehicles - Functional safety - Part3: Concept phase*, 26262-3:2011, 2011.
- [4] C. H. Fleming und N. G. Leveson, "Early Concept Development and Safety Analysis of Future Transportation Systems," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, S. 1–12, 2016.
- [5] K. Bengler, A. Pütz, C. Purucker, M. Götze, und B. Färber, "Das UR:BAN Assistenzszenario als Konstrukt für die Entwicklung und Bewertung integrierter Fahrerassistenzsysteme," in Bd. 69, *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 2015, S. 99–104.
- [6] C. Domsch und H. Negele, "Einsatz von Referenzfahrsituationen bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen," in *Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, 2008.
- [7] S. Ulbrich, T. Menzel, A. Reschka, F. Schuldt, und M. Maurer, "Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren," in *10. Workshop Fahrerassistenzsysteme: FAS 2015*, Darmstadt: Uni-DAS e.V, 2015, S. 105–117.
- [8] S. Geyer *et al*, "Concept and development of a unified ontology for generating test and use-case catalogues for assisted and automated vehicle guidance," *IET Intelligent Transport Systems*, 2013.
- [9] S. Vacek, T. Gindele, J. M. Zollner, und R. Dillmann, "Using case-based reasoning for autonomous vehicle guidance," in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, S. 4271–4276.
- [10] J. Bach, S. Otten, und E. Sax, "A model-based scenario specification method to support development and test of automated driving functions," in *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium: IV 2016*, 2016, S. 1149–1155.
- [11] W. Tölle, *Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten*. Düsseldorf: VDI-Verl, 1996.
- [12] H.-H. Nagel, "A vision of 'vision and language' comprises action: An example from road traffic," (English), *Artificial Intelligence Review*, Bd. 8, Rn. 2-3, S. 189–214, <http://dx.doi.org/10.1007/BF00849074>, 1994.
- [13] M. Dambier, *Adaptive Information Flow Control: Recognition and Prediction of Factors Contributing to Driver's Stress*. Tönning: Der Andere Verlag, 2010.

- [14] E. Schnieder und L. Schnieder, *Verkehrssicherheit*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [15] S. Dogramadzi *et al*, "Environmental Hazard Analysis - a Variant of Preliminary Hazard Analysis for Autonomous Mobile Robots," *J Intell Robot Syst*, 2014.
- [16] H.-L. Ross, *Funktionale Sicherheit im Automobil*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014.
- [17] M. Hulsen, J. M. Zollner, und C. Weiss, "Traffic intersection situation description ontology for advanced driver assistance," in *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2011, S. 993–999.
- [18] D. Wittmann, W. Cheng, und M. Lienkamp, "Definition and identification of system boundaries of highly automated driving," in *7. Tagung Fahrerassistenz*, 2015.
- [19] E. Donges, "Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen," *Automobil-Industrie*, Bd. 2/82, Rn. 2, S. 183–190, 1982.
- [20] R. Bell und D. Reinert, "Risk and system integrity concepts for safety-related control systems," in *COMPASS '93: Eighth Annual Conference on Computer*, 1993, S. 15–34.
- [21] B. Vanholme, D. Gruyer, B. Lusetti, S. Glaser, und S. Mammar, "Highly Automated Driving on Highways Based on Legal Safety," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, Bd. 14, Rn. 1, S. 333–347, 2013.

Modernes Videodaten Management für effizienteres Testen von ADAS/AD Systemen: Was wir von der Medienindustrie lernen können

Dipl.-Ing. (Univ.) **Hans Windpassinger**, MBA,
Business Development Executive, IBM Deutschland GmbH, München;
Dipl.-Ing. (Univ.) **Ulrich Voigt**, Dipl.-Ing. (FH) **Frank Kraemer**,
IBM Deutschland GmbH, Frankfurt a. M.

Kurzfassung

Heutzutage verlieren Automobilhersteller und Zulieferer wertvolle Zeit bei der Entwicklung und dem Test von ADAS/AD (Advanced Driver Assistance Systems / Autonomous Driving) Systemen, weil das Management der dazu notwendigen Videodaten nicht optimal erfolgt. Ein Blick über den Tellerrand hinaus würde sich lohnen: Die Medienindustrie hat ganz ähnliche Problemstellungen bereits vor vielen Jahren hinreichend gut gelöst, als analoge Video Bänder aus den Studios verschwanden und die digitale Welt Einzug gehalten hat. Es lassen sich im Medienbereich Prozess-, Technologie-, und Architekturansätze erkennen, die auch in der Automobil Industrie sinnvoll wären. Vorliegender Beitrag stellt ausgewählte Problemstellungen in der ADAS/AD Entwicklung dar und zeigt auf, wie die Medien Industrie vergleichbare Aufgabenstellungen für sich gelöst hat.

Abstract

Today, automotive manufacturers and suppliers lose valuable time in the development and testing of ADAS / AD (Advanced Driver Assistance Systems / Autonomous Driving) systems, because the management of the necessary video data is not performed well. A look outside the box would be worthwhile: The media industry has solved similar problems sufficiently good many years ago, when analog tapes disappeared from the studios and the digital world arrived. Therefore it is possible to identify in the media industry process, technology, and architecture approaches that would be useful in the automotive industry too. Present paper presents selected problems in the ADAS/AD development and shows how the media industry has solved similar tasks.

1. Ausgangssituation

Zur Entwicklung von ADAS/AD Systemen, Komponenten und Funktionen werden große Mengen an Videodaten benötigt – einerseits für die Software Programmierung selbst, voral-

lem aber für die Verifikation und Validierung. Jedes Unternehmen generiert deswegen Petabytes an Videodaten, die aus Testfahrten überall auf der Welt gewonnen und häufig in Billig-Lohnländer manuell aufbereitet werden.

Hierzu werden unter anderem Festplatten physisch von A nach B verschickt, ein fehleranfälliges, träges und aufwendiges Verfahren; lokale Video Datenspeicher werden in Testlabs aufgebaut, die sich aufgrund der Datenmengen und bei den heute in Unternehmen verfügbaren WAN Bandbreiten nur schwer mit anderen Standorten synchronisieren lassen. Das Kopieren von Daten nimmt fast soviel Zeit in Anspruch wie beispielsweise der dazu gehörende Simulations- oder Testlauf, - und dies sind nur einige der derzeitigen Unzulänglichkeiten.

Einige Unternehmen betrachten das als reines IT Problem: Sie rüsten auf, erhöhen die Speicherkapazitäten und investieren in zusätzliches Equipment für HiL, (Hardware-in-the-loop), SiL (Software-in-the-loop) und MiL (Model-in-the-loop) – getreu dem Motto, „viel hilft viel“. Andere wiederum haben erkannt, dass die Fähigkeit viele Petabytes an Videos effizient zu verwalten, essentiell ist für die Entwicklung und die Absicherung, und beginnen hierfür neue, effizientere Lösungen zu konzipieren.

Die Medienindustrie hat ganz ähnliche Problemstellungen bereits vor vielen Jahren erfolgreich gelöst, als analoge Bänder aus den Studios verschwanden und die digitale Welt Einzug gehalten hat. Es lassen sich dort Prozess-, Technologie-, und Architekturansätze erkennen, die auch in der Automobil Industrie sinnvoll wären.

2. Ausgewählte Beispiele

In diesem Beitrag greifen wir einige der großen Herausforderungen im Bereich Videodaten Management in der ADAS/AD Entwicklung auf, und betrachten, wie die Medien Industrie mit ähnlichen und vergleichbaren Problemstellungen umgegangen ist. Dieses Vorgehen hat die IBM auch intern angewandt, um eine eigene IBM Videodaten Management Lösung für ADAS/AD Entwicklung und Test zu entwickeln.

2.1. „Tagging“ im ADAS/AD Umfeld

Den Begriff „Tagging“ verwenden wir in diesem Beitrag synonym zu den Begriffen „Labelling“, auch wenn einige in der Automobilindustrie dies begrifflich folgendermaßen unterscheiden: Wenn es sich um eine Annotation von einfachen Objekt Beschreibungen handelt, wird der Begriff „Tagging“ verwendet; wenn es sich um eine Annotation von komplexeren Beschreibungen gesamter Szenen und Fahrmanöver handelt, wird der Begriff „Labelling“ genutzt. Die Herausforderungen für das Tagging sind bekannt: Da im wesentlichen manuell getaggt wird, ist das gesamte Verfahren extrem zeit- und kostenintensiv; dazu kommt, dass es

anfällig ist für Fehler; Fehler in der Definition von Ground Truth führen zu Folgefehlern bei der Entwicklung und beim Test, was wiederum zu Merhaufwänden führt.

Wie nun macht das die Medien Industrie? In der Medienindustrie müssen die Videos auch annotiert werden. Man spricht hierbei vom „Logging“. Beim Logging wird der Inhalt Timecode bezogen beschrieben und dokumentiert, damit beispielsweise Redakteure Material im Archiv finden („Angela Merkel geht freundlich winkend bei blauem Himmel und Sonnenschein die Treppe runter“); oder damit der Autor und Cutter eines Beitrages sich im Rohmaterial zurecht findet (für ein par Minuten Fernsehbeitrag werden oft mehrere Stunden Material gedreht); oder damit Inhalte bildgenau gefunden werden, z.B. Tore beim Fussball. Die Videodaten liegen in der Fernsehtechnik im sogenannten MXF Fileformat vor (MXF = Material Exchange Format. [1]), analog dem gängigen ADTF Format [2] in der Automobilindustrie. Allerdings werden in der Medienindustrie die Loggerdaten nicht in dem Videofile oder einem Containerfile gespeichert, weil sich darin in aller Regel nicht gut suchen lässt. Vielmehr werden spezielle Datenbankanwendungen (Content Management Systemen) mit entsprechenden Oberflächen eingesetzt, um diese Metadaten zu erfassen und zu suchen. Die Screenshots im Bild 1 zeigen das System FARO [3], welches vom Schweizer Fernsehen und ProSieben Sat.1 eingesetzt wird und durch die Schweizer Firma SCS [4] entwickelt und von IBM beim Kunden eingeführt wurde. Hier sieht man, dass (automatisiert) sogenannte Keyframes erzeugt werden, die bei jeder Änderung im Bild ein Standbild extrahieren und so in einem „Leuchteppich“ einen schnellen Überblick über den Videoinhalt geben. Das im Bild 1 gezeigte Logging enthält nur eine Beschreibungsebene. Es gibt aber auch Systeme, die in mehrere Ebenen, sogenannten Straten, loggen.

Neben Content Management Systemen für das separate Speichern der Annotationen und dem in Bild 1 dargestellten „Leuchteppich“, nutzt die Medienindustrie auch bereits semi-automatisiertes Loggen. Mit modernen Verfahren zur Bild- und Objekterkennung werden Annotationen automatisch zu Videoframes generiert und abgespeichert, so dass der manuelle Aufwand dafür minimiert wird. Bekannt sind unter anderem Algorithmen zur Gesichtererkennung, zum Vergleichen von Bildern oder zum Suchen ähnlicher Bilder in einer Videosequenz.

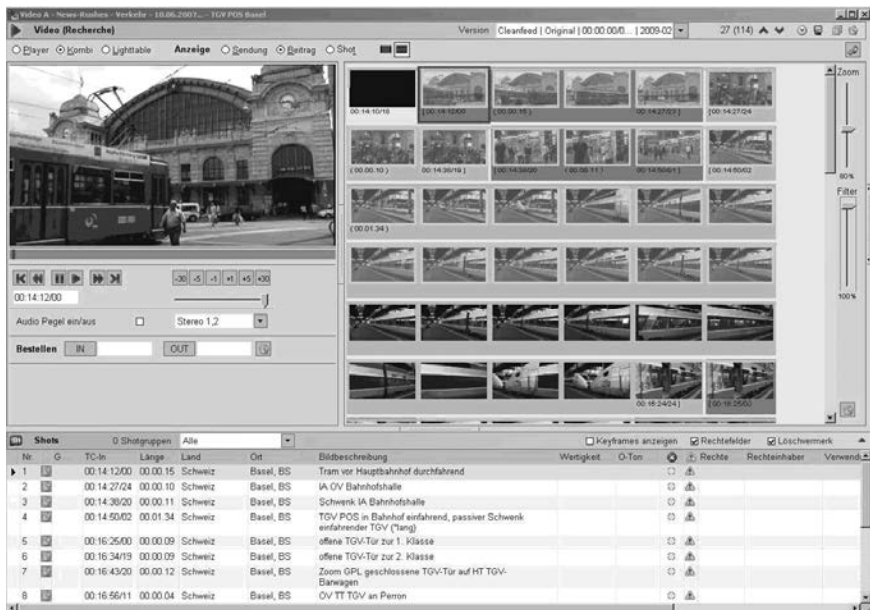


Bild 1: System FARO

2.2. Workflow Orchestrierung im ADAS/AD Umfeld

Wenn die Videodaten getaggt sind, werden nun diese sogenannten Ground Truth Daten in der Entwicklung und im Test von ADAS/AD Komponenten, Systemen und Funktionen genutzt. Hier finden wir meist folgende Situation vor:

- Videodaten für ADAS/AD Entwicklung werden nach unseren Erfahrungen nur in seltensten Fällen in professionellen Content Management Systemen verwaltet. In einem Fall haben wir gesehen, dass die Videodaten als ADTF Files nur auf einem einzigen File Server liegen; die Directory Strukturen geben eine grobe Klassifikation vor; Datei Namen enthalten Metadateninformation.
- Im Bereich Workflow Automation finden sich häufig einige selbstgestrickte Skripts; bislang haben wir als IBM bei keinem unserer Kunden eine durchgehende Prozessautomatisierung vorgefunden.

- Eine vollständige Anbindung an Application Lifecycle Management (ALM) und Product Lifecycle Management (PLM) Systeme, sowie die Integration in High-Performance Computing (HPC) Umgebungen sind nur punktuell gegeben, obwohl in den allermeisten ADAS/AD Entwicklungen die Anforderungen der ISO 26262 [5] für funktionale Sicherheit gelten und zudem häufig eine Leistungsfähigkeit in der Entwicklung gemäß dem ASPICE Level 3 [6] gefordert ist.

Wie nun macht das die Medien Industrie? In der Medienindustrie sind im Rahmen des Aquisitions-, Produktions- und Sendeprozesses eine Vielzahl von Systemen in einem Workflow zu orchestrieren und zur rechten Zeit mit den richtigen Files zu versorgen.

Bild 2 zeigt einen typischen Produktionsablauf am Beispiel des WDR, wo die IBM die „Zentrale Austausch Plattform“ (ZAP) realisiert hat [7]. Die ZAP [8] verbindet alle an der Fernsehproduktion beteiligten Systeme und sorgt für einen automatisierten und reibungslosen Materialfluss – auch über Standorte hinweg; (im Jahr 2017 werden unter anderem die ARD Auslandsstudios in den Hauptstädten dieser Welt direkt angebunden).

In der ZAP ist das Produkt IBM AREMA [9] das zentrale System: IBM AREMA steuert den Workflow der Files und triggert und überwacht die angeschlossenen Produktionssysteme wie Ingest/Digitalisierungs-Stationen, Transcoder, Transfersysteme, File-Analysatoren; weiterhin passt AREMA die Medien- und Metadaten jeweils an die gesteuerten Systeme an. AREMA ist bei vielen der deutschen und europäischen Fernsehanstalten im Einsatz. Zu den Kunden zählen neben dem WDR unter anderem der NDR, MDR, BR, SWR, ProSiebenSat.1, RTL, N24, ORF, SF, arte und die BBC.

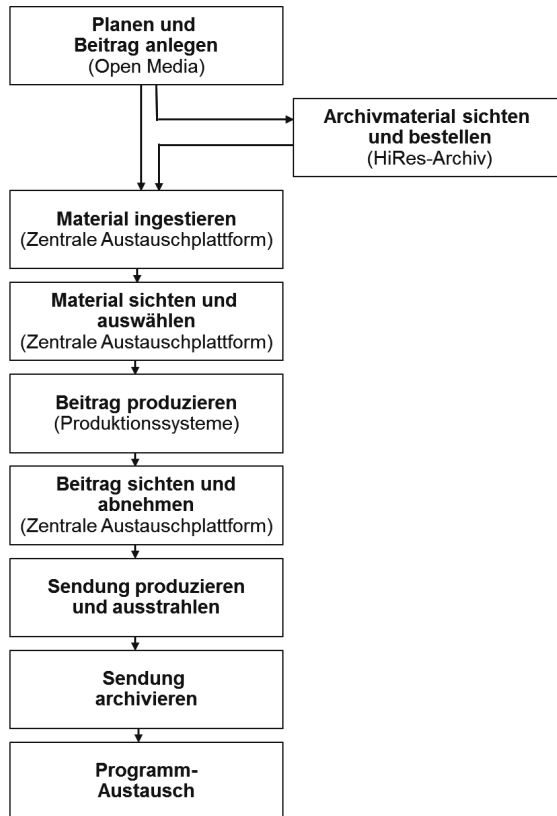


Bild 2: Beispielhafter Workflow beim WDR

2.3. Datenformate

Das aus unserer Wahrnehmung am meist genutzte Datenformat in der ADAS/AD Welt ist das bekannte ADTF von Elektrobit [2], auch wenn es dazu konkurrierende Lösungen von Intempora [10] und auch proprietäre in-house Lösungen gibt. Nach unserem Kenntnisstand werden kaum Kompressionsverfahren genutzt, weil für Ground Truth, z.B. für das Testen in der Regel das originale, hochauflösende Material benötigt wird.

Wie nun macht das die Medien Industrie? In der Medienindustrie gibt es zu jedem Videofile mindestens zwei Formate: Das sogenannte „HiRes“ (High Resolution) Format, welches häufig zwar komprimiert ist, aber eine für eine hochwertige Produktion ausreichende Bildauflösung besitzt, mit zum Beispiel HD (1920 x 1080 Pixel) oder neu 4k (auch Ultra-HD genannt) (3840 x 2160) oder gar 8k (7680 x 4320 Pixeln) Auflösung. Daneben gibt das LoRes (Low Resolution) Format, welches höher komprimiert ist (heutzutage meist MPEG-4) mit Bitraten von 1-2 Mbps und Auflösungen von meist 960x540 Pixel.

Ein LoRes File kann sich jeder Redakteur an seinem Arbeitsplatz PC oder Mobil an Tablet und Smartphone ansehen, um Material zu sichten, auszuwählen oder abzunehmen. Hier wird Netzwerkbandbreite gespart; mehrere hundert Redakteure können, lokal oder remote, im ganz normalen IT Netzwerk, auf die zentral abgelegten Files zugreifen. Durch die framegenaue Verkopplung von LoRes mit HiRes Format, können ausgewählte Sequenzen im LoRes ganz exakt auf dem HiRes Material nachgebildet werden. Es gibt auch Workflows, in denen komplette Beiträge am Redakteurs-PC geschnitten und vertont werden und dann vollautomatisch auf dem HiRes Material nachgeschnitten werden und in dieser hohen Qualitätstufe gesendet werden. Dies spart die immensen Kosten von Videoschnittplätzen im HiRes Format.

2.4. Weltweite Verteilung der Videodaten

Gerade die Tier-1 Supplier sind in aller Regel global tätig, mit Entwicklungsstandorten verteilt über die ganze Welt. Aber auch bei OEMs gibt es Anforderungen, Videodaten für die ADAS/AD Entwicklung weltweit zu verteilen. Dies stellt häufig ein Problem dar, weil die dafür benötigten Bandbreiten im Unternehmens-WAN nicht ausreichend vorhanden sind.

Wie nun macht das die Medien Industrie? Die Medien Industrie nutzt vielfach für die globale Verteilung von Videomaterial „IBM Aspera High-Speed File Transfer“ [11], ein IBM Software Produkt, das die vorhandenen WAN Bandbreiten sehr viel effektiver als sonst übliche Filetransferprotokolle ausnutzt. Es werden damit Übertragungsgeschwindigkeiten erzielt, die um Faktoren höher sein können als bei FTP, rsync, robocopy, scp und HTTP, wie Tabelle 1 darstellt. Damit ist es der Medienindustrie möglich auch große Dateien und Datasets über eine bestehende WAN/Cloud Infrastruktur mit vorhersehbarer, zuverlässiger und sicherer Zustellung schnell zu übertragen, unabhängig von Dateigröße, Übertragungsdistanz und Netzbedingungen. Eine Reihe von Kundenreferenzen [12] zeigen die breite Nutzung, unter anderem durch Apple iTunes [13] und dem Video Portal Netflix [14].

Tabelle 1: Aspera Übertragungsgeschwindigkeiten

Moving a 10GB File		Across US	US - Europe	US – Asia
Legacy Transport	100 Mbps	10 – 20 Hours	15 – 20 Hours	Impractical
	1 Gbps			
	10 Gbps			
With Aspera	100 Mbps	14 Min	14 Min	14 Min
	1 Gbps	14 Min	14 Min	14 Min
	10 Gbps	8.4 Sec	8.4 Sec	8.4 Sec

3. Zusammenfassung

Wir haben anhand von vier Beispielen aufgezeigt, dass die Medien Industrie typische Problemfelder im ADAS/AD Bereit bereits hinreichend gut gelöst hat:

- Das „Logging“ von Metadateninformation, (das dem Taggen und Labeln entspricht), und die Nutzung von Content Management Systemen
- Das Automatisieren von Arbeitsschritten und Prozessen
- Das Arbeiten mit unterschiedlichen Bildqualitäten – um so Bandbreiten / Netzwerke weniger zu belasten
- Und das weltweite Verteilen von Video Material

Unsere Empfehlung lautet daher, das Rad nicht neu zu erfinden, sondern den Erfahrungsschatz aus der Medienindustrie zu nutzen, und gerade hier in Deutschland einen Erfahrungsaustausch mit der hier ansässigen Medienbranche aufzusetzen. IBM als Technologie Anbieter, der in beiden Industrien bestens vernetzt ist, kann Ihnen hierbei gerne behilflich sein.

Auch wir als IBM haben Erfahrungen und Assets der Media Industrie genutzt, um unsere eigene IBM Video Data Management Lösung aufzubauen, die in Bild 3 dargestellt ist. Grundlage unserer Lösung bildet das bewährte Cluster Filesystem IBM Spectrum Scale [15]. Mit dem Speichersystem, welches seine Wurzeln im High Performance Computing (HPC) hat, lassen sich Hunderte Petabyte an Daten leicht verwalten und mit hoher Geschwindigkeit auf sie zugreifen.

Die IBM Lösung überwacht den gesamten Lebenszyklus der Daten im System. Kleine Dateien werden dabei zusammengefasst, nicht häufig genutzte Daten evtl. auf Band und/oder Cloud Speicher ausgelagert und automatisch wieder direkt auf dem Speichersystem bereitgestellt, sobald sie benötigt werden. So speichert z.B. DESY in Hamburg riesige Mengen an Versuchsdaten sicher und effizient und macht sie Wissenschaftlern auf der ganzen Welt bei Bedarf schnell und einfach verfügbar (siehe [16]). Wichtig für den Test von ADAS/AD ist, dass wir mit der IBM Storage Lösung in der Lage sind, Videos direkt an HiL Stations zu liefern, ohne dass aufgrund von Verzögerungen der Testprozess dabei abbricht. Der sonst typische File Copy Prozess kann somit komplett entfallen. In einem Proof of Concept (PoC) bei einem großen Zulieferer konnten wir zeigen, dass wir damit den Testdurchsatz um mehr als 30% steigern können bei gleicher Hardwareausstattung. Ähnliche Ergebnisse kennen wir aus dem Simulationsbereich beispielsweise in HPC/CAE (High Performance Computing/Computer Aided Engineering) Clustern, bei denen Spectrum Scale, welches auch als IBM GPFS bekannt ist, sehr häufig zum Einsatz kommt. IBM Spectrum Scale ermöglicht weiterhin die Vereinheitlichung der Virtualisierung, Analytik, Datei- und Objektenwendungsfälle in einer einzigen Scale-out-Speicherlösung. Eine eingebaute Hadoop API macht die Daten ohne weitere Kopien zu erstellen direkt der Apache Hadoop/MapReduce/Spark Welt verfügbar. Moderne BigData Tools wie Spark, HBase, Hive, Fume, Pig, Kafka usw. können direkt auf die Daten zugreifen ohne zusätzliche HDFS (Hadoop Distributed File System) Inseln zu schaffen.

Mit Spectrum Scale kommen wir außerdem mit einem sogenannten „Transparent Cloud Tiering“ auch direkt in die IBM Softlayer Cloud [14] oder zu anderen S3 Cloud Plattformen, wo wir unter anderem Object Storing Technologien anwenden können – wie es auch uns allen bekannte Video- und Appstores tun. IBM hat dazu vor einiger Zeit die Firma Cleversafe [15] übernommen, und daraus ein IBM Cloud Object Storage Angebot entwickelt. Viele unserer Kunden denken vermehrt über die Nutzung von Cloud Storage und Infrastruktur für die ADAS/AD Entwicklung nach oder nutzen diese bereits.

Um die Workflows in der Entwicklung und im Test von ADAS/AD Systemen zu automatisieren, haben wir in unsere Lösung das bereits vorgestellte IBM AREMA [9] integriert und unter anderem um die Unterstützung des ADTF Fileformats erweitert. Auch IBM Aspera, zur optimalen Ausnutzung vorhandenen Bandbreiten beim File Transfer, ist Bestandteil der IBM Video Data Management Solution.

Last but not least bietet IBM eine Reihe von Technologien aus dem Cognitive Computing Bereich an, mit dem das manuelle Taggen von Videodaten teilweise automatisiert werden kann. Diese Algorithmen aus dem Video Analytics Umfeld werden bereits in der Medienindustrie eingesetzt, aber sehr erfolgreich auch in anderen Bereichen wie zum Beispiel der Videoüberwachung angewandt ([16]). Bereits 2008 hat IBM begonnen, diese Technologien auch für Dashcams im Automobilbereich zu erproben und hat Funktionen wie Verkehrszeichenerkennung implementiert.

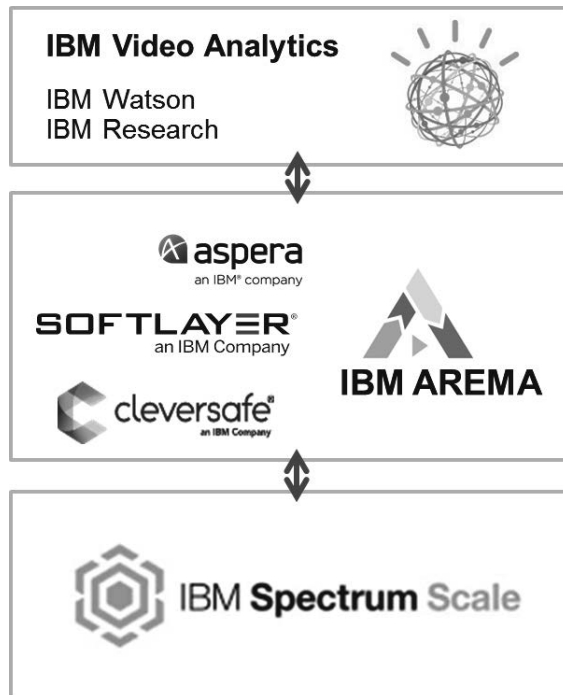


Bild 3: IBM Video Data Management Solution - Overview

Mit unserer IBM Video Data Management Solution für die Entwicklung und den Test von ADAS/AD

- erhöhen wir deutlich die Entwicklungseffizienz, durch die Reduzierung von manuellen Tätigkeiten beim Video Tagging, den Wegfall unnötiger Copy/Move Vorgänge und der Automatisierung von Arbeitsschritten
- erhöhen wir den möglichen Testdurchsatz, um so die Time-to-Market zu verbessern
- verringern wir IT Kosten durch kostengünstiges Tiering von verschiedenen Speicherlösungen - vom lokalen Speicher bis hin zum Cloud-gehosteten Object Store
- erhöhen wir die Flexibilität der Entwicklungsorganisationen, weil damit Workloads leichter weltweit verteilt und umgeschichtet werden können, um so auf geänderte Kundenanforderungen schneller reagieren zu können
- garantieren wir einen jahrelange Datenverfügbarkeit und Wiederherstellbarkeit um in möglichen Garantie-, und Schadenersatzstreitigkeiten jederzeit Entwicklungs- und Teststände wieder herstellen zu können.

4. Literaturangaben

- [1] Wikipedia: Material Exchange Format, [online] (URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Material_Exchange_Format) (accessed 22nd of August 2016)
- [2] EB Assist ADTF, [online] (URL: <https://www.elektrobit.com/products/eb-assist/adtf/>) (accessed 17th of August 2016)
- [3] faro - Einheitliche Archivierung der Video- und Radio-Beiträge bei SRF, [online] (URL: <https://www.scs.ch/blog/tag/faro/>) (accessed 22nd of August 2016)
- [4] SCS super computing systems, [online] (URL: <https://www.scs.ch/home.html>) (accessed 22nd of August 2016)
- [5] Automotive Spice, [online] (URL: <http://www.automotivespice.com/>) (accessed 29th of August 2016)
- [6] ISO 26262-1:2011 Road vehicles -- Functional safety -- Part 1: Vocabulary, [online] (URL: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=43464) (accessed 29th of August 2016)

- [7] IBM Pressemitteilung, 6. Septmeber 2012: IBM baut digitales Archiv für den WDR, [online] (URL: <http://www-03.ibm.com/press/de/de/pressrelease/38771.wss>) (accessed 18th of August 2016)
- [8] ZAP vernetzt - WDR print juli 2015, page 56 ff, [online] (URL: <http://print.wdr.de/2015-07/files/assets/basic-html/page56.html>) (accessed 18th of August 2016)
- [9] IBM Archive and Essence Manager - Archive, store, transfer and process files to support production workflows in media, IBM 2016 [online] (URL: <http://www-935.ibm.com/services/us/gbs/media-asset-management/>) (accessed 19th of August 2016)
- [10] Discover RTMaps, Intempora, [online] (URL: <https://intempora.com/products/rmaps.html>) (accessed 21st of August 2016)
- [11] IBM Aspera High-Speed File Transfer, [online] (URL: <http://www-03.ibm.com/software/products/de/high-speed-file-transfer>) (accessed 9th of August 2016)
- [12] IBM Aspera Customer Showcase, [online] (URL: <http://asperasoft.com/de/startseite/kunden/>) (accessed 9th of August 2016)
- [13] IBM Aspera Customers: iTunes - High-performance content contribution, [online] (URL: <http://asperasoft.com/de/customers/customer/view/Customer/show/itunes/>) (accessed 9th of August 2016)
- [14] IBM Aspera Customers: Netflix - Large scale content delivery in the cloud, [online] (URL: <http://asperasoft.com/de/customers/customer/view/Customer/show/netflix/>) (accessed 9th of August 2016)
- [15] IBM Spectrum Scale, [online] (URL: <http://www-03.ibm.com/systems/storage/spectrum/scale/>) (accessed 21st of August 2016)
- [16] DESY and IBM Develop Big Data Architecture for Science, [online] (URL: <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/44587.wss>) (accessed 29th of August 2016)
- [17] IBM Cloud, [online] (URL: <http://www.softlayer.com/>) (accessed 21st of August 2016)

- [18] IBM Cloud Object Storage - Cleversafe is now IBM Cloud Object Storage, [online]
(URL: <https://www.cleversafe.com/>)
(accessed 21st of August 2016)
- [19] IBM Intelligent Video Analytics, [online] (URL: <http://www-03.ibm.com/software/products/en/intelligent-video-analytics/>)
(accessed 21st of August 2016)

Kontaktdaten

Frank Kraemer, Kontakt bitte via IBM email: kraemerf@de.ibm.com

Ulrich Voigt, Kontakt bitte via LinkedIn: <https://de.linkedin.com/in/ulrich-voigt-10046b4>

Hans Windpassinger, Kontakt bitte via IBM email: hans.windpassinger@de.ibm.com

Absicherung sicherheitskritischer Assistenzsysteme

Durchgängig und nachvollziehbar

Anne Geburzi, Dipl.-Math. **Michael Beine**, dSPACE GmbH, Paderborn

Kurzfassung

Spätestens seit Google seine selbstfahrenden Autos medienwirksam Testfahrten absolvieren lässt, ist das Thema autonomes Fahren für jedermann greifbar. Doch der durch einen Software-Fehler verursachte Zusammenstoß des Google-Autos mit einem Bus im März 2016 zeigt auch, wie viel Arbeit noch bevor steht, damit die Vision vom unfallfreien und autonomen Fahren echte Realität wird.

Entscheidend sind in diesem Zusammenhang Assistenzsysteme, die die Sicherheit im Straßenverkehr erhöhen. Fahrzeughersteller und Zulieferer sind weiterhin gefordert, hier innovative Neu- und Weiterentwicklungen zu bringen. Hierbei müssen sie die meist sicherheitskritischen Systeme konform zur Sicherheitsnorm ISO 26262 entwickeln und die funktionale Sicherheit und Robustheit der Systeme sicherstellen.

Der Aufwand für die Absicherung und den Test aktiver Sicherheits- und Fahrerassistenzsysteme muss dabei beherrschbar bleiben. Dies kann nur gelingen, wenn im Rahmen der Entwicklung geeignete Simulations- und Testumgebungen zum Einsatz kommen.

In diesem Beitrag wird eine durchgängige Testumgebung zur Absicherung von Fahrerassistenzsystemen mittels Software- und Hardware-in-the-Loop Simulation vorgestellt. Am Beispiel der autonomen Notbremsfunktion und entsprechender Euro-NCAP-Testprotokolle wird dabei der gesamte Testprozess inklusive der Ableitung von Testimplementierungen aus Anforderungen, der Testplanung und -ausführung sowie der automatisierten Ergebnisauswertung betrachtet.

1. Bedeutung von Fahrerassistenzsystemen

Fahrerassistenzsysteme sind in den vergangenen Jahren zunehmend in den Fokus gerückt und spielen insbesondere auf dem Weg zum hochautomatisierten und autonomen Fahren eine immer größere Rolle. Neben der Vision vom autonomen Fahren gibt es auch die Vorstellung vom unfallfreien Fahren. Weltweit hat man sich als Ziel gesetzt, die Unfallzahlen in den kommenden Jahren deutlich zu reduzieren. Laut Statistiken bleibt der Mensch dabei der größte Risikofaktor. Vor diesem Hintergrund geht der Trend weiter zu immer komplexeren Fahrerassistenzsystemen, die den Fahrer unterstützen und in kritischen Situationen die Fahraufgabe übernehmen können.

2. Sicherheitsrelevanz von Assistenzsystemen

So schreibt die EU für Nutzfahrzeuge seit Ende 2015 den Notbremsassistenten und bereits seit 2013 den Spurhalteassistenten vor, der den Fahrer vor Verlassen der Fahrspur warnt. Der Trend beim Verbraucherschutz im Bereich Pkw zeigt ebenfalls deutlich in Richtung aktive Sicherheit. Beim europäischen Programm zur Bewertung der Sicherheit bei (Neu-)Fahrzeugen (European New Car Assessment Program, kurz Euro NCAP) können ab 2018 nur Fahrzeuge mit aktiven Sicherheitssystemen wie dem autonomen Notbremsassistenten an Bord die Höchstpunktzahl von 5 Sternen erreichen.

Derartige Fahrerassistenzsysteme greifen direkt in die Längs- bzw. Querdynamik der Fahrzeuge und somit in das Fahrgeschehen ein. Ein fehlerhafter Eingriff kann verheerende Folgen haben, daher sind viele Assistenzsysteme sicherheitskritisch.

In der Automobilindustrie bedeutet das seit einigen Jahren, dass die ISO 26262 als automotiv Sicherheitsnorm zu berücksichtigen ist. Die Umsetzung der Norm soll die funktionale Sicherheit von E/E-Systemen im Fahrzeug gewährleisten.

3. Absicherung per Simulation

Besonders im Fokus steht die umfassende und systematische Absicherung der immer komplexer werdenden Assistenz- und Sicherheitssysteme, die allein durch reale Testfahrten auf der Straße nicht mehr zu bewältigen ist.

Zentraler Ansatzpunkt ist somit die Vorverlagerung der Testaufgabe von der Straße ins Labor. Neben den inzwischen etablierten Hardware-in-the-Loop (HiL)-Tests spielt dabei die Absicherung mittels Model- und Software-in-the-Loop (MiL-/SiL)-Simulation auf handelsüblichen PCs eine entscheidende Rolle.

Die Vorteile der Simulation liegen auf der Hand:

- Reproduzierbarkeit
- Test von Gefahrensituationen und in Grenzbereichen
- Signifikante Zeit- und Kosteneinsparungen

Zudem wird die Durchführung von MIL-, SIL-, HIL-Simulationen zur Absicherung auch in der ISO 26262 explizit für Software Unit Tests, Software-Integrationstests oder die Absicherung von Software-Safety-Anforderungen (ISO 26262, Teil 6) empfohlen und ist Mittel der Wahl bei Hardware-, Software- sowie Systemtests (ISO 26262, Teil 4, Abschnitt 8).

4. Nachvollziehbarkeit

Für die systematische und nachvollziehbare Absicherung sicherheitskritischer Assistenzsysteme in allen Phasen des Entwicklungsprozesses wird in Verbindung mit Test und Simulation auch ein umfassendes Testmanagement benötigt. Es liefert unter anderem die notwendige Nachvollziehbarkeit beim Testen:

- Nachvollziehbarkeit von der Anforderung bis zum Testergebnis unabhängig von der Anforderungsart wie Safety, Funktion, Performance und Robustheit
- Informationen zur Testabdeckung relevanter Testszenarien
- Dokumentation und Nachvollziehbarkeit der getesteten Parametrierungen
- Ganzheitliche Bewertung und Beobachtung des Fortschritts durch das gesamte Team über alle Testplattformen und Werkzeuge

Die Wichtigkeit eines umfassenden Testmanagements spiegelt sich auch in konkreten Punkten der ISO 26262 wider, die in Teil 8, Abschnitt 9 zur Absicherung die Planung, Ausführung und Dokumentation von Tests und Testergebnissen in systematischer Weise fordert.

5. Integrierte Toolkette

Demnach gehören zu den zentralen Komponenten einer durchgängigen Toolkette: zum einen eine Simulations- und Testumgebung zur frühen Absicherung der Steuergeräte-Software durch MIL- und SIL-Simulation bzw. zur Absicherung von Steuergeräten per HIL-Simulation und zum anderen ein systematisches Testmanagement.

Darüber hinaus werden Modelle zur Simulation des Fahrzeugverhaltens, der Umfeldsensoren, des Fahrers und der Verkehrsumgebung benötigt sowie Werkzeuge zur Definition der geforderten Testszenarien inklusive einer flexiblen Parametrierung der Simulationsmodelle. Ein weiteres Werkzeug wird für die Beschreibung von Testsequenzen, zur automatischen

Testausführung, Signalaufzeichnung und Auswertung von Tests gebraucht. Wichtig ist zudem die Möglichkeit zur Visualisierung der virtuellen Testfahrten während der Simulation. dSPACE bietet eine solche durchgängige Toolkette für die Absicherung sicherheitskritischer Assistenzsysteme. Im Folgenden wird die Nutzung dieser Toolkette für die Durchführung virtueller Euro-NCAP-Tests näher beschrieben (siehe Abbildung 1).

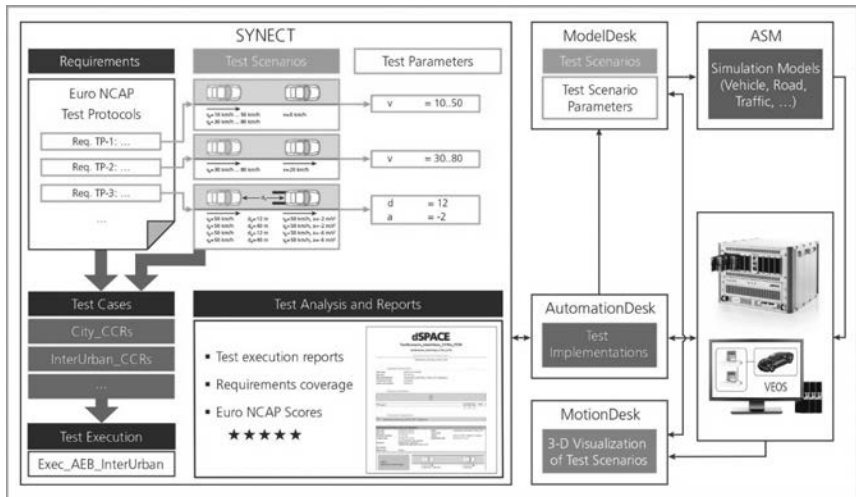


Bild 1: Toolkette zum virtuellen Testen von Euro-NCAP-Szenarien

6. Durchführung von Euro-NCAP-Tests per Simulation

Ausgangspunkt sind die Euro-NCAP-AEB (Autonomous Emergency Braking)-Testprotokolle zur Bewertung autonomer Notbremssysteme in Auffahrtszenarien (Car-to-Car-Rear) sowie zum Schutz verwundbarer Verkehrsteilnehmer wie beispielsweise von Fußgängern. Darin werden die Szenarien thematisch in die Gruppen Stadt (AEB City), außerstädtisch (AEB Inter-Urban) und Fußgänger (VRU/Pedestrian) unterteilt (siehe Abbildung 2). In den Testprotokollen werden zudem detaillierte Spezifikationen einer Testumgebung und der durchzuführenden Tests gegeben.

Die Euro-NCAP-Testprotokolle werden als Anforderungen in das Daten- und Testmanagement-Werkzeug SYNECT® übernommen (siehe Abbildung 1). Auf Basis dieser Anforderungen werden Testfälle für die verschiedenen Szenarien in SYNECT abgeleitet. Im Test-Authoring- und -Automatisierungswerkzeug AutomationDesk werden die zugehörigen Im-

plementierungen erstellt und in SYNECT mit den Testfällen verlinkt. So kann die Ausführung der Tests direkt über das Testmanagement-Werkzeug angestoßen werden.

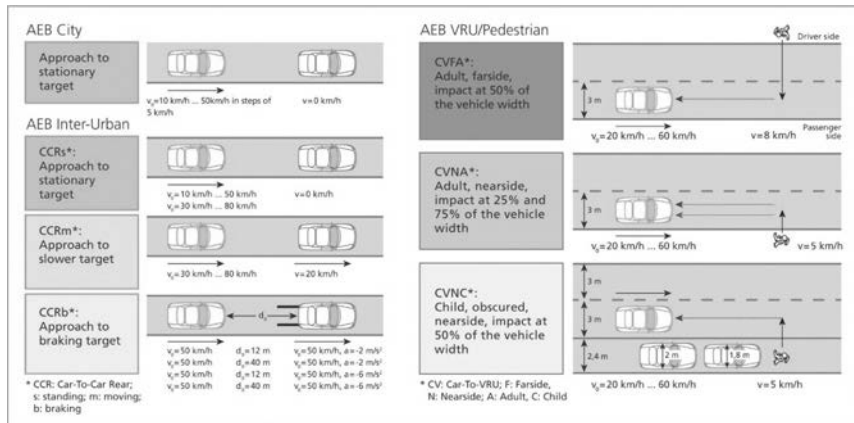


Bild 2: Euro-NCAP-Testprotokolle für AEB City, Inter-Urban und AEB VRU/Pedestrian

Zur Simulation der in den Euro-NCAP-Testprotokollen beschriebenen Szenarien werden die flexibel parametrierbaren dSPACE Automotive Simulation Models (ASM) genutzt. Die unmittelbar einsetzbaren Testszenarien werden in ModelDesk, einem Werkzeug mit grafischer Oberfläche zur Definition von Straße, Manöver und Verkehr, definiert und als Bibliothek zur Verfügung gestellt. Die in AutomationDesk vorkonfigurierten Tests können wiederum die in ModelDesk erstellte Szenarienbibliothek geeignet nutzen und parametrieren. Die Ausführung der Tests erfolgt auf der virtuellen Simulationsplattform VEOS® oder auf einem HIL-Simulator. Der Verlauf der Simulation lässt sich live mit MotionDesk, dem 3D-Visualisierungswerkzeug von dSPACE, überwachen.

7. Zentrale Testverwaltung, -planung und -ausführung

Durch die zentrale Verwaltung der Euro-NCAP-Testprotokolle und der bereitgestellten Tests in SYNECT Test Management wird ein durchgängiger Testprozess gewährleistet. Die Verlinkung der Tests mit den zugrunde liegenden Testszenarien und -spezifikationen ermöglicht die direkte Überprüfung, ob alle geforderten Szenarien und Spezifikationen durch entsprechende Tests abgedeckt sind und bereits erfolgreich abgesichert wurden (siehe Abbildung 3).

Requirements Coverage

Overview

Details

Coverage Summary

Total number of elements:

38

Relevant for calculation:

4

Linked to test case:

4 (100%)

Verdict Summary

Relevant for calculation:

4

Linked to test case:

4 (100%)

Crashed:

0 (0%)

Exception:

0 (0%)

Failed:

2 (50%)

Undefined:

0 (0%)

Blocked:

0 (0%)

Skipped:

0 (0%)

Passed:

2 (50%)

NoResult:

0 (0%)

Not executed:

0 (0%)

Not linked to test case:

0 (0%)

Requirements Coverage

Overview

Details

The performance of the VUT A/E:

For testing purposes, assume a:

1.2.1 CCRn test scenario: VUT A/E:

1.2.2 CCRn test scenario: VUT A/E:

1.2.3 CCRn test scenario: VUT A/E:

1.2.4 CCRn test scenario: VUT A/E:

1.2.4.1 CCRn AEB City: The CCRn City tests will be performed with 5 km/h or 10 km/h.

1.2.4.2 CCRn AEB Inter-Urban: The CCRn Inter-Urban tests will be performed with 5 km/h.

1.2.4.3 CCRn AEB Inter-Urban: The CCRn Inter-Urban tests will be performed with 5 km/h.

1.2.4.4 CCRn AEB Inter-Urban: The CCRn Inter-Urban tests will be performed as a fixed.

The desired deceleration of the EVT shall be reached within 1.5 seconds and shall not be:

1.3 Test Condition

Before every test run, drive the VUT around a circle of maximum diameter 30m at a speed:

For vehicles with an automatic transmission select 2. For vehicles with a manual trans:

Perform the first test a minimum of 30s and a maximum of 10 minutes after completing B.

1.4 Test Execution

Single Line Description

Structure Type

Test Cases

Last Verdict

1.2.4 Scenario test specifications

Full Test

1.2.4.1 CCRn AEB City: The CCRn City tests will be performed with 5 km/h or 10 km/h.

Test Specification

1

Passed

1.2.4.2 CCRn AEB Inter-Urban: The CCRn Inter-Urban tests will be performed with 5 km/h.

Test Specification

2

Failed

1.2.4.3 CCRn AEB Inter-Urban: The CCRn Inter-Urban tests will be performed with 5 km/h.

Test Specification

3

Passed

1.2.4.4 CCRn AEB Inter-Urban: The CCRn Inter-Urban tests will be performed as a fixed.

Test Specification

3

Failed

The desired deceleration of the EVT shall be reached within 1.5 seconds and shall not be:

Acceptance Criterion

1.3 Test Condition

Full Test

Before every test run, drive the VUT around a circle of maximum diameter 30m at a speed:

Full Test

For vehicles with an automatic transmission select 2. For vehicles with a manual trans:

Full Test

Perform the first test a minimum of 30s and a maximum of 10 minutes after completing B.

Full Test

1.4 Test Execution

Full Test

Name	Description	Last Verdict	Last Execution Date	Links	Execution Environment	# Test Case Results	Variant Dependencies
TestScenario_InterUrban_CCRn_AEBCity		Passed	04.02.2016 11:10:58	CCRn AEB Inter-Urban	AutomationDesk	2 AEB AEB and FCHV	
TestScenario_InterUrban_CCRn_FCHV		Failed	04.02.2016 10:08:08	CCRn AEB Inter-Urban	AutomationDesk	2 FCHV AEB and FCHV	

Results of TestScenario_InterUrban_CCRn_FCHV

Name	Description	Links	Execution Environ	Verdict	Reviewed	Execution Duration	Date	Comment
TestScenario_Inter			AutomationDesk	Passed	<input checked="" type="checkbox"/>	00:07:49	04.02.2016 10:39:17	
TestScenario_Inter			AutomationDesk	Passed	<input checked="" type="checkbox"/>	00:07:57	23.02.2016 16:35:50	
TestScenario_Inter			AutomationDesk	Failed	<input checked="" type="checkbox"/>	00:08:03	04.02.2016 10:08:08	

Bild 3: Analyse der Anforderungsabdeckung

Die einzelnen Testfälle, die benötigt werden, um bestimmte Euro-NCAP-Szenarien zu testen, sind in SYNECT zu Testplänen zusammengefasst. Es gibt Testpläne, um einzelne Teilbereiche zu testen, zum Beispiel das Verhalten des Notbremsassistenten bei der Annäherung auf ein stehendes Fahrzeug bei niedrigen Geschwindigkeiten (AEB City) sowie Testpläne, um ein Testprotokoll komplett zu testen und damit eine Einschätzung der zu erwartenden Bewertung, dem Euro NCAP Score, zu erreichen.

Testausführungen können in SYNECT zentral vorgeplant, aber auch ad hoc angestoßen werden. Im Rahmen einer zentralen Planung ist es möglich, die Testausführungen auf eine Reihe verfügbarer Testsysteme zu verteilen, zum Beispiel auf diverse VEOS-PCs oder entsprechende HIL-Simulatoren, und somit parallel vollautomatisierte Übernacht- oder Wochenendtests durchzuführen.

Während einer Testausführung wird AutomationDesk automatisch gestartet und die weiteren Komponenten der Testumgebung mittels geeigneter Bibliotheken ferngesteuert. Dabei ist stets für die Euro-NCAP-konforme Auswahl, Parametrierung, Durchführung, Bewertung und detaillierte Protokollierung der einzelnen Testszenarien gesorgt.

Im Rahmen des Testdurchlaufs werden die Ergebnisse in AutomationDesk ermittelt und ausgewertet. So entsteht neben einem Passed/Failed Verdikt auch ein Report, der detaillierte Testergebnisse und den berechneten Euro NCAP Score für das gewählte Szenario enthält. Die Testergebnisse werden automatisch in SYNECT Test Management übernommen (siehe Abbildung 1) und stehen somit über alle Projektphasen sowie für die unterschiedlichen Testplattformen zentral für Monitoring und Analysen zur Verfügung. Die im Test Management verwalteten Testergebnisse können zudem direkt in Abdeckungsanalysen einbe-

zogen werden. So kann zum Beispiel jederzeit nachvollzogen werden, ob die in den Euro-NCAP-Testprotokollen spezifizierten Szenarien erfolgreich getestet wurden oder ein Fehler aufgetreten ist.

8. Offenheit und Automatisierbarkeit

Allgemein gilt, dass die dargestellte Werkzeugkette offen und der Austausch einzelner Werkzeuge möglich ist, zum Beispiel der Einsatz eines anderen bereits verwendeten Testwerkzeuges. Insgesamt muss ein nahtloses Zusammenspiel der einzelnen Komponenten und Werkzeuge gegeben sein.

Unabdingbar ist hierbei auch, dass die eingesetzten Werkzeuge über ausreichend Automatisierungsschnittstellen (APIs) verfügen und in Summe ein hoher Automatisierungsgrad erreicht wird, um die vorgegebenen Tests im Labor effizient durchführen zu können.

Dieser Aspekt ist umso wichtiger, da in der Praxis zur systematischen Absicherung und Erreichung der nötigen Robustheit eines aktiven Sicherheitssystems wie des Notbremsassistenten natürlich umfangreiche weitere Tests durchgeführt werden. Generell wird gerade mit Blick auf das hoch- oder gar vollautomatisierte Fahren und die für die Absicherung der eingesetzten Systeme im Raum stehenden Millionen von Testkilometern, die „gefahren“ werden müssen, klar, welchen Stellenwert der Einsatz von Simulation, Effizienz und Automatisierbarkeit künftig haben wird.

9. Zusammenfassung

Die systematische Absicherung von Fahrerassistenzsystemen ist allein durch reale Testfahrten auf der Straße nicht mehr zu bewältigen und wird mindestens ergänzend durch virtuelle Testfahrten per Simulation erfolgen.

In Verbindung mit einem zentralen Daten- und Testmanagement bekommt der Anwender für die durchgeführten Simulationen die Nachvollziehbarkeit von der Anforderung bis zum detaillierten Testergebnis, die insbesondere im Kontext der ISO 26262 gefordert wird. Weiterhin erleichtert ein zentrales Datenmanagement die Wiederverwendung von Tests und Szenarien in anderen Projekten und vereinfacht allgemein sowohl die Zusammenarbeit im Team als auch über Entwicklungsphasen hinweg. Neben der vollen Automatisierbarkeit ein weiterer wesentlicher Aspekt, um neue Systeme effizient absichern und in der begrenzt zur Verfügung stehenden Zeit an den Markt bringen zu können.

Aktive Aufbauneigung als Rückmeldekanal bei Querführungsassistenz über entkoppelte Lenkaktorik

Dipl.-Ing. **C. Müller**, Dr.-Ing. **K.-H. Siedersberger**,
AUDI AG, Ingolstadt;
Prof. Dr. **B. Färber**, Prof. Dr. **M. Popp**,
Universität der Bundeswehr, München

Kurzfassung

Eingriffe von Fahrerassistenzsystemen (FAS) mittels Lenkmomentenüberlagerung sind mit Nachteilen verbunden (z.B. Fahrerbevormundung). Hingegen stoßen entkoppelten Eingriffe aufgrund der fehlenden Rückmeldung zum Fahrer auf geringe Akzeptanz. Dieser Beitrag stellt ein neuartiges Rückmeldekonzept für FAS-Eingriffe vor. Hierbei steuert das FAS neben dem Lenkaktor ein aktives Fahrwerk an, welches einen Wankwinkelverlauf erzeugt, der die eingriffsrelevanten Informationen zum Fahrer überträgt. Das Konzept wird auf die Funktion "Fahrstreifenmittenführung" angewandt und mittels einer Studie auf der Autobahn evaluiert, wobei sowohl die Eignung der Fahrzeugquerneigung als Rückmeldekanal als auch Vorteile in der gemeinsamen Fahrzeugführung nachgewiesen werden konnten.

Abstract

Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) using additional steering wheel torque to influence lateral vehicle control have disadvantages (e.g. haptic overload). Moreover, steering actuator which do not report back to the steering wheel can rarely be used because steering intervention without feedback is not accepted by the driver. This paper presents the use of chassis roll as a new way to feedback decoupled steering interventions. Hence, ADAS control besides the steering actuator also an active suspension to adjust the tilting angle. The concept was applied as Lane Keeping Assist and evaluated in an experiment with 36 subjects among usual traffic on a highway. Ability for chassis roll as information carrier and advantages in shared control of the vehicle could be shown.

1. Einleitung

Automobilhersteller bieten in heutigen Fahrzeugen zahlreiche Fahrerassistenzsysteme (FAS) an, die aktiv in die Fahrzeugführung eingreifen. Der Fahrer trägt weiterhin die Verantwortung über die Fahrzeugführung und übt diese gemeinsam mit dem FAS aus. Dies kann auf „alternative“ oder „simultane“ Weise erfolgen [1]. Bei „alternativer“ Ausübung der Fahraufgabe

überträgt der Fahrer die Durchführung einer Teilaufgabe gänzlich an das FAS. Der Fahrer ist in Bezug auf diese Teilaufgabe fortan nur noch überwachend tätig (Beispiel: Adaptive Geschwindigkeitsregelung). Dagegen versteht man unter „simultaner“ Ausführung einer Teilaufgabe, dass diese zur gleichen Zeit vom Fahrer als auch vom FAS ausgeführt wird. Das FAS unterstützt dabei den Fahrer bei seiner Tätigkeit (Beispiel: Aktives Spurhaltesystem). Während die Hauptaufgabe des Fahrers bei der alternativen Variante in der Überwachung und wenn nötig der Übernahme der assistierten Teilaufgabe liegt, steht im Fall der simultanen Variante der Einbezug des Systemverhaltens in die Fahrzeugführungsaufgabe des Fahrers im Vordergrund. In beiden Fällen ist es essentiell, dass das FAS dem Fahrer geeignete Informationen über den Eingriff zur Verfügung stellt. Der vorliegende Beitrag stellt ein neuartiges Konzept zur Übertragung dieser Informationen vor. Hierbei werden ausschließlich FAS betrachtet, die in die Querverführung des Fahrzeugs eingreifen. Zunächst wird ein Überblick über bestehende Konzepte gegeben.

2. Bestehende Konzepte querführender Fahrerassistenzsysteme

FAS, die in die Querverführung des Fahrzeugs eingreifen, sind meist in simultaner Struktur angelegt und können nach Systemen mit oder ohne Summenpunkt unterschieden werden. Im Summenpunkt treffen die Intentionen von Fahrer und FAS aufeinander. Der Fahrer spürt die Intention des FAS, kann sie korrigieren oder übersteuern [1]. Als Summenpunkt kann ein aktives Bedienelement, z.B. das Lenkrad dienen. Systeme ohne Summenpunkt überlagern die Eingriffe von FAS und Fahrer an der Querverführungsaktorik, was für den Fahrer nicht spürbar ist. Es sind daher alternative Konzepte erforderlich, um die geforderte Informationsübertragung an den Fahrer bereitzustellen.

Im Summenpunkt „Lenkrad“ erfolgt die Überlagerung der Intentionen lenkmomentenbasiert. Der aus Fahrerhandmoment, Rückmeldemoment (Fahrzustand) und dem überlagerten Moment des FAS resultierende Lenkwinkel hängt stark von der Situation und der Überlagerung selbst ab und ist daher schwer vorhersehbar. Zudem werden FAS-Eingriffe in der Regel durch den Fahrer verstärkt oder abgeschwächt, was das Stellen präziser Winkel zusätzlich erschwert [2]. Die Kompensation des FAS-Eingriffs ist hingegen sehr einfach möglich, da der Fahrer das Lenkrad lediglich festhalten muss. Aus Sicht des Fahrers ist nachteilig, dass die Informationen aus Fahrzustand (Reibwert, Haftgrenze) und FAS-Eingriff lediglich in Summe wahrgenommen werden können (s. Bild 1). Sind diese Lenkmomente nicht klar voneinander abgrenzbar, wird die Trennung und Zuordnung der jeweiligen Informationen beeinträchtigt. Zudem kann die kontinuierliche Überlagerung von Lenkmomenten vom Fahrer als störend empfunden werden [3]. Vorteilhaft an der haptischen Übertragung ist hingegen, dass die

Information sehr schnell, unabhängig von der Blickrichtung und ausschließlich vom Fahrer wahrgenommen wird [4].

Kennzeichnend für den Summenpunkt Lenkrad ist, dass sämtliche FAS-Eingriffe mit dem Fahrer abgestimmt werden. Dies begrenzt die Amplitude der Eingriffe nach unten (Losbrechmoment) und oben (physische Gefahr für Hände am Lenkrad, Misinterpretation Fahrverantwortung [2]. Auch die Frequenz der Eingriffe ist dadurch nach oben beschränkt (Haltereflex, Reaktionszeit des Fahrers). Zudem ist keine assistierende Lenkwirkung möglich, wenn der Fahrer das Lenkrad unabsichtlich festhält (Sekundenschlaf, Blickabwendung) [5].

In der einfachsten Umsetzung des Konzepts ist das Bedienelement Lenkrad fest mit einem Lenkaktor gekoppelt (z.B. elektrische Servolenkung). Da nur ein Freiheitsgrad existiert, um Rückmeldung als auch Eingriff zu entwerfen, müssen beiderseits Kompromisse eingegangen werden. In anderen Umsetzungen steuert das Bedienelement einen oder mehrere entkoppelte Querführungsaktoren an (Analogie: Gaspedal bei Hybridfahrzeugen). Die Entkopplung erlaubt es dabei einige Nachteile des Summenpunkts "Lenkrad" abzumildern. Beispielsweise stellt [6] eine Ausweichunterstützung vor, die nur einen proportionalen Teil des Eingriffes am Lenkrad zurückmeldet. Hierdurch wird die physische Gefahr für die Fahrerhände am Lenkrad verringert, wohingegen die Vorteile des Konzepts erhalten bleiben (z.B. einfache Überstimmbarkeit des Eingriffs). Der nicht über das Lenkrad zurückgemeldete Teil des Eingriffs würde eigentlich zur Inkonsistenz zwischen erwarteter und tatsächlicher Fahrzeugbewegung führen und die Akzeptanz des Systems reduzieren [7]. Vermutlich tritt dieser Aspekt jedoch auf Grund der hochdynamischen Ausweichsituation und des dabei ohnehin nichtlinearen Fahrzustands in den Hintergrund.

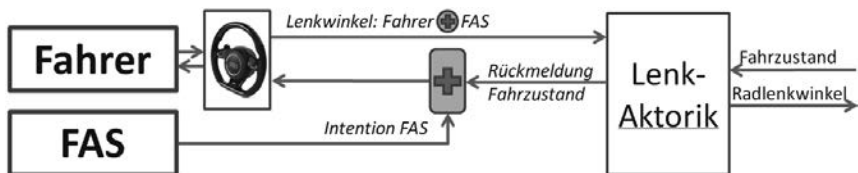


Bild 1: Informationsfluss von FAS mit Summenpunkt im Lenkrad

In Systemen ohne Summenpunkt besitzen Fahrer und FAS einen separaten Durchgriff auf die Stabilisierungsebene. Beide Akteure fordern von der Querführungsaktorik einen Lenkwinkel an, wobei deren Summe die Fahrzeugreaktion bestimmt. Je nach Aktorik kann direkt der Summenlenkwinkel oder die Anforderungen separat über mehrere Aktoren gestellt

werden. Das Lenkrad wird vom FAS nicht beeinflusst, sodass das Lenkgefühl im engeren Sinne erhalten bleibt. Der automatische Durchgriff auf die Querführungsaktorik erlaubt es dem FAS winkelbasierte Eingriffe in hoher Frequenz zu stellen (präzise Stellwinkel, geringe Regelzeitkonstante) und auch bei unabsichtlicher Fahrereingabe zu assistieren (Sekundenschlaf, versehentliche Lenkeingabe). Da das Konzept zur Rückmeldung und Abstimmung der FAS-Eingriffe über das aktive Bedienelement entfällt, werden alternative Konzepte genutzt, die bislang jedoch nur einen Teil des Eingriffspektrums abdecken.

[7] und [8] stellen eine Spurmittenführung vor, welche ausschließlich Stelleingriffe geringer Amplitude über entkoppelte Lenkaktoren abwickeln. Der Unterschied zwischen Lenkradstellung und Fahrzeugbewegung ist vom Fahrer nicht wahrnehmbar und daher nicht inkonsistent. Zudem kann er die gestellten Winkel auch ohne explizite Rückmeldung überlenken (max $0,3^\circ$ Radlenkwinkel [9]), weswegen in diesem Fall kein alternatives Rückmeldekonzepkt benötigt wird.

Ein weiteres FAS ohne Summenpunkt ist die Spurverlassensverhinderung über einseitigen Bremsengriff. Dieses nutzt die Bremse als entkoppelten Querführungsaktor und die resultierende Fahrzeugbewegung als vestibuläre Rückmeldung des Eingriffs. Die Eingriffsdauer wird auf die Reaktionszeit des Fahrers beschränkt (200ms, [1], [4]) und der Eingriff abgebrochen, falls Fahreraktivität festgestellt wird [1]. Dies stellt sicher, dass der Eingriff und die hervorgerufene Fahrerreaktion nicht zeitgleich sondern aufeinander folgend stattfinden. Die unkomfortable Rückmeldung motiviert den Fahrer zur nachträglichen Kontrolle des Eingriffs, wobei die Beschränkung des Giermoments und der Eingriffsdauer sicherstellen, dass dieser auch im Nachgang überlenkbar bleibt. Vorteilhaft ist, dass die Rückmeldungen der Lenkeingriffe von Fahrer (Lenkmoment) und FAS (vestibulär) nicht als Summe, sondern separat wahrgenommen werden. Auf Grund der Aktorwahl und des entstehenden Diskomforts ist das Konzept jedoch auf seltene und kurzzeitige Eingriffe beschränkt.

Dem Autor ist kein Konzept für lang andauernde, spürbare Eingriffe bekannt. Die Vorteile entkoppelter FAS-Eingriffe können daher bisher nur in einem Teil der FAS genutzt werden.

3. Aktive Aufbauneigung als Rückmeldekanal bei entkoppelten FAS-Eingriffen

Wie bisher gezeigt, weisen die existierenden Rückmeldekonzepkte eine Reihe von Schwächen auf. Im folgenden Kapitel wird daher ein neuartiges Rückmeldekonzepkt für entkoppelte FAS-Eingriffe präsentiert. Kern des Konzeptes ist es mittels aktiver Fahrwerke Bewegungen in den Fahrzeugaufbau einzubringen, welche der Informationsübertragung an den Fahrer dienen.

Aufbaubewegungen sind bisher meist Folge von Fahrzeugbeschleunigungen und werden nicht als Anzeige im eigentlichen Sinne verstanden [10]. Aktive Fahrwerke werden meist zu deren Kompensation eingesetzt (Wankstabilisierung, Bodenunebenheiten [11]). In [12] und [13] hingegen werden diese genutzt, um den Fahrzeugaufbau zur Kurveninnenseite zu neigen und so Fahrspaß und Fahrkomfort zu erhöhen. Der Neigewinkel wird dabei an die Fahrereingabe bzw. den Straßenverlauf gekoppelt und bleibt somit Repräsentant der aktuellen Fahrsituation. Das vorliegende Konzept hingegen betrachtet den Neigewinkel als Freiheitsgrad, der weitgehend unabhängig von der aktuellen Fahrsituation eingeregelt werden kann. Er steht damit dem FAS als Kanal zur Informationsübertragung zur Verfügung.

3.1. Eignung der Fahrzeugquerneigung als Rückmeldekanal

Gemäß [1] muss eine geeignete Rückmeldung unmittelbar der Fahraufgabe zugeordnet werden können. Da das Wankverhalten bereits Informationen über den aktuellen Fahrzustand übermittelt, wird dies als gegeben angesehen. Um den bestehenden Informationsfluss aufrechtzuerhalten und der Erwartungskonformität des Fahrers zu entsprechen, muss das reaktive Wanken bei Fahrereingabe in gleichem Maße bestehen bleiben. Damit die primäre externe Kompatibilität der Rückmeldung gewährleistet wird, muss die Neigung stets in Richtung des Eingriffs zeigen. Eine Drehung des Fahrzeugaufbaus nach rechts entspricht somit einer Fahrzeugbewegung nach rechts und ist kompatibel zur Lenkraddrehung nach rechts. Da der Zusammenhang "Neigung nach rechts – Bewegung nach rechts" bereits aus anderen Bereichen bekannt ist (Fahrrad, Skifahren, Hangabtriebskraft) wird auch die innere Kompatibilität gewahrt sowie die einfache Übertragbarkeit der Informationen auf die Realität begünstigt.

Die gewählte Neigungsrichtung vereinfacht zudem die Abgrenzbarkeit von reaktiven und FAS initiierten Wankbewegungen. Auf Grund der Entkopplung von Eingriff und Rückmeldung kann zudem die Amplitude der FAS-Rückmeldung so gewählt werden, dass beide Informationen deutlich unterschieden werden können.

Weiterhin fordert [1], dass die Rückmeldung ausreichend spürbar sein muss. Wankwinkel können multimodal über den optischen, vestibulären und haptischen Kanal wahrgenommen werden. Optisch ist die Wahrnehmung nur relativ zur Umwelt, jedoch unabhängig von der Blickrichtung möglich (z.B. durch das Seitenfester). Hervorzuheben ist, dass die Wahrnehmung im primären Sichtfeld und ohne Blickabwendung von der Straße bzw. ohne zusätzliche Fixation der Augen erfolgen kann. Angemerkt sei, dass mit dem Fahrzeuginnenraum auch das Lenkrad relativ zur Umwelt gedreht wird und somit in Richtung des Eingriffs zeigt. Unabhängig von der Blickrichtung wird die Fahrzeugquerneigung vestibulär über die

Wankbeschleunigung/-rate sowie über die aus Neigungswinkel und Fliehkräften resultierende Querbeschleunigung wahrgenommen. Die Wankbeschleunigung induziert in Abhängigkeit der gewählten Wankachse [14] eine zusätzliche Quer- und Vertikalbeschleunigung auf die Insassen, die vestibulär und haptisch [4] wahrnehmbar ist.

Die Entkopplung von Rückmeldung und Eingriff ermöglicht, dass auch deren zeitlicher Zusammenhang als Freiheitsgrad nutzbar wird. So kann eine vorausseilende Rückmeldung vermutlich die Reaktionszeit des Fahrers reduzieren.

Die multimodale Informationsübertragung über kaum genutzte Kanäle verspricht hohe Leistung bei der Informationsaufnahme [16]. Zudem ist es möglich einzelne Modalitäten gezielt in den Vordergrund zu rücken, um die Informationsaufnahme situativ anzupassen. Handelt es sich um ad-hoc Informationen, kann die Detektionszeit durch die Erhöhung der Wankbeschleunigung verkürzt werden (1s bei $1^\circ/\text{s}^2$, $100\text{--}150\text{ms}$ bei $10^\circ/\text{s}^2$ [17]). Nach [3] ist jedoch darauf zu achten, dass die Rückmeldung keine unerwünschten oder schreckhaften Reaktionen beim Fahrer auslöst. Zudem ist ein Kompromiss zwischen gut spürbarem Informationsfluss und erzeugtem Diskomfort für Fahrer und Mitfahrer zu finden. Eine Ausnahme stellt [13] dar, der den Fahrkomfort durch die Fahrzeugquerneigung erhöht, indem er sämtliche Querbeschleunigungen bei vollautomatisierter Fahrt kompensiert. Übertragen bedeutet dies, dass sich die Informationsübertragung zwar auf den optischen Kanal reduziert, jedoch FAS-Eingriffe möglich werden, die von den anderen Insassen weitgehend unbemerkt bleiben [13].

3.2 Interaktion zwischen Fahrer und FAS

Das vorgestellte Konzept ist ein "shared-control" Ansatz. Da kein Informationsfluss vom Fahrer zum FAS erfolgt (s. Bild 2), werden die Lenkeingaben des Fahrers vom FAS als Störgrößen betrachtet und können nicht in dessen Regelstrategie einbezogen werden (z.B. Abbruch von Falschauslösung). Die entstehende Konkurrenz um die Fahrzeugbewegung wird durch eine Begrenzung des maximalen FAS-Lenkswinkels als beherrschbar gestaltet. Der Fahrer kann frei wählen wie aktiv er an der gemeinsamen Fahrzeugführung teilnehmen möchte. Er kann aktiv mitlenken oder den Eingriff lediglich überwachen. Das Konzept ist demnach eine Mischform aus simultaner und alternativer Fahrzeugführung (s. Kap. 1), weswegen auch die Fehlerwahrscheinlichkeit je nach Fahreraktivität eher bei simultanen oder alternativen Systemen liegt.

Das erschließbare Eingriffsspektrum ist maßgeblich von der Qualität der Rückmeldung abhängig. Diese muss Konsistenz der Eingriffe gewährleisten und den Fahrer wenn nötig durch rechtzeitige (vorausseilend) und präzise Information (Eingriffstärke) zur Einbringung eines

passenden Korrekturwinkelverlaufs anleiten. Da zu beiden Aspekten keine Erkenntnisse vorliegen, kann das Eingriffsspektrum nicht quantifiziert werden.

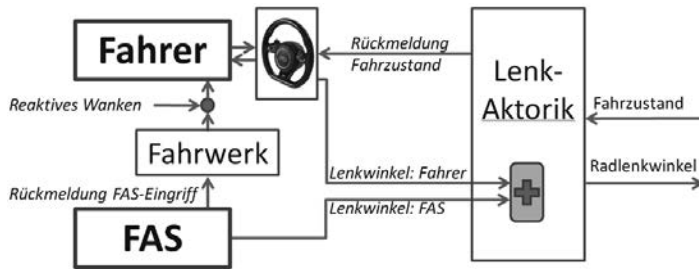


Bild 2: Informationsfluss bei entkoppeltem FAS-Eingriff und Rückmeldung über Fahrzeugquerneigung

3.3. Anwendung des Konzepts auf die Funktion Fahrstreifenmittenführung

Ein Beispiel für ein FAS, welches das betrachtete Eingriffsspektrum nutzt, ist die Fahrstreifenmittenführung. Um auch enge Radien und andere Regelungsarten des Fahrers untersuchen zu können (Beschleunigungs- statt Lage- und Geschwindigkeitssteuerung [18]), wird zudem eine getriggerte aktive Fahrstreifenwechselunterstützung betrachtet.

Auf Grund des Zielkonflikts "Konsistenz vs. Aufbauunruhe", werden nur Eingriffe zurückgemeldet, die Inkonsistenzen hervorrufen (nach [7] größer als mindestens 2° Lenkradwinkel). Naheliegender ist den Eingriff über eine Größe zu repräsentieren, die dem Fahrer bereits als Eingangsgröße aus der Querverführung bekannt ist. Beispielsweise kann der Wankwinkel identisch zur Höhe des Lenkradwinkelverlaufs gewählt werden, welcher denselben Eingriff hervorrufen würde. Die Drehung bzw. Stellung des Lenkrads relativ zur Umwelt erfolgt damit bereits konform zur Erwartung aus manueller Fahrt (Ausrichtung auf aim-point [18]), weswegen auch im monitiven Betrieb kein zusätzlicher Fahrerlenkwinkel benötigt wird. Zur Kompensation des FAS-Eingriffs muss das Lenkrad zudem lediglich bei 0° relativ zur Umwelt gehalten werden. Nachteilig ist hingegen, dass vor allem bei niedrigen Geschwindigkeiten Diskomfort durch Überkompensation der Querbewegung droht [13].

Andere Größen beziehen sich auf die Querverwirkung des Eingriffs. Beispielsweise kann die Querbewegung, welche der FAS-Eingriff (ohne Zutun des Fahrers) hervorruft, zur Quantifizierung der Eingriffe genutzt werden. Die Neigung wird so stark ausgeprägt, dass die Querbewegung vollständig kompensiert wird, sodass die Vorteile aus [13] erschlossen werden können (Erhöhung von Komfort und Konditionssicherheit, Erleichterung von Neben-

tätigkeiten, Minderung des Risikos von Reisekrankheit). Zudem wird hohe innere Kompatibilität gewahrt, da bereits zahlreiche Modelle (z.B. Radfahren, Sprint) über den querkraftfreien Zustand vorhanden sind. Von z.B. Fahrradlenker, Steuerknüppel des Flugzeugs ist zudem ist bekannt, dass sich das Bedienlement relativ zum Innenraum nicht bewegt und dessen Stellung relativ zur Umwelt die Querwirkung anzeigt.

Das aus Fahrsimulatoren ohne vestibuläre Rückmeldung bekannte Phänomen eines überzogenen Lenkverhaltens [18] wird hier nicht erwartet, da Fahrereingaben auch weiterhin Querbeschleunigungen und Wanken hervorrufen. Ebenso ist eine Erhöhung der Reaktionszeit auf externen Störgrößen [19] nicht zu erwarten, da diese entweder querkraftfrei kompensiert werden oder unkompensiert aber vestibulär spürbar bleiben. Die im Simulator beobachtete Tendenz zu hoher Geschwindigkeit [18] ist jedoch auch hier denkbar und muss in der Praxis untersucht werden.

Angemerkt sei, dass die Straßenquerneigung im Gegensatz zu [13] nicht berücksichtigt wird und daher kein vollständig querkraftfreier Zustand erreicht wird. Die Neigung muss so ausgeprägt werden, dass sie auch in Summe mit der Querneigung nicht zu Überkompensation führt. Gemäß [13] soll sie dem Eingriff leicht vorauslaufen, was auch im Hinblick auf die Reaktionszeit des Fahrers sowie die rechtzeitige Lenkradausrichtung zum aim-point positiv zu sehen ist. Eine zeitliche Diskrepanz von 200ms darf jedoch nicht überschritten werden, damit Eingriff und Rückmeldung noch als zusammengehörig wahrgenommen werden [10]. Die Forderung nach unterscheidbaren Amplituden des FAS initiierten und reaktiven Wankens ist mit der gewählten Neigung vermutlich erfüllt (ca. Faktor 10 im Versuchsfahrzeug aus Kap. 4). Während die bisherig geschilderten Sachverhalte vorwiegend den monitiven Betrieb betreffen, wird im Folgenden das aktive Mitlenken des Fahrers betrachtet. Sobald der Fahrer gegen das FAS lenkt, erhöht dieses den Lenkwinkel in gleichem Maße, um sein Ziel dennoch zu erreichen. Da die Neigung an die (potentielle) Querwirkung des FAS-Eingriffes gekoppelt ist, wird auch diese erhöht. Für den Fahrer stellt sich dieser Zusammenhang sehr anschaulich als Fahrt innerhalb einer "Wanne" oder "Bobbahn" dar, welche entlang des Fahrschlauchs verläuft. Lenkt der Fahrer, so wird das Fahrzeug an die "Seitenwand" der Bobbahn (Neigung) und weiterhin in dessen Richtung geführt (Fahrereingabe durch FAS kompensiert). Lässt der Fahrer das Lenkrad los, so "rutscht" das Fahrzeug die "Seitenwand" hinab (Abbau von FAS Gegenlenken und Neigung) und wird nunmehr in der Mitte der Bobbahn geführt. Besitzt der Regler des FAS einen integrativen Teil, so erhält "Schräge" der Seitenwand eine zeitliche Komponente, die es dem Fahrer zunehmend erschwert gegen das FAS zu steuern (Lenkwinkel, Lenkmoment, Diskomfort). Das Überlenken des FAS-Eingriffes wird als Überfahren der Seitenwand der Bobbahn wahrgenommen. Beispielsweise kann ein

“hinabrutschen” in die Wanne des Nachbarfahrstreifens emuliert werden. Beim aktiven Fahrstreifenwechsel krümmt sich die Bobbahn entlang der Fahrstreifenwechseltrajektorie des FAS und geleitet das Fahrzeug in den neuen Fahrstreifen. Vorteilhaft ist, dass diese Metapher auf kompatible Weise (Fahrt am quergeneigten Hang) veranschaulicht, wieso das Fahrzeug bei entkoppelten FAS-Eingriffen trotz Einbringung eines Lenkwinkels und –moments nicht giert.

4. Probandenstudie im Realverkehr

Ziel der Probandenstudie ist die Evaluierung der zentralen Anforderungen an ein Konzept zur simultanen Fahrzeugführung.

- Ist das Rückmeldekonzepthalt wahrnehmbar und assoziierbar?
- Ist die Überlenkbarkeit der Eingriffe gewährleistet?
- Wie erlebt der Fahrer die gemeinsame Fahrzeugführung?

4.1. Methodik

Der Versuch wird auf der Autobahn A96 zwischen München und Landsberg am Lech durchgeführt (ca. 2x 55km). Der betrachtete Abschnitt besitzt je Richtung zwei Fahrstreifen, ist kurvenreich und zum Teil auf 80km/h bzw. 120km/h beschränkt. FAS zur Unterstützung der Längsführung sind deaktiviert, wohingegen die betrachtete Fahrstreifenmitteführung und aktive Fahrstreifenwechselassistenten stets aktiv sind.

Das Szenario zum “Erlebnis der gemeinsamen Fahrzeugführung” besteht aus ca. 10min Fahrstreifenfolgefahrt mit 120km/h im kurvenreichen Autobahnabschnitt. Zur Evaluierung des Rückmeldekonzepths und der Überlenkbarkeit wird der Proband bei 80km/h und 120km/h jeweils zweimal gebeten den Fahrstreifen trotz aktiver Fahrstreifenmitteführung zu wechseln. Die beiden FAS werden als “Summenpunkt Bedienlement” und in dem vorgestellten Konzept (fortan Konzept “Neigung”) umgesetzt und gegenübergestellt.

Die genannten Szenarien sind Teil einer umfangreicheren Studie, wobei Erwartungseffekte auf Grund der anderweitigen Untersuchungen ausgeschlossen werden können, da die hier betrachteten Szenarien zu Beginn der Studie durchfahren und bewertet werden.

Die Operationalisierung der Wahrnehmbarkeit und Assoziierbarkeit der Rückmeldung sowie der Überlenkbarkeit des Eingriffs erfolgt subjektiv über die Bewertung der Aussagen (1) “Das Fahrzeug wehrte sich gegen den Spurwechsel” und (2) “Die Spur von Hand zu wechseln war schwierig” auf einer 5-Punkte-Skala. Hinsichtlich der Überlenkbarkeit wird zusätzlich erfasst, wieviele Fahrer den Wechsel tatsächlich durchführen konnten. Das Erlebnis der gemeinsamen Fahrzeugführung wird ebenfalls subjektiv auf einer 5-Punkte-Skala bewertet: (1)

Das Fahrzeug hielt die Spur immer genau ein, (2) Das Fahrzeug pendelte hin und her, (3) Das Fahrzeug fährt zu nah am Rand der Spur, (4) Das Fahrzeug reagierte eher schwerfällig, (5) In der Spur von Hand zu lenken war schwierig, (6) Das Fahrzeug wehrte sich gegen bestimmte Lenkbewegungen. Zusätzlich werden hochfrequente Lenkradbewegungen über die mittlere Lenkradgeschwindigkeit und die Lenkradrichtungswechselrate erfasst, welche nach [20] als Indikator für die Qualität der gemeinsamen Fahrzeugführung dienen.

Das Versuchsfahrzeug ist ein Audi A5, welcher mit einem prototypischen vollaktiven Fahrwerk ausgestattet ist. Die FAS-Funktionen arbeiten auf Basis der Bildverarbeitung der serienmäßigen Frontkamera. Als Rückfallebene werden für jeden Fahrstreifen mittige Referenzbahnen vermessen und hinterlegt. Zur Versuchsauswertung werden Signale des CAN-Bus (100Hz) sowie Videos von Fahrer, dessen Handhaltung und das Bild der Frontkamera aufgezeichnet.

Das Konzept "Neigung" wurde technisch nur mit Einschränkungen umgesetzt. Eingriff und Neigewinkel sind fest miteinander gekoppelt, da die kinematische Spur-Sturz-Verstellung in Abhängigkeit des Federwegs bzw. der Neigung als entkoppelter Lenkaktor für das FAS dient (Wanklenken). Es werden daher sämtliche Eingriffe rückgemeldet und der querkraftfreie Zustand nur bei passender Geschwindigkeit und Straßenquerneigung erzielt. Gemäß der Forderung aus [13] eilt die Neigung dem Eingriff (Basis: Gierrate) leicht voraus (ca. 100ms, Grund: u.a. Reifeneinlauf) und erreicht maximal 4,3° bzw. 10,5°/s. Um die Vergleichbarkeit des Konzepts "Summenpunkt Bedienelement" zu gewährleisten, wird auch in diesem kein Informationsfluss vom Fahrer zum FAS implementiert. Im Gegensatz zu Seriensystemen erfolgt somit keine Anpassung des FAS-Lenkmoments an den Fahrerwunsch. Die Begrenzung des Lenkmoments hingegen entspricht dem Serienstand bei Audi.

Zu Beginn des Versuchs werden mittels Fragebogen demographische Daten, Fahrerfahrung und Vorkenntnisse im Bereich FAS erfasst. Anschließend wird die Funktionsweise der beiden FAS-Funktionen erklärt und die Probanden machen sich durch einfache Fahrmanöver auf einem Testgelände mit dem Fahrzeug vertraut. Während der Anfahrt zur A96 (ca. 45min) können die FAS für ca. 5min getestet werden. Auf der A96 aktiviert der Versuchsleiter die FAS und die Szenarien werden wie zuvor beschrieben durchfahren.

Neben dem Konzept "Neigung" und "Summenpunkt Lenkrad" wurde ein drittes Konzept untersucht, welches nicht Gegenstand dieses Beitrags ist. Auf dem Hin- und Rückweg war jeweils ein anderes der drei Systeme Konzept aktiv. Die Szenarien finden auf dem Hinweg in der Reihenfolge "2x Fahrstreifenwechsel gegen den Willen der Fahrstreifenmittenführung (80km/h)", "10min Fahrstreifenfolgen (120km/h)", "2x Fahrstreifenwechsel gegen den Willen der Fahrstreifenmittenführung (120km/h)" und auf dem Rückweg in umgekehrter Reihen-

folge statt. Nach Abschluss eines Fahrmanövers wird der Fragebogen vom Versuchsleiter vorgelesen und vom Proband während der Fahrt mündlich beantwortet.

Am Versuch nahmen 36 Probanden ($m=24$, $w=12$) im Alter von 20 bis 59 Jahren teil ($M=30$, $SD=11$), wobei deren Gesamtfahrleistung zwischen 30000 und einer Million Kilometer variiert ($M=240000$, $SD=225000$). Die Versuchsgruppen wurden nach Alter, Geschlecht und Fahrleistung parallelisiert.

4.2. Auswertung

Im Szenario "Fahrstreifenwechsel gegen den Willen der Fahrstreifenmittenführung" geben zwei (80km/h) bzw. drei (120km/h) Probanden für das Konzept "Neigung" an, dass sich das Fahrzeug gegen den Spurwechsel überhaupt nicht wehrt. Die Einstufung der anderen Probanden unterliegt gemäß Bild 3 hoher Streuung, wobei das Fahrzeugverhalten bei hoher Geschwindigkeit häufiger als sich wehrend bezeichnet wird (50% der Probanden: trifft eher zu / trifft voll zu). Auch im Konzept "Lenkrad" ist eine Geschwindigkeitsabhängigkeit zu beobachten. Im direkten Vergleich wird der "Summenpunkt Lenkrad" als sich stärker wehrend eingestuft, jedoch sind die Unterschiede bei 80km/h wie auch 120km/h nicht signifikant (Wilcoxon-Test: $p = 1,000$ bzw. $p = 0,204$, $n=12$).

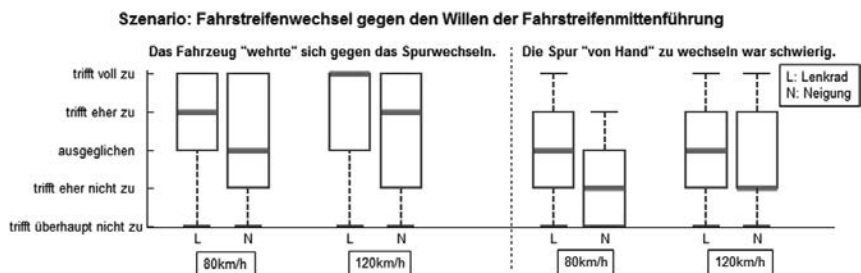


Bild 3: Ergebnisse der subjektiven Bewertung. Die Antenne zeigt die Spannweite der Daten.

Die Aussage "die Spur von Hand zu wechseln war schwierig" wird für das Konzept "Neigung" mehrheitlich als eher nicht zutreffend beschrieben. Der Wechsel bei 120km/h ist signifikant einfacher als mit dem Konzept "Lenkrad" möglich (Wilcoxon-Test: $p = 0,017$, $n=12$).

Die Bewertung des Szenarios "Fahrstreifenfolgen" zeigt, dass das Fahrzeugverhalten ("Fahrzeug hält Spur genau ein", "Fahrzeug reagiert schwerfällig", "Fahrzeug pendelt hin und her") in beiden Konzepten ähnlich beurteilt wird (s. Bild 4).

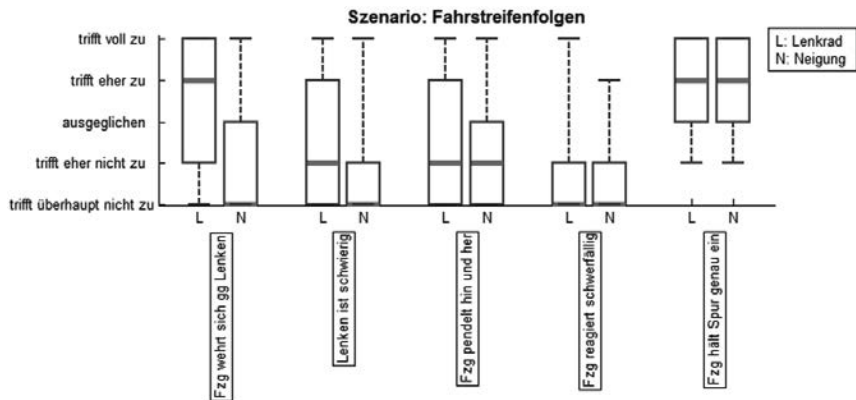


Bild 4: Ergebnisse der subjektiven Bewertung. Die Antenne zeigt die Spannweite der Daten.

Die Aussagen zum Lenkverhalten innerhalb der Spur ("Lenken ist schwierig", "Fahrzeug wehrt sich gegen bestimmte Lenkbewegungen") werden für das Konzept "Neigung" in großer Übereinstimmung als "eher nicht / überhaupt nicht zutreffend" bezeichnet und unterscheiden sich zum Summenpunkt Lenkrad signifikant (Wilcoxon-Test: $p = 0,014$ bzw. $p = 0,032$, $n=12$).

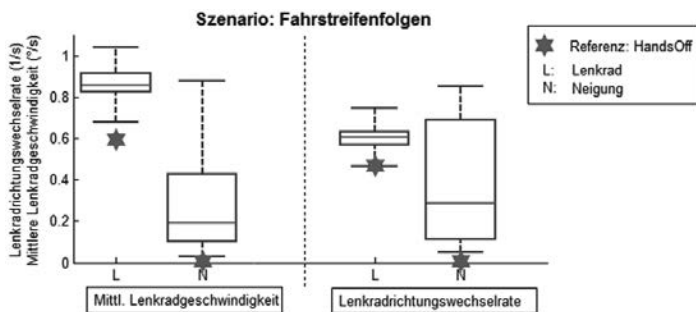


Bild 5: Ergebnisse der Messdatenauswertung. Die Antenne zeigt die Spannweite der Daten.

Anhand der Referenzfahrt "Hands Off" ist in Bild 5 die konzeptbasierte Verringerung der Lenkradbewegungen von 0,6°/s (Konzept "Lenkrad") auf nahezu 0°/s (Konzept "Neigung") zu erkennen. Während der Fahrereinfluss im Konzept "Lenkrad" übereinstimmend zu hochfrequenten Lenkradbewegungen führt, entstehen im Konzept "Neigung" vorwiegend niederfrequente Bewegungen (Median der mittleren Lenkradgeschwindigkeit: 0,9°/s bzw. 0,2°/s). Ein Teil der Probanden führt auch hier hochfrequente Lenkradbewegungen aus, wel-

che jedoch maximal bis zum Wert des Systems "Lenkrad" reichen. Insgesamt ergibt sich für das Konzept "Neigung" ein deutlich geringerer Regelaufwand am Lenkrad.

4.3. Diskussion und Ausblick

Lenkt der Fahrer gegen den Willen des FAS, so assoziieren dies 90% der Probanden im Konzept "Neigung" mit einem mehr oder weniger starken "Wehren", was für die Wahrnehmbarkeit und Zuordenbarkeit der Rückmeldung spricht. Dabei ist die Operationalisierung durch die Formulierung "Wehren" nachteilig, da auch die Fähigkeit zum Gegenhalten erfasst wird (frei nach [21]). Diese ist zudem bei niedrigen Geschwindigkeiten geringer (höhere Fahrer-Lenkwinkel, Begrenzung FAS-Lenkwinkel konstant), was den Einfluss der Geschwindigkeit auf die Beurteilung erklären kann. Der relative große Unterschied zum "Summenpunkt Lenkrad" kann aus dessen straffer Auslegung (keine Berücksichtigung Fahrer-Input) resultieren. Interessant wäre daher der Vergleich mit in Serie befindlichen Systemen des Konzepts "Lenkrad".

Die Forderung nach Überlenkbarkeit wird im getesteten Szenario erfüllt, da alle Fahrer den Fahrstreifenwechsel ausführen konnten und dies mehrheitlich als nicht schwierig eingestuft haben. Noch nicht untersucht sind unerwartete oder hochdynamische FAS-Eingriffe.

Die gemeinsame Fahrzeugführung erfolgt im Konzept "Neigung" unter deutlich reduziertem Regelaufwand am Lenkrad, wodurch der Fahrer entlastet wird. Die positive Bewertung der Fragen zum Lenk- und Fahrzeugverhalten zeigt, dass Lenken zudem ohne Bevormundung erfolgt (leicht, wehrt sich nicht) und das Zusammenspiel zwischen den Akteuren Fahrer und FAS funktioniert (Pendeln, Spurmittigkeit, Schwerfälligkeit). Obwohl "Lenken einfach möglich" ist, bringt der Großteil der Fahrer nur niederfrequente Lenkradbewegungen ein (z.B. zur Korrektur der stets spurmittigen FAS-Trajektorie) und wählt damit einen fast monitiven Betrieb. Nur wenige Fahrer bevorzugen das aktive Mitlenken (Lenkbewegungen bis hin zur Frequenz des Konzepts "Lenkrad"). Viele Fahrer überlassen die Fahrzeugquerführung damit (freiwillig) dem FAS, was dafür spricht, dass die Eingriffe als konsistent und angenehm wahrgenommen werden.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass die Fahrzeugquerneigung zur Rückmeldung entkoppelter FAS-Eingriffe dienen kann. Die Anwendung auf die Funktion "Fahrstreifenmitteführung" hat die erwarteten Vorteile bei der gemeinsamen Fahrzeugführung bestätigt (Regelaufwand, Bevormundung). Im weiteren ist die Überlenkbarkeit bei Fehlauflösungen zu untersuchen und zu prüfen, ob der Fahrer im nahezu monitiven Betrieb ausreichend im "loop" bleibt.

Um das Konzept auf andere FAS übertragen zu können, sind weitere Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen Eingriff und erforderlichem Neigewinkel notwendig. Die Fahrzeugquerneigung hat auch bei Teil-, Hoch- oder Vollautomation Potential als Rückmeldekanal, da auch hier das Lenkrad als Informationskanal entfällt ("handsoff", stillstehend, nicht vorhanden) während der Wunsch nach Fahrzustandsinformation und Fahrkomfort bestehen bleibt [22].

5. Literaturverzeichnis

- [1] Bubb, H., Bengler, K.: Fahrerassistenz. In Bubb, H., Bengler, K., Grünen, R. E., Vollrath, M.: Automobilergonomie. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2015.
- [2] Sieber, M., Schneider, M., Siegel, A., Siedersberger, K.-H., Färber, B.: Wirksamkeit von Ausweichempfehlungen in Kombination mit Teilbremsung beim Notausweichen. 10. Workshop Fahrerassistenzsysteme, Darmstadt 2015.
- [3] Schmidt, G.: Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente. Dissertation, TU Braunschweig 2009.
- [4] Müller, T. A.: Ermittlung vestibulärer Wahrnehmungsschwellen zur zielgerichteten Gestaltung der Fahrzeug-Längsdynamik. Dissertation, TU München 2015.
- [5] Walter, M., Fechner, T., Hellmann, W., Thiel, R.: Lane Departure Warning. In Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme (2. Aufl.). Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2012.
- [6] Kollisionsvermeidung durch Ausweichen und Bremsen – AUDI AG. In Scholl, W.: Demonstratorbuch. UR:BAN Abschlusspräsentation. Düsseldorf 2015.
- [7] Stemmer, M.: Energetische und funktionale Vernetzung von aktiven Lenksystemen. Dissertation, TU München 2012.
- [8] DIRECT ADAPTIVE STEERING, Prospekt, Nissan.
- [9] Neukum, A., Krüger, H.-P.: Fahrerreaktion bei Lenksystemstörung – Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien. VDI-Berichte. 1791 (2003), S. 297-318.
- [10] Bubb, H., Bengler, K., Breuninger, J., Gold, C., Helmbrecht, M.: Systemergonomie des Fahrzeugs. In Bubb, H., Bengler, K., Grünen, R. E., Vollrath, M.: Automobilergonomie. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2015.

- [11] Göhrle, C., Schindler, A., Wagner, A., Sawodny, O.: 'Model Predictive Control of semi-active and active suspension systems with available road preview', European Control Conference (ECC), Zürich 2013.
- [12] Sternstunden der Technik: Die Kurvenneigefunktion im S-Klasse Coupé - Kurven-Künstler. Presse-Information, Daimler AG, Stuttgart 2014.
- [13] Bär, M.: Vorausschauende Fahrwerkregelung zur Reduktion der auf die Insassen wirkenden Querschleunigung. Dissertation. RWTH Aachen 2014.
- [14] DE 102010046317-5.
- [15] Bubb, H., Vollrath, M., Reinprecht, K., Mayer, E., Körber, M.: Der Mensch als Fahrer. In Bubb, H., Bengler, K., Grünen, R. E., Vollrath, M.: *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2015.
- [16] Wickens, C. D.: Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 3 (2) (2002), S. 159–177.
- [17] Gundry, A. J.: Experiments on the Detection of Roll Motion. *Aviation, Space and Environmental Medicine*. 57 (5) (1978).
- [18] Bubb, H.: Das Regelkreisparadigma der Ergonomie. In Bubb, H., Bengler, K., Grünen, R. E., Vollrath, M.: *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2015.
- [19] Tomaske, W.: Einfluß der Bewegungsinformation auf das Lenkverhalten des Fahrers sowie Folgerungen für die Auslegung von Fahr simulatoren. Dissertation. Hochschule der Bundeswehr. Hamburg 1983.
- [20] Buld, S., Krüger, H.-P.: Wirkung von Assistenz und Automation auf Fahrzustand und Fahrersicherheit. Abschlussbericht Projekt: EMPHASIS. Würzburg 2002.
- [21] Duden. <http://www.duden.de/rechtschreibung/wehren>. August 2016
- [22] Lange, A., Maas, M., Albert, M., Siedersberger, K.-H., Bengler, K.: Automatisiertes Fahren - So komfortabel wie möglich, so dynamisch wie nötig - Vestibuläre Zustandsrückmeldung beim automatisierten Fahren. *VDI-Berichte*. 2223 (2014), S. 215-228.

Integration des nutzerzentrierten Entwicklungsansatzes in die Serienentwicklung einer Baustellenassistentz

Dr.-Ing. **Maike Salfeld**, Dr.-Ing. **Marc Arnon**,
Robert Bosch GmbH, Leonberg

Kurzfassung

Der technische Fortschritt in der Sensorik und Prozessorik eröffnet vielzählige Möglichkeiten für neue Assistenzfunktionen, die eine Unterstützung des Fahrers in immer komplexeren Fahrsituationen erlauben. Um die Bedürfnisse der Nutzer möglichst früh in der Entwicklung zu berücksichtigen, hat sich in vielen Bereichen wie der Entwicklung von HMI-Lösungen die Methodik des User Experience Ansatzes durchgesetzt, um die Bedürfnisse der Nutzer im Entwicklungsprozess methodisch zu berücksichtigen. Im vorgeschlagenen Beitrag wird am Beispiel der Entwicklung einer Baustellenassistentz die Einbindung der nutzerzentrierten Entwicklungsmethodik in die frühe Phase der Serienentwicklung von Fahrerassistenzfunktionen vorgestellt. Es wird ein Überblick über die Methodik gegeben, sowie die konkrete Implementierung des Prozesses unter den Randbedingungen der Serienentwicklung vorgestellt. In einem qualitativen User Research wurden Probanden während der Fahrt durch eine Autobahnbaustelle auf ihr Erleben hin beobachtet und nach ihrem Assistenzbedürfnis befragt. In der Synthesephase wurden, basierend auf den spezifischen Erlebnissen, die Hauptbedürfnisse der einzelnen Nutzer extrahiert, welche in der Entwicklungsphase als Grundlage für die nutzergerechte Prototypengestaltung dienten. Realisiert wurde eine Querverführungsassistentz für den Anwendungsfall Baustellendurchfahrt, die dann im sogenannten RITE (Rapid Iterative Testing and Evaluation) – Verfahren auf der Teststrecke iterativ den Nutzerbedürfnissen angepasst wurde. Die Ergebnisse der verschiedenen Phasen des nutzerzentrierten Entwicklungsprozesses werden in Hinblick auf den Nutzen des Vorgehens abschließend diskutiert und Empfehlungen für die Einbindung des Verfahrens in die Serienentwicklung von Fahrerassistenzfunktionen gegeben.

1. Einleitung

Der Bedarf, Fahrer bei der Durchfahrt in Baustellenszenen zu unterstützen, ist bekannt. Nicht nur aus eigener Erfahrung kennen die Meisten die anspruchsvolle und anstrengende Durchfahrt durch Baustellen. Dass die Automobilindustrie sich diesem Thema durch entsprechende Fahrassistenten annimmt, zeigt auch [1]. Aus der Forschung und Vorentwicklung sind bereits vielfältige Einzelkonzepte bekannt, die entlang des technisch

Machbaren zeigen, was eine Baustellenassistentz ausmachen kann und aus Gesichtspunkten der Usability sollte [2]. Warum befasst sich also die Serienentwicklung mit dem Thema der nutzerzentrierten Entwicklung für eine Unterstützung des Fahrers in Baustellenszenarien? Weil bekannte markattraktive Produkte zeigen, wie wichtig es für die Akzeptanz von Produkten und damit auch für Fahrerassistenzsysteme ist, diese immer in Hinblick auf den Nutzer zu entwickeln, wie auch der Standard *DIN EN ISO 9241-210* [3] fordert. Gerade auf dem Weg zum höher automatisierten Fahren ist die gute Interaktion des Fahrers mit dem System ein zentrales Thema und dies in jeder Phase der Entwicklung. Insbesondere, um zu untersuchen, was die Bedürfnisse der Nutzer in der Baustelle tatsächlich sind und letztendlich auch, welche Interaktionskonzepte in der Entwicklung zu verfolgen und zu priorisieren sind, wurde bei der Robert Bosch GmbH in der Serienentwicklung für Fahrerassistenzsysteme in Zusammenarbeit mit der DoUX GmbH¹ der nutzerzentrierte Entwicklungsansatz eingesetzt. Im Folgenden wird zunächst die Methodik des nutzerzentrierten Entwicklungsansatzes vorgestellt und anschließend die Anwendung der jeweiligen Verfahren auf das Problem der Entwicklung einer Baustellenassistentz vertieft. Zum Schluss wird die Nutzbarkeit der Ergebnisse und die Anwendung des Verfahrens in der Serienentwicklung diskutiert.

2. UX Methodik

Im folgenden Kapitel wird die Methodik zur Einbindung der Nutzerbedürfnisse in die Produktentwicklung vorgestellt. Dabei wird der Prozess, der sogenannte User Experience (UX) Kreislauf, nach [4] in die Phasen „Analyze – Design – Prototype – Evaluate“ eingeteilt. Dieser Prozess ist als Kreislauf zu verstehen, der einerseits auf oberster Ebene aber auch in den einzelnen Phasen eine Iteration des Ablaufs für Einzelfragestellungen erlaubt. In der ersten Phase, der Analyse, liegt der Fokus darauf, die Bedürfnisse der Nutzer zu verstehen, d.h., wie Nutzer selber das entsprechende Problem lösen und welche Bedürfnisse und Empfindungen sie dabei haben. Aufbauend auf diesem Wissen können dann Designvorschläge für ein Produkt mit Interaktionskonzept entworfen werden. In der Realisierungsphase wird ein Konzept prototypisch umgesetzt, sodass die entscheidenden Elemente der Interaktion mit dem Nutzer erfahrbar sind. Während der Evaluierungsphase wird das prototypisch realisierte Konzept durch den Nutzer bewertet, verfeinert und optimiert.

¹ Do UX GmbH, Gesellschafter Prof. Dr. Arnd Engeln, Christina Engeln (GF), Mathildenstraße 28, 72072 Tübingen

Eine besonders wichtige Grundregel des UX Prozesses ist, dass sämtliche nutzerrelevanten Produktmerkmale im Laufe der Entwicklung immer wieder am Nutzer gespiegelt werden.

Analyse

Wie einleitend beschrieben, steht zu Beginn des UX Prozesses die Analysephase. Ziel dieser Phase ist es, die Bedürfnisse der Nutzer zu erfassen. Um der Frage nachzugehen, welche Bedürfnisse Nutzer bei der Fahrt in der Baustelle auf der Autobahn haben, wurde die folgende qualitative Nutzerstudie durchgeführt. Dabei wurden 12 Testpersonen in ihren eigenen Fahrzeugen bei der Fahrt durch eine Baustellensituation beobachtet und interviewt. Tabelle 1 zeigt die Verteilung der Probanden.

Tabelle 1: Stichprobe der qualitativen Nutzerstudie

Alter	Anzahl Teilnehmer	Anzahl Tn mit Erfahrung mit Querverführungsassistentz
<30Jahre	2w/2m	-
30-60Jahre	2w/2m	3
>60 Jahre	2w/2m	-

Als Teststrecke wurde die in Bild 1 gezeigte Hin- und Gegenrichtung der Baustellensituation im realen Straßenverkehr verwendet. Die Strecke enthielt eine Überleitung auf die Gegenfahrbahn, sowie unterschiedliche seitliche Fahrbahnberandungen, wie Beton-Schrammborden (ca. 50cm hoch) zur baulichen Trennung von entgegenkommenden Fahrbahnen, Baken und gelbe Markierungen. Da die Strecke durch einen Tunnel führt, konnte auch noch die Fahrt bei schlechten Lichtbedingungen integriert werden. Die Wetterbedingungen variierten während der Studienphase, sodass Sonnenschein wie auch Regen vorkamen. Neben der Beobachtung während der Fahrt wurden die Probanden vor und nach der Fahrt mittels Fragebogen interviewt. Während der Fahrt wurden die Probanden aufgefordert, nach der Methode „Lautes Denken“ ihre Eindrücke in der jeweiligen Situation zu schildern [5].

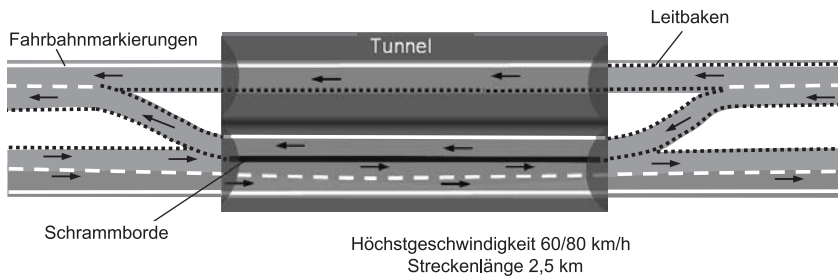


Bild 1: Teststrecke für qualitative Nutzerstudie

Interpretation

Im Analyse- und anschließenden Syntheseschritt der UX-Methodik werden die erhobenen Daten aus der qualitativen Nutzerstudie verdichtet und hinsichtlich der Nutzerbedürfnisse interpretiert. Daraus leiten sich Merkmale eines Produktes im Kontext der Problemstellung ab. Nach dem Kano-Modell werden dabei 5 Merkmale unterschieden [6]: Ein *Basismerkmal* wird vom Nutzer als selbstverständlich erachtet, sodass ein Fehlen dieses Merkmals Unzufriedenheit erzeugt, jedoch bei Vorhandensein nicht notwendigerweise Zufriedenheit. Ein *Leistungsmerkmal* bezeichnet eine Produkteigenschaft, die der Kunde erwartet und die ihn mit Zufriedenheit erfüllt. Den nächsten Level (Begeisterung) ruft ein Merkmal hervor, das vom Nutzer nicht erwartet wurde, jedoch seinen Zuspruch findet (*Begeisterungsmerkmal*). Merkmale, denen Nutzer indifferent gegenüber stehen, werden als *Unerhebliche Merkmale* bezeichnet und Merkmale, die dem Nutzer negativ auffallen *Rückweisungsmerkmale*.

Die Erhebung der Bedürfnisse und damit der Produktmerkmale einer Baustellenassistentz wurde von einem gemischten Team aus UX Experten, Produktentwicklungsingenieuren und Produktmanagern auf Basis der qualitativ erhobenen Daten durchgeführt. Im Folgenden sind die extrahierten Merkmale für eine Baustellenassistentz zusammengestellt und nach dem erwarteten Nutzererleben klassifiziert.

Tabelle 2: Produktmerkmale einer Baustellenassistentz

Basismerkmale <ul style="list-style-type: none"> - Einfache Interaktion mit dem System - Unterstützung der Querführung - Keine Beanspruchungsspitzen durch fehlerhaftes Systemverhalten und Informationsüberfluss - Transparenz der Systemgrenzen - Unterstützung des Sicherheitsgefühls - Aufmerksamkeitserhöhung - Individualisierung - Einfaches mentales Modell der Assistenzfunktion
Leistungsmerkmale <ul style="list-style-type: none"> - Abstandhalten von baulichen Randbegrenzungen und Manövrieren in engen Korridoren - Spurführung in der Baustelle verdeutlichen - Verringerung des Gefühls der Bedrohung durch entgegenkommenden Verkehr - Unterstützung von Spurwechselmanöver in komplexer Spurführungssituation - Informationen über die Dauer der Baustelle geben - Vorausschauende Geschwindigkeitsempfehlung/ - einregelung - Durchfahren von Ein- und Ausfahrten aus Baustellen erleichtern
Begeisterungsmerkmale <ul style="list-style-type: none"> - Überholen von LKW unterstützen - Vor Fahrfehlern anderer schützen
Unerhebliche Merkmale <ul style="list-style-type: none"> - Konflikt zwischen Sicherheit und schnellem Vorankommen lösen - Anstrengung beim Fahren in langen Baustellen verringern
Rückweisungsmerkmale <ul style="list-style-type: none"> - Assistenz führt in eine gefährliche Situation

3. Design und Prototypenrealisierung

Die Designphase setzt sich aus zwei unterschiedlichen Schritten zusammen. Zunächst werden anhand von Kreativitätsmethoden Designalternativen für ein mögliches Produkt entworfen. Dafür bietet sich zur Ideengenerierung (engl. Ideation) eine Brainstorming Runde an, bei der ohne Einschränkungen Ideen generiert werden dürfen. Anschließend werden die

Ideen gemeinsam verdichtet und in zusammenhängende Konzepte überführt. Im zweiten Schritt werden dann Prototypen realisiert, die die vermuteten nutzerrelevanten Merkmale enthalten. Die Verwendung von funktionalen Prototypen ist nach [7] eine effektive Methode vor der Investition in die Entwicklung, Ideen direkt mit dem Nutzer zu validieren und zu testen.

Auf Basis der oben vorgestellten Analyse und Synthese der Ergebnisse des qualitativen User Research wurde ein Kreativ-Workshop mit unterschiedlichen Stakeholdern im Unternehmen durchgeführt. Neben den Experten der Funktionsentwicklung, Testingenieuren, Projektleitung sowie Produktmanagement waren am Workshop UX Experten und ein Schnellzeichner zur Visualisierung der Funktionsideen beteiligt.

Als Methode wurde eine vereinfachte Version der Brainwriting Methode, der 6-3-5-Methode [8] angewandt. Bei dieser Methode haben die Teilnehmer zunächst jeder für sich Zeit, Ideen zu entwickeln und diese niederzuschreiben. Nach einer kurz bemessenen Zeit wechselt der Aufschrieb mit der Ideensammlung zu einem weiteren Teilnehmer in der Gruppe, der diese ergänzt, oder auf der Basis neue Ideen generiert und wiederum niederschreibt. Ein besonderer Vorteil dieser Methode ist, dass einerseits durch das Brainwriting die Ideenfindung nicht durch einzelne Teilnehmer dominiert werden kann und andererseits die Weiterentwicklung von bereits generierten Ideen gefördert wird. Letzteres hilft im nächsten Schritt, die Ideen zu Konzepten zu bündeln. Die entstandenen Konzepte wurden dann hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien wie technische Machbarkeit, Innovationsgehalt, Alleinstellungsmerkmal, wirtschaftliche Umsetzbarkeit, Kompatibilität mit Unternehmensstrategie und Nutzerfreundlichkeit bewertet und priorisiert [5]. Für die Assistenz in der Baustelle wurden zwei Funktionskonzepte unterschiedlicher Ausprägung generiert, eine „Low Level“ und eine „High Level“-Ausprägung. Da der Fokus der Entwicklung auf der haptischen Fahrer – Fahrzeug-interaktion und der Querbewegungsregelung lag, wurde eine begrenzte Auswahl der Funktionskonzepte umgesetzt und im Prototypen realisiert. Eine Beschreibung des Systems ist auch in [9] zu finden.

Funktionalitäten des Prototyps

- Erkennung von
 - o Fahrbahnmarkierungen
 - o Erhabenen Fahrbahnrandern und Hindernissen
- Eingriffe in die Querführung
 - o Enge Spurmittenführung
 - o Spurhaltung
- HMI
 - o Lenkradvibration vor Fahrspurverengungen
 - o Anzeige von Systemstatus im Display (aus/passiv/aktiv/ Warnung vor Fahrbahnverengung)



Bild 2: Stereovideo Kamera Generation 2 und Versuchsfahrzeug

(Quelle: © Robert Bosch GmbH, 2016)

Als Realisierung eines Funktionsprototypen wurde ein Serienfahrzeug mit einer Stereovideokamera zur Umgebungserfassung verwendet. Die Bosch Stereovideokamera ermöglicht die dreidimensionale Umfelddetektion mit einem Öffnungswinkel von 50 Grad und bietet eine 3D-Messreichweite von über 50 Metern bei einer Auflösung von 1.280 x 960 Pixeln. Der Sensor ermöglicht es, neben Fahrbahnmarkierungen auch erhabene Fahrbahnbegrenzungen zu erfassen. Das Fahrzeug ist mit einem Elektrischen Powersteering – System (EPS) ausgestattet, mit dem die Fahrzeugquerführung durch Überlagerung des Fahrerlenkmomentes mit maximal 3Nm beeinflusst werden kann. Außerdem bietet die Lenkung die Möglichkeit, eine Lenkradvibration zu erzeugen. Weiterhin steht im Fahrzeug ein Serien- Display zur Verfügung, in dem über die Symbolik der Querführungsassistentz der Systemstatus verdeutlicht werden kann.

4. Evaluation

Ziel der letzten Phase im UX Prozess ist, wie eingangs beschrieben, die Evaluierung der prototypisch realisierten Konzepte. Dazu gibt es eine große Anzahl an unterschiedlichen

Methoden, die zur Evaluation herangezogen werden können. Diese lassen sich einordnen in sogenannte analytische versus empirische Verfahren, sowie in schnelle versus ausführliche Verfahren [4]. Das erste Kriterium unterteilt die Verfahren nach dem Aufwand, der für einen vollen Testzyklus mit einer großen Anzahl an Probanden anfällt, gegenüber weniger ausführlichen Testmethoden, die dafür kosteneffizienter sind. Die Unterteilung nach analytisch versus empirisch hebt den Charakter der Testmethodik hervor. Wird im empirischen Fall Datenerhebung mit tatsächlichen Nutzern betrieben, stützen sich analytische Methoden auf das Review der Konzepte durch Experten.

	Ausführliche Verfahren	Schnelle Verfahren
Analytische Verfahren	Kognitiver Durchgang	Heuristische Evaluierung
Empirische Verfahren	Feldstudien, Usability-Tests	RITE

Bild 3: Beispiele für Evaluations-Methoden und ihre Einordnung

Rapid Iterative Testing and Evaluation

Besonders hervorzuheben ist das RITE Verfahren [10] (Rapid Iterative Testing and Evaluation), das ein schnelles, quasi empirisches Verfahren ist. Ziel der Methode ist es, in kürzester Zeit qualitative Nutzerdaten im Umgang mit dem Produkt zu sammeln. Damit sollen schnell und effektiv die wichtigsten Hinweise zur weiteren Optimierung eines UX Prototypen entdeckt und direkt im nächsten Schritt auch gelöst werden. Um in kurzer Zeit Daten zu sammeln, werden bei dem Verfahren meist erfahrene Nutzer für die Evaluierung ausgewählt. In einer schnellen Folge von Nutzertest und anschließender Modifikation des Prototypen bei entdeckten Usability-Problemen sowie wiederholtem Testen mit einem nächsten Nutzer, sollen grobe Defizite am Prototypen aufgedeckt und behoben werden. Natürlich kann das Verfahren bei der geringen Stichprobe kein wissenschaftliches Ziel verfolgen. Es werden keine Signifikanzen erhoben, welche Produktvariante statistisch betrachtet die Beste ist. Das Verfahren stellt ein Optimum aus kostenaufwändigen empirischen Tests und den schnellen Verfahren, die meist über Expertenevaluierung gelöst werden, dar.

Anwendung des RITE Verfahrens in der Entwicklung der Baustellenassistentz

In der Entwicklung der Baustellenassistentz wurde das RITE-Verfahren angewendet, um eine Evaluation des Prototypen vorzunehmen. Zum Test wurden auf der Teststrecke zwei Baustellenszenarien simuliert, einerseits ein Fahrspurende mit anschließender Fahrt durch eine Schrammborden- und Bakengasse, sowie ein einspuriges Szenario mit Linienmarkierungen und Fahrbahnverengung durch Pylonen, siehe Bild 4.



Bild 4: Baustellenszenarien auf der Teststrecke: Spurende und Spurverengung

Als Teilnehmer für das Evaluationsverfahren wurden 7 Probanden (5m/2w) aus dem Unternehmen gewählt, überwiegend mit technischem Hintergrund und Fahrerfahrung, jedoch keine expliziten Fahrzeugtest- oder Applikationsingenieure. In Bild 5 ist das Layout der Teststrecke dargestellt. Es wurde eine Ausgangsgeschwindigkeit von 50 km/h empfohlen; allerdings hatte der Fahrer die Freiheit, seine Geschwindigkeit der Fahrsituation angemessen selber zu wählen. Die Spuren verengten sich in dem Szenario „Spurende“ bis auf ca. 50 cm plus Fahrzeugbreite und beim Szenario „Spurverengung“ bis auf ca. 30cm plus Fahrzeugbreite. Zudem wurden die Szenarien während des Testdurchlaufs leicht verändert, um nach Bedarf das Fahrerleben zu variieren. Einerseits wurde dem Fahrer an kritischer Stelle eine Nebenaufgabe gegeben, und andererseits ein weiteres Fahrzeug hinzugenommen, das einen Überholvorgang durchführte und das Szenario „Spurende“ erschwerte, da eine Kooperation zum Einfädeln stattfinden musste.

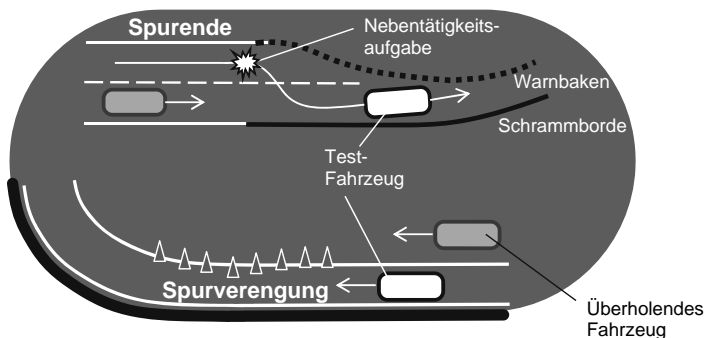


Bild 5: Testparcours für das RITE Verfahren

Zur Testdurchführung durchfahren die Testpersonen einzeln den Testparcours mit dem Prototypen der Baustellenassistentz [5]. Die Probanden wurden wie auch schon in der qualitativen Nutzerstudie aufgefordert, während des Fahrens laut zu denken. Anschließend an jeden Testdurchlauf wurde ein kurzes Interview durchgeführt und die Assistenzfunktion auf Basis der Rückmeldungen umkonfiguriert, bzw. umparametrisiert. Insgesamt absolvierte jeder Proband ca. 8 Testdurchfahrten und wurde abschließend nochmal in einem ausführlichen Interview auf sein Erleben hin befragt. Am Prototypen konnten die in Tabelle 3 aufgeführten Konfigurationen variiert werden.

Tabelle 3: Konfigurationsmöglichkeiten Prototyp und Variation der Testszenarien

Variationen Prototypenkonfiguration	<ul style="list-style-type: none"> - Reaktion nur auf Linien bzw. seitliche Randbebauung - Stärke des Lenkeingriffs - Zeitpunkt des Engstellenhinweises - Laterale Positionierung in der Fahrbahn zu baulicher Begrenzung/ Linienmarkierungen
Variation Testablauf	<ul style="list-style-type: none"> - Szenario Spurende: Ablenkung von Fahraufgabe durch Nebentätigkeit (Radio an/aus, Klimaanlage regulieren) - Szenario Spurende: Kooperationsaufgabe mit nebenfahrendem Fahrzeug („Einfädeln“) - Szenario Spurverengung: Überholendes Fahrzeug

Bei der Testdurchführung wurde besonders Augenmerk auf die Probandeneinschätzungen zu den folgenden Fragestellungen gelegt:

- Ist das Systemverhalten nachvollziehbar?
- Wie wird die Spurmittenführung wahrgenommen, insbesondere die Lateralposition zum Nebenfahrzeug und zur baulichen Begrenzung?
- Ist der Lenkeingriff zur Kollisionsvermeidung mit der baulichen Spurberandung angemessen oder störend?
- Ist der Übergang von der Spurmittenführung zur Spurhaltung verständlich und angenehm?
- Wie sehr stört ein Systemausfall wegen Schlechtwetterbedingungen?
- Kann ein Vertrauen in das System aufgebaut werden? Gibt es ein Sicherheitsempfinden?
- Sind die im HMI (Human Machine Interface) dargebotenen Informationen (haptisch/visuell) wahrnehmbar?

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die Probanden schnell ein Vertrauen in das System aufbauen konnten und das Systemverhalten bis auf Sondersituationen, die von der Funktionalität im Prototypen noch nicht abgedeckt waren, als verständlich eingestuft wurde. Insgesamt wurde die Unterstützung durch die Querführung sehr positiv und nützlich sowie als Beitrag zur Sicherheit bei der Fahrt durch die Bakengasse empfunden. Die Entscheidung, ob eine Mittenführung oder aber lediglich die Abstandshaltung von der seitlichen Randbebauung gewünscht wurde, war nicht eindeutig, sondern wurde individuell verschiedentlich favorisiert. Wie schon vorab erwartet, wurde die optische Anzeige im Display nicht wahrgenommen, da die Aufmerksamkeit der Probanden klar auf die Szene außerhalb des Fahrzeugs gerichtet war. Überraschenderweise wurde auch die haptische Information, die Vibration am Lenkrad, von einigen Probanden nicht wahrgenommen. Außerdem diente sie nach mehrheitlicher Aussage auch nicht der Aufmerksamkeitssteigerung vor der Engstelle. Ein überholendes Fahrzeug zeigte beim Szenario „Spurverengung“ keinen großen Einfluss auf das Empfinden der Probanden, es wurde oftmals als nicht relevant wahrgenommen.

5. Zusammenfassung und Diskussion der Anwendbarkeit des UX Prozesses in der Serienentwicklung

Im Rahmen der hier beschriebenen Studie wurde am Beispiel der Entwicklung einer Baustellenassistenten ein kompletter Durchlauf des UX Prozesses vorgestellt. Dabei wurden

anhand einer qualitativen Nutzerstudie die Nutzerbedürfnisse bei der Durchfahrt durch eine Baustellensituation erfasst und nach dem Kano-Modell nach den verschiedenen Produktmerkmalen klassifiziert. Anschließend wurde die Realisierung eines seriennahen Prototypen vorgestellt und dessen abschließende Evaluation mittels RITE Verfahren.

Wie einleitend beschrieben, stellt sich die berechtigte Frage, ob die UX Methodik auch in der Phase der Serienentwicklung noch Vorteile bringt. Dazu soll im Folgenden die Anwendung des Prozesses in der Serienentwicklung näher betrachtet werden. Üblicherweise gliedert sich der Produktentstehungsprozess auf die Bereiche Forschung/Vorentwicklung und Serienentwicklung in der Fahrerassistenz wie in Tabelle 4 gezeigt.

Tabelle 4: Entwicklungsziele und Randbedingungen der unterschiedlichen Entwicklungsphasen

Forschung/ Vorentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> - Fokus Serienreife ca. 3-10 Jahre - Aufgaben: Konzeptalternativen mit Vor- und Nachteilen aufzeigen, Machbarkeitsanalysen - Großer Entwicklungsfreiraum, wenige Lösungseinschränkungen - Fokus liegt oftmals auf ausgewählten Einzelszenarien
Serienentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> - Fokus Serienreife ca. 0-3 Jahre - Aufgaben: Serienrealisierung auf Automotive-Steuergeräten, Applikation und Freigabe von Produkten inkl. Sicherheitskonzept - Eher eingeschränkter Lösungsfreiraum, geringe Flexibilität durch aufwendigen Entwicklungsprozess [11] - Oftmals hoher Kosten-/Zeitdruck

Demnach ist das Ziel der Forschung und Vorentwicklung, im Hinblick auf die Fahrer-Fahrzeuginteraktion grundlegende Konzepte zu entwickeln. Im öffentlich geförderten Projekt „Aktiv“ beispielsweise, welches bis Mitte 2010 lief, wurde bereits bei den unterschiedlichen Projektpartnern an einer Baustellenassistenz geforscht [2]. Ca. 5 Jahre später werden die ersten Serienrealisierungen in den Fahrzeugen angeboten. Besonders kritisch ist der Übergang in der Produktentwicklung von der Konzeptphase in der Forschung hin zur Serienentwicklung. Hier kann es zu einem Informationsverlust kommen (bspw. verzögerte Übergabe aufgrund anderer Priorisierungen / Mitarbeiterwechsel). Gleichzeitig können aber

auch Informationen veralten, sodass Aspekte neu bewertet werden müssen oder aber detailliertere Auswertungen nötig werden. An dieser Stelle kann eine Wiederholung einer UX- Konzeptphase einerseits für erneute Konzeptbewertungen aber auch für Konzept-detaillierungen sinnvoll sein.

Im Rahmen der Produktentwicklung für die Baustellenassistentz hat sich gezeigt, dass in jeder Phase des UX Prozesses noch neue Erkenntnisse für die Produktentwicklung gewonnen werden konnten. Beispielsweise wurde basierend auf den Ergebnissen der qualitativen Nutzerstudie die Ausrichtung der Entwicklung korrigiert. Die Rückmeldungen zu der Beanspruchung der Fahrer in der Baustelle hat gezeigt, dass es wichtig ist, nicht zunächst auf warnende, informierende Assistentz zu fokussieren (bspw. als Warnung vor dem Überholen von LKW in engen Baustellen), sondern stattdessen die eingreifende Assistentz zu priorisieren. Auch in der Serienentwicklung besteht stets noch genügend Freiraum, nutzerrelevante Produktmerkmale zu beeinflussen. Gerade in der Reglerentwicklung ist es schwer, das Systemverhaltens vollständig zu beschreiben, sodass sämtliche Szenen im Straßenverkehr abgedeckt werden. Gerade hier liegt der Entscheidungsfreiraum bei der Serienentwicklung, um eine nutzergerechte Produktauslegung zu schaffen. Für die Baustellenassistentz konnten die Ergebnisse der qualitativen Nutzerstudie in der Entwicklung immer wieder herangezogen werden, um zu beurteilen, wie verschiedene Fahrertypen mit bestimmten Ausprägungen zurechtkommen würden. Dies half dabei, in der Entwicklung über Design- und Funktions-ausprägungen zu entscheiden.

Auch das RITE Verfahren hat eine gute Anwendbarkeit zur nutzerzentrierten Entwicklung in der Serienentwicklung gezeigt, wenn man den oftmals großen Aufwand von Test und Freigabe bei gleichzeitig hohem Zeitdruck bedenkt. Durch das schnelle Ändern und Abtesten war das RITE Verfahren hier eine effektive Methode, Änderungen anhand einer größeren Nutzergruppe zu überprüfen. Durch die gezielte Einbindung wesentlicher und teilweise auch konträrer Nutzergruppen, kann die Auslegung des Fahrerassistenzsystems in Hinblick auf den Nutzer verbessert und spätere Iterationsschleifen verhindert werden, die kurz vor der Serie sehr kostenintensiv werden.

6. Literaturangaben

- [1] C. Vieweg, „Autobahn - Jetzt wird's eng,“ Zeit Online, 22 10 2015. [Online]. Available: ADRESSE: <http://www.zeit.de/mobilitaet/2015-10/autobahn-baustelle>. [Zugriff am 22 07 2016].
- [2] Projekt Aktiv, „<http://www.aktiv-online.org>,“ 2010. [Online]. Available: http://www.aktiv-online.org/deutsch/Downloads/Broschueren/Ergebnisbuch_aktiv_gesamt.pdf. [Zugriff am 01 08 2016].
- [3] DIN EN ISO 9241-210 Ergonomie der Mensch-System Interaktion – Teil 210: Prozess zu Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, 2010.
- [4] R. Hartson und P. S. Pyla, The UX Book : Process and Guidelines for Ensuring a Quality User Experience, Elsevier Science, 2012.
- [5] A. Engeln, T. Engeln, A. Pagenkopf und K. Straub, „User Centred Development of Construction Zone Assist CZA,“ Leonberg, 2016.
- [6] H. H. Künzel, Erfolgsfaktor Kundenzufriedenheit, Heidelberg: Springer Gabler, 2012.
- [7] A. Chandler und C. Unger, A project guide to UX design, Berkeley, CA: New Riders, 2nd ed., 2012.
- [8] M. Disselkamp, Innovationsmanagement, Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, 2005.
- [9] T. Michalke, T. Gußner, L. Bürkle und F. Niewels, „Evolution in Advanced Driver Assistance: From Steering Support in Highway Construction Zones to Assistance in Urban Narrow Road Scenarios,“ in Advanced Microsystems for Automotive Applications 2014 - Smart Systems for Safe, Clean and Automated Vehicles, Springer International Publishing, 2014.
- [10] M. Medlock, D. T. M. Wixon, R. Romero und B. Fulton, „Using the RITE method to improve products: A definition and a case study,“ in Usability Professionals Association, Orlando Florida, 2002.
- [11] A. Uselmann, „Optimierung der Software-Freigabeprozesse,“ in Radikale Innovationen in der Mobilität, Wiesbaden, Springer Fachmedien, 2014, pp. 285-298.

Detecting Small Road Hazards

A Must for Self-Driving Vehicles

Dr. S. Gehrig, S. Ramos, P. Pinggera, Dr. U. Franke,
Daimler AG, Sindelfingen

Kurzfassung

Die Detektion kleiner Hindernisse auf der Straße ist ein entscheidender Teil der Fahraufgabe und muss von autonomen Fahrzeugen beherrscht werden. In diesem Beitrag präsentieren wir eine Methode zur zuverlässigen Detektion solcher Hindernisse, basierend auf einer handelsüblichen Stereokamera. Der Algorithmus führt Hypothesentests direkt auf den Stereo-Bilddaten durch und prüft die Freiraum und Hindernishypothese auf kleinen Bildfenstern. Die Detektionsergebnisse sind unabhängig von einem Straßenmodell und auf statische wie bewegte Hindernisse anwendbar.

Für die Evaluierung nutzen wir unseren öffentlichen „Lost-Cargo“-Datensatz¹ bestehend aus über 2000 Bildern mit pixelgenauen Annotationen für Hindernisse und Freiraum, einschließlich 3D-Lidar-Referenzdaten. Wir vergleichen den Algorithmus zu einigen Stereo-Referenzverfahren aus der Literatur.

Der vorgeschlagene Algorithmus übertrifft alle Referenzverfahren sowohl bei einer pixel-basierten als auch bei einer objektbasierten Auswertung und läuft auf 2MP-Bildern mit einer Bild-Wiederholrate von 20 Hz. Hindernisse von mindestens 15 Pixel Bildhöhe werden mit einer Detektionsrate von über 95% erkannt.

Abstract

Detecting small obstacles on the road ahead is a crucial part of the driving task and must be mastered by fully autonomous cars on all accounts. In this contribution, we present a method, based on a standard stereo camera, to reliably detect such obstacles from a moving vehicle. The proposed algorithm performs statistical hypothesis tests on stereo image data directly in disparity space, assessing free-space and obstacle hypotheses on independent local patches. The detection results are independent of a road model and work for both static and moving obstacles.

¹ <http://www.6d-vision.com/lostandfounddataset>

For evaluation, we employ our publicly available lost-cargo image sequence dataset¹ comprising more than 2000 frames with pixel-wise annotations of “obstacle” and “free-space” including 3D reference data by a high-end Lidar system and provide a thorough comparison to several stereo-based baseline methods.

The proposed algorithm outperforms all considered baselines in our evaluations on both pixel and object level and runs at frame rates of up to 20 Hz on 2 mega-pixel stereo imagery. Obstacles of 15px image height and above are detected with a detection rate above 95% at low false-positive rates.

1. Introduction

The detection of small obstacles or debris on the road is a crucial task for autonomous driving. In the US, 25000 crashes a year due to road debris were reported in 2004 [1], and about 150 people were killed by accidents involving lost hazardous cargo in 2011 [2]. In Austria, a dedicated initiative was launched in 2006 to detect hazardous cargo in tunnels to improve traffic safety [3]. A precise assessment on the importance of small road hazard detection is difficult since most encounters with small road hazards are mastered by manual drivers and consequently end up in no statistics. Given the frequency of 100 independent lost cargo reports daily on German interstates, one can infer that detecting small road hazards is absolutely crucial for self-driving vehicles.

The task of detecting small but potentially hazardous cargo on the road proves to be quite difficult, even for experienced human drivers (see e.g. Fig. 2). Different sensor types can be applied to the problem, from passive cameras to active Radar or Lidar sensors. While active range sensors provide high accuracy in terms of point-wise distance and velocity measurement, they typically suffer from low angular resolution and high cost. In contrast, cameras provide very high spatial resolution at relatively low cost. However, the detection task of small obstacles is a very challenging problem from a computer vision perspective, since the considered objects cover very small image areas and come in all possible shapes.

In this contribution, we build upon previous work from Pinggera et al. [4], [6] and present extensions and additional evaluations: We present a reparametrization of the underlying problem to boost efficiency, achieving a speed up of factor 10 while keeping the quality of the results at the highest level. In addition, we introduce a mid-level obstacle representation based on the original point-based output, resulting in improved robustness and compactness that significantly aids further processing steps. Finally, we perform detailed evaluations on object level regarding obstacle sizes and detection distance.

Along with these contributions, we employ *Lost and Found*, the first dataset dedicated to visual lost cargo detection, to push forward research on these typically underrepresented but critical events. In our evaluation, we introduce metrics with the application focus in mind.

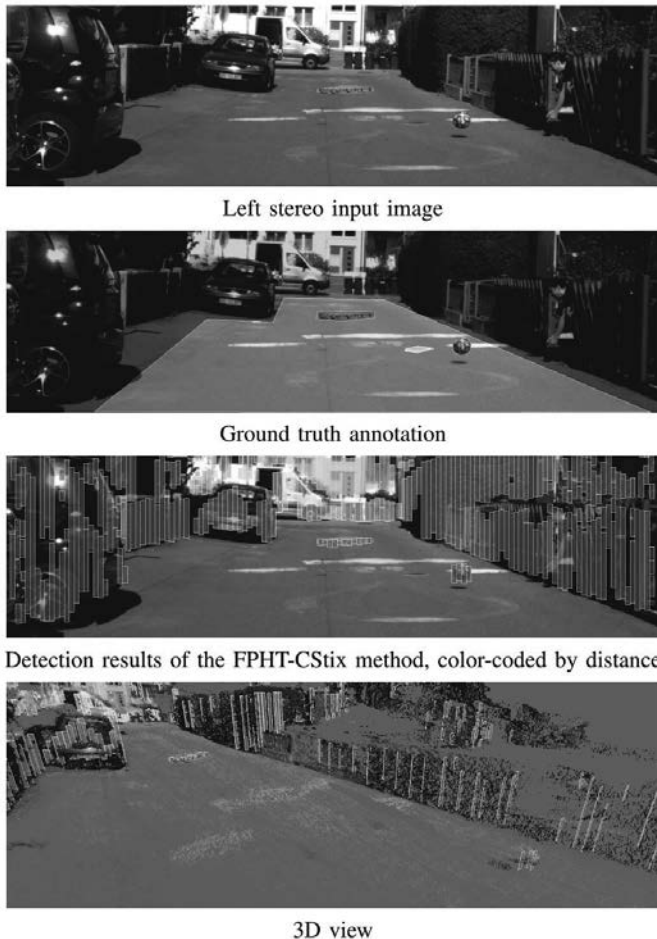


Fig. 1: Exemplary data and corresponding results of the proposed approach. From top to bottom: left stereo input image, ground truth annotation, detection results of the presented method and corresponding 3D view. The scene includes static and moving hard-to-detect obstacles such as a EURO-pallet and a soccer ball (blue annotations), as well as a non-hazardous flat piece of wood (yellow annotation).

The paper is organized as follows: Section 2 lists relevant related work concerning lost cargo detection. The proposed and baseline methods are explained in Section 3. Our new dataset, an extensive evaluation of the presented methods and a discussion of the results are covered in Section 4. The final section comprises conclusions and future work.

2. Related Work

There exists a significant amount of literature on obstacle detection in general, spanning a variety of application areas. However, the literature focusing on detection of small obstacles on the road is quite limited. Most relevant are camera-based methods for the detection and localization of generic obstacles in 3D space, using small-baseline stereo setups (<25 cm) on autonomous cars. We refer to the work of Pinggera et al. [6] for a detailed listing of related work and cite related work in the following section when discussing the investigated methods.

Our present work is an extension of the work in [6] focusing on object-level detection rates for lost cargo.

3. Methods and Baselines

3.1 Direct Planar Hypothesis Testing (PHT)

In this work we extend the geometric obstacle detection approach proposed in [4]. We refer to this method as *Direct Planar Hypothesis Testing (PHT)*, since the detection task is formulated as a statistical hypothesis testing problem on the image data.

Free-space is represented by the null hypothesis H_f while obstacles correspond to the alternative hypothesis H_o . The hypotheses are characterized by constraints on the orientations of local 3D plane models, each plane being defined by a parameter vector comprised of the normal vector and the normal distance from the origin. The parameter spaces of H_f and H_o are bounded by the maximum allowed deviations of the normal vectors from their reference orientation (see Fig. 2 left).

For each local image patch an independent Generalized Likelihood Ratio Test (GLRT) is formulated using the Maximum Likelihood Estimates (MLE), of the respective hypothesis parameter vector. The decision is derived from a likelihood ratio test (see [6] for details). The likelihood terms are derived directly from a statistical model of the stereo image data considering image noise.

A warp *transformation* transforms the image coordinates from the left to the right image, according to the plane model of the true hypothesis and the camera parameters. For the models used in [4] this warp represents a multiplication by the plane-induced homography. Each hypothesis' contribution reduces to a sum of pixel-wise residuals over the local patch area.

The loss function depends on the assumed noise model, and the unknown image signal is being estimated as the mean of the concurrently realigned input images.

Finding the MLE corresponds to the non-linear optimization problem with simple bound constraints.

The optimization problem is solved iteratively using a projected Levenberg-Marquardt method, similar to the local approach proposed in [7].

Note that only reliable decisions are reported, i.e. for patches in sufficiently textured image areas, where the minimum eigenvalue of the approximate Hessian is sufficiently large during optimization.

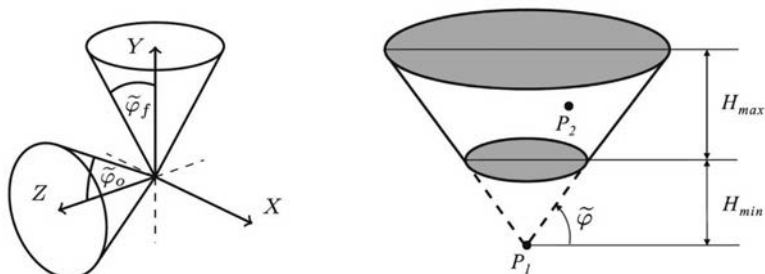


Fig. 2: Direct Planar Hypothesis Testing (PHT) [Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]: The angles $\tilde{\varphi}_f$ and $\tilde{\varphi}_o$ constrain the allowed plane normal orientations. The Z axis represents the optical axis of the camera (left). Point Compatibility Method cluster criterion - see text for details (right).

3.2 Fast Direct Planar Hypothesis Testing (FPHT)

The PHT method provides high flexibility in terms of both model parameters and multi-camera configurations. However, for calibrated stereo cameras a simplified parametrization can be utilized, reducing the number of free parameters and the complexity of the optimization problem.

Thus we propose a Fast Direct Planar Hypothesis Testing (FPHT) method that exploits such a reparametrization, resulting in a computational speed-up of one order of magnitude without sacrificing detection performance in practice. The proposed reparametrization is based on considering

- rectified stereo image pairs and
- plane models without yaw or roll angles, i.e. $n_x=0$.

Under these assumptions, computation of the warp W is simplified significantly, since a plane with $n_x=0$ can be represented by a line in stereo disparity space [8].

The new parameter vector consists only of the disparity slope a and offset b , which directly relate to the 3D plane parameters.

If an optimization step results in an invalid configuration of a and b , both values are warped back onto the bounding line via vector projection.

As our principal motivation for FPHT is efficiency, we skip the estimation of the true image signal as in the PHT method and instead use the left image sample as the reference estimate. For both PHT and FPHT we use a Gaussian noise model, i.e. a squared error for the loss.

3.3 Point Compatibility (PC) Method

As a first baseline we use the Point Compatibility (PC) approach proposed in [9] and successfully applied in [10]. This geometric obstacle detection method is based on the relative positions of pairs of points in 3D space. Placing a truncated cone on a point P_1 , any point P_2 lying within that cone is labeled as obstacle and said to be *compatible* with P_1 . The cone is defined by the maximum slope angle ϕ , the minimum relevant obstacle height H_{\min} and the maximum connection height threshold H_{\max} (see Figure 2 right).

All points of a precomputed stereo disparity map are tested in this way by traversing the pixels from bottom left to top right. The truncated cones are projected back onto the image plane and the points within the resulting trapezium are labeled accordingly. The algorithm not only provides a pixel-wise obstacle labeling but at the same time performs a meaningful clustering of compatible obstacle points [10].

Similar to PHT and FPHT, the PC approach does not depend on any global surface or road model due to its relative geometric decision criterion. However, it does depend directly on the quality of the underlying point cloud.

3.4 Stixels

Furthermore, we use the Stixel approach of [5] as a baseline. Stixels provide a compact and robust description of 3D scenes, especially in man-made environments with predominantly horizontal and vertical structures. The algorithm distinguishes between a global ground surface model and a set of vertical obstacle segments of variable height. The segmentation task is based directly on a precomputed stereo disparity map and is performed column-wise in an optimal way via dynamic programming. The algorithm makes use of an estimated road model, a B-spline model as described in [11], and incorporates further features such as ordering and gravitational constraints.

The results of the Stixel computation depend both on the quality of the disparity map as well as the estimated road model.

3.5 Mid-level Representation: Cluster-Stixels (CStix)

Inspired by the compactness and flexibility of the Stixel representation, we present a corresponding extension for point-wise obstacle detection approaches such as PHT, FPHT and PC. Our aim is to create an obstacle representation similar to the Stixel algorithm, reducing the amount of output data and at the same time increasing robustness. Additionally, interpolating the sparse point clouds can even increase detection performance.

The proposed approach does not perform column-wise optimization like the actual Stixel algorithm, but consists of a clustering and a splitting step as described below.

3.5.1 Clustering

In the first step, density-based geometric point clustering is performed via a modified DBSCAN algorithm [12]. We approximate the circular point neighborhood regions of the original algorithm by rectangles for efficient data access using bulk-loaded R-trees [13]. The orientation of the rectangular neighborhood regions is aligned to the viewing rays of the camera.

Furthermore, we introduce several distance-adaptive modifications, considering the characteristics of stereo-based point clouds. The sizes of neighborhood regions are adapted to the points' distances, according to the estimated disparity noise. Also, the minimum number of cluster points is scaled with the distance from the camera. The adaptive DBSCAN algorithm allows for the use of meaningful clustering parameters, combining real-world dimensions and disparity uncertainty, and avoids discretization artifacts typical of e.g. scaled grid maps.

Note that for the PC approach the clustering step is omitted, since the detection algorithm itself already provides a set of meaningful clusters.

3.5.2 Splitting

After the clustering phase, each cluster is split horizontally and vertically into a set of Stixel-like vertical boxes. The horizontal splitting step strictly enforces a fixed box width to ensure the characteristic Stixel layout. The optional vertical splitting step takes the precomputed disparity map into account and performs recursive splits only as long as the disparity variance of a Stixel box exceeds a certain threshold.

4. Evaluation

4.1 Lost and Found Dataset

In order to evaluate the performance of small road obstacle detection approaches, we introduce a novel dataset with recordings from 13 different challenging street scenarios, featuring 37 different obstacle types. The selected scenarios contain particular challenges including irregular road profiles, far object distances, different road surface appearance and strong illumination changes. The objects are selected to reproduce a representative set that may actually appear on the road in practice (see Fig. 3). These objects vary in size and material, which are factors that define how hazardous an object may be for a self-driving vehicle in case the obstacle is placed within the driving corridor. Note that we currently treat some very flat objects (i.e. lower than 5 cm) as non-hazardous and thus do not take them into account in the results of Sect. 4.3.

The *Lost and Found* dataset consist of a total of 112 video stereo sequences with coarse annotations of free-space areas and fine-grained annotations of the obstacles on the road. Annotations are provided for every 10th frame, giving a total of 2104 annotated frames (see Fig. 3). Each object is labeled with a unique ID, allowing for a later refinement into different subcategories (e.g. obstacle sizes).

The dataset is split into a Train/Validation subset and a Test subset. Each of these subsets consists of recordings in completely different surroundings, covering a similar number of video sequences, frames and objects. The Test subset contains nine previously unseen objects that are not present at all in the Training/Validation subset. Further, the test scenarios can be considered to be more difficult than the training scenarios, owing e.g. to more complex road profile geometries.

The stereo camera setup features a baseline of 21 cm and a focal length of 2300 pixels, with spatial and radiometric resolutions of 2048×1024 pixels and 12 bits. While the dataset contains full color images, all methods considered in the present work make use only of the grayscale data.



Fig. 3: Collection of objects included in the Lost and Found dataset

To the best of our knowledge, this represents the first publicly available dataset with its main focus on the detection of small hazards and lost cargo on the road. We hope that this dataset supports further research on this critical topic for self-driving vehicles.

4.2 Metrics

To quantitatively analyze the detection performance of the different approaches, pixel- and object-level metrics derived from related computer vision problems are defined while keeping the application focus in mind (see [6] for details). In this work, we focus on the object level.

4.2.1 Object-Level Metric

The main drawback of pixel-level metrics is its bias toward object instances that cover large areas in the images. This object-level metric analyzes the overlap between the pixel-accurate annotations and the Stixel results of the proposed algorithms. A Stixel is defined as false positive if its overlap with the labeled free space area is larger than 50%, ignoring 10px (1/4°) around the ground truth objects since these error types due to foreground fattening are considered acceptable. Likewise, a detection is considered a true positive if it has more than 50% overlap with the ground truth label. An object is considered detected if one Stixel is found, admittedly an optimistic interpretation yielding an upper bound for detection rate.

We also report instance-intersection values as in [6]. Instance-intersection computes the overlap between the ground truth object and the Stixel clusters which differs from the object-level detection rate.

4.3 Results

4.3.1 Experimental Setup

All methods as described above are evaluated in detail in [6].

PHT and FPHT are initialized using a dense disparity map, precomputed via Semi-Global Matching (SGM) [14]. The same disparity map provides the input to the PC and Stixel approaches.

For the additional computation of the mid-level Cluster-Stixels representation we use a fixed set of parameters.

4.3.2 Quantitative Results

The primary methods described above (PHT, FPHT, PC and Stixels) are evaluated in detail in [6]. At a false-positive-stixel-per-frame rate of 25, we obtain around 55% instance-intersection for PHT and FPHT (using Stixel clusters), around 45% for the PC method and less than 35% for the Stixel method from [5]. From this central result we can see that PHT and FPHT perform similarly with FPHT being 10 times more computationally efficient. PC performs clearly worse and the Stixel method is not suitable for detecting small obstacles.

We took a parameter set from [6] which yields about 5 false positive Stixels per frame and performed further evaluations with an application-minded focus. With the ignore-area around ground-truth objects we obtain 0.3 false positive Stixels per frame for this parameter set.

Figure 4 shows a plot of detection rate over distance, showing the difficulty of detecting small objects at large distances. In our set of lost cargo objects (height 5cm and above) we obtain around 85% average detection rate for the first 30m.

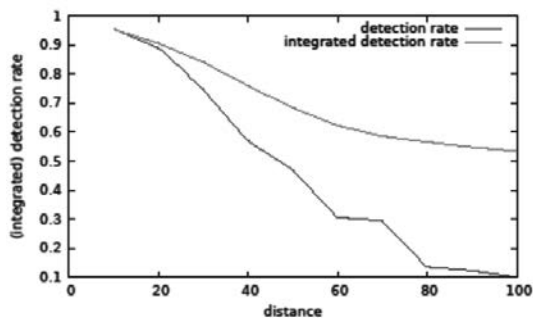


Fig. 4: Detection rate over distance [m] on the LostAndFound Dataset for FPHT.

In Figure 5, the connection between object size in the image (proportional to height over distance) and detection range is clearly visible. At sizes beyond 15px in the image the detection rate is above 95%.

FPHT runs in real-time with a framerate of about 20Hz on 2MP imagery using GPU acceleration.

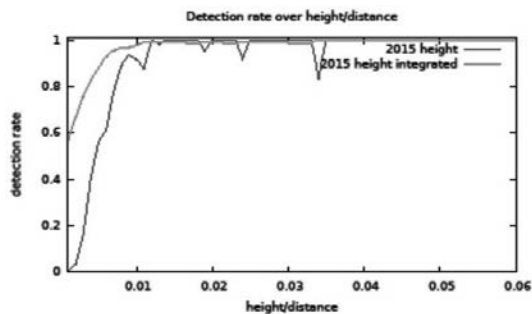


Fig. 5: Detection rate over object height/distance (prop. to height in pixel, height/distance=0.007 corresponds to 15px) for FPHT.

4.3.3 Qualitative Results

Fig. 6 depicts qualitative results of the evaluated methods on three example scenarios from the Test subset. The left column shows a typical example of a small road hazard (bobby car) in a residential area. In this case, due to the flat road profile and the medium object size, all methods are able to successfully detect the object.

In the middle column, an example with objects at large distances on a bumpy surface is shown. At such distances, the signal-to-noise ratio of the disparity measurements drops significantly, leading to a very low quality of the constructed 3D point cloud. Thus, neither the Stixel nor the PC approaches are able to detect the relevant objects in the scene. In contrast, the FPHT methods, which operate on the image data directly, still perform reasonably well at such large distances.

The scene in the rightmost column illustrates a rather challenging case for geometry-based obstacle detection approaches. A noticeable double kink in the longitudinal road profile would require an extremely accurate road model estimation for the Stixel method to be able to detect such small objects. While the PC and FPHT methods are invariant to such

conditions, only FPHT succeeds in actually detecting the tire on the left side of the image. The tire simply appears to be not prominent enough for a PC-based detection. Considering the FPHT-CSStix results, it can be seen that the detections cover larger portions of the obstacle than the FPHT results, which demonstrates the clustering step being a suitable compact representation. The second obstacle in the scene (square timber) is not detected by any of the methods due to its low profile.

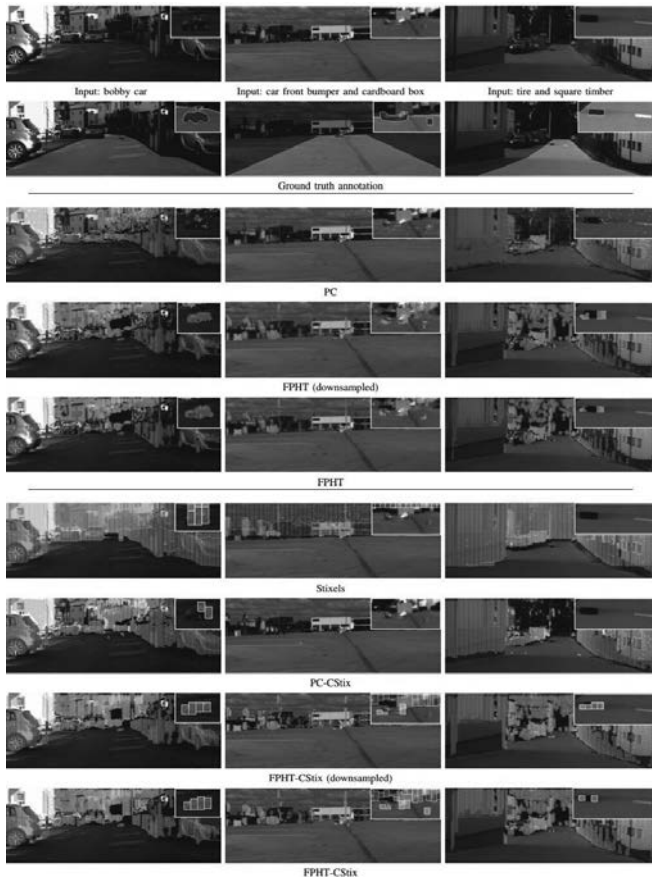


Fig. 6: Qualitative results of the evaluated methods. The top two rows show the left input image and the ground truth annotation, lower rows show pixel-wise and mid-level detections as overlay, color-coded by distance (red: near, green: far)

Overall, from the observed qualitative results it can be concluded that the FPHT methods show the best performance for various obstacles and scenarios. The PC methods suffer from increased false positives rates, since noisy disparity measurements directly influence the results. This effect could possibly be reduced by applying sophisticated spatial and temporal disparity filtering methods. The qualitative results also confirm the Stixel method's dependency on a correctly estimated road profile.

The main sources for false positive Stixels are remaining foreground fattening effects around the lost Cargo object, strong horizontal structure combined with slight stereo decalibration, and real objects such as grass and fallen leaves that can only be suppressed using semantics.

5. Conclusion

In this work, we have presented and evaluated an efficient stereo-based method for detecting small but critical road hazards, such as lost cargo, for self-driving vehicles. The approach extends previous work in this very relevant area, providing a significant gain in computational speed while at the same time outperforming all baseline methods. Additionally, the proposed mid-level representation Cluster-Stixels yields an extra gain in detection performance and robustness as well as a significant reduction in output complexity.

To allow for a detailed evaluation, we introduced the *Lost and Found* dataset, comprising over 2000 pixel-wise annotated stereo frames in a wide range of locations and road conditions and with generic objects of various types and sizes on the road. Based on the presented performance metrics, the experimental evaluation clearly demonstrates the efficacy of the proposed methods. An average detection rate around 85% is obtained for small lost cargo objects within 30m distance.

Future work may include a fusion of the considered geometric methods with an appearance-based approach using convolutional neural networks, where the *Lost and Found* dataset can be employed for training.

References

- [1] American Automobile Association, "25000 crashes a year due to road debris," AAA, Tech. Rep., 2004, URL:<https://www.aaafoundation.org/sites/default/files/Crashes.pdf>.
- [2] NHTSA, "Traffic safety facts 2011," NHTSA, Tech. Rep., 2011, URL:<http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/811754AR.pdf>, p. 72.
- [3] H. H. Schwabach, M. Harrer, A. Waltl, H. Bischof, G. Tacke, G. Zoffmann, C. Beleznai, B. Strobl, H. Grabner, and G. Fernandez, "VITUS: Video Image Analysis for Tunnel Safety," in 3rd International Conference on Tunnel Safety and Ventilation, 2006.
- [4] P. Pinggera, U. Franke, and R. Mester, "High-Performance Long Range Obstacle Detection Using Stereo Vision," in IROS, 2015.
- [5] D. Pfeiffer and U. Franke, "Towards a Global Optimal Multi-Layer Stixel Representation of Dense 3D Data," in BMVC, 2011.
- [6] P. Pinggera, S. Ramos, S. Gehrig, U. Franke, C. Rother and R. Mester, "Lost And Found: Detecting Small Road Hazards for Self-Driving Vehicles," in IROS, 2016.
- [7] C. Kanzow, N. Yamashita, and M. Fukushima, "Levenberg-Marquardt Methods with Strong Local Convergence Properties for Solving Nonlinear Equations with Convex Constraints," J. of Computational and Applied Mathematics, vol. 172, pp. 375–397, 2004.
- [8] R. Labayrade, D. Aubert, and J.-P. Tarel, "Real Time Obstacle Detection in Stereovision on Non Flat Road Geometry Through "V-disparity" Representation," in IV, 2002.
- [9] R. Manduchi, A. Castano, A. Talukder, and L. Matthies, "Obstacle Detection and Terrain Classification for Autonomous Off-Road Navigation," Autonomous Robots, vol. 18, pp. 81–102, 2005.
- [10] A. Broggi, M. Buzzoni, M. Felisa, and P. Zani, "Stereo Obstacle Detection in Challenging Environments: The VIAC Experience," in IROS, 2011.
- [11] R. Labayrade, D. Aubert, and J.-P. Tarel, "Real Time Obstacle Detection in Stereovision on Non Flat Road Geometry Through "V-disparity" Representation," in IV, 2002.
- [12] M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, and X. Xu, "A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise," in KDD, 1996.
- [13] A. Guttman, "R-trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching," in ACM SIGMOD, 1984, pp. 47–57.
- [14] S. Gehrig, R. Stalder, and N. Schneider, "A Flexible High-Resolution Real-Time Low-Power Stereo Vision Engine," in ICVS, 2015.

Entwicklung einer Beobachtungsmethode von Verhaltensströmen in kooperativen Situationen im innerstädtischen Verkehr

J. Imbsweiler, M. Ruesch, Prof. Dr. B. Deml, ifab KIT;
R. Palyafári, Prof. Dr. F. Puente León, IIIT KIT

Kurzfassung

Um Verkehrssicherheit zu gewährleisten, ist es notwendig, dass autonom fahrende Fahrzeuge auch in kooperativen Situationen mit menschlichen Verkehrsteilnehmern adäquat reagieren können. Insbesondere im innerstädtischen Verkehr ist es oftmals erforderlich, dass der Fahrer mittels expliziter Kommunikation – z. B. Handgeste, Lichthupe oder mittels impliziter Kommunikation, wie z. B. über ein gezieltes Verlangsamens – mit anderen Verkehrsteilnehmern in Kooperation tritt. Von Interesse für die Forschung ist, wie diese Situationen entstehen und von den Verkehrsteilnehmern gelöst werden. Einzelne Verhaltensweisen sind zwar bekannt und beschrieben [1], aber wie diese in Kombination oder in einem kompletten Verhaltensstrom auftreten, ist bislang nicht untersucht.

Um diese Forschungslücke zu schließen, wurde eine Verhaltensbeobachtungsmethode mit menschlichen Beobachtern entwickelt, die es ermöglicht, nicht nur einzelne Verhaltensweisen herauszufiltern, sondern vollständige und komplexe Verhaltensströme von Verkehrsteilnehmern zu erfassen. Aufbauend darauf sollen Ableitungen getroffen werden, die erklären, wie sich menschliche Verkehrsteilnehmer in kooperativen Situationen verhalten. Des Weiteren können aufbauend auf der Methode Fallbeispiele identifiziert werden.

Abstract

In order to insure traffic safety, autonomously driving cars must react in cooperative situations with human traffic participants adequately. Especially in urban traffic direct communication (e.g., gesturing, flashing) or indirect communication, like precise deceleration, cooperation with other traffic participants is often needed. Although we are addressing a common daily task, it is still a topic of research to describe in a formal way how these cooperative situations arise and how traffic participants cope with them. Some single behaviors are already

described [1], but how they arise in combination or even in a complete pattern has not yet been subject of research.

In order to close this research gap, we have developed a behavior observational method, which can detect complete and complex behavior patterns of traffic participants. Based on this method, conclusions about the human behavior in cooperative traffic situations will be drawn and case examples will be identified.

1. Einleitung und Motivation

Die Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern rückt mit der Entwicklung des autonomen Fahrens immer mehr in den Fokus der Forschung [2]. Aus systemtheoretischer Sicht [3] ist Kommunikation im Verkehr immer dann nötig, wenn mindestens zwei Teilnehmer ein gemeinsames Ziel verfolgen. Ein auf den Verkehr übertragenes Beispiel wäre das Bewältigen einer kooperativen Situation im Straßenverkehr, wie eine gleichrangige Engstelle bei der aus jeder Richtung zeitgleich ein Verkehrsteilnehmer kommt. Nach Ceunynck [4] steht Kommunikation in enger Verbindung zur Kooperation oder Interaktion. Interaktion tritt dann auf, wenn zwei Verkehrsteilnehmer in einem räumlich und zeitlich engen Abstand aufeinander treffen und bereits die Präsenz des einen Verkehrsteilnehmers einen Einfluss auf das Verhalten des anderen hat. Im Unterschied zur Interaktion wird unter Kooperation verstanden, dass nicht nur das Aufeinandertreffen im Fokus steht, sondern auch das Erreichen eines gemeinsamen Zieles [3].

Die StVO schreibt vor, dass in Situationen, in denen die Rechtsgrundlage unklar ist, eine Kooperation zwischen den Verkehrsteilnehmern stattfinden muss. Des Weiteren ist in §11(3) StVO beschrieben: „Auch wer sonst nach den Verkehrsregeln weiterfahren darf oder anderweitig Vorrang hat, muss darauf verzichten, wenn die Verkehrslage es erfordert; auf einen Verzicht darf man nur vertrauen, wenn man sich mit dem oder der Verzichtenden verständigt hat“. Wie eine solche Kooperation bzw. Verständigung auszusehen hat, wird von dem Gesetzgeber nicht explizit beschrieben.

Situationen, welche eine derartige Kooperation erfordern, können unter anderem gleichrangige Engstellen, T-Kreuzungen oder X-Kreuzungen unter bestimmten Konstellationen sein. Wie Kooperationsverhalten im täglichen Straßenverkehr auftritt, ist nicht eindeutig dokumentiert und soll mit Hilfe einer Beobachtungsmethode analysiert werden, um Rückschlüsse für empfehlenswerte Verhaltensweisen von automatisch geführten Fahrzeugen in kooperativen Situationen zu ziehen.

2. Theoretische Grundlage und Ziel

Als theoretische Grundlage zum Thema Kommunikation im Straßenverkehr wird häufig Risser [4] zitiert, da er eine detaillierte Auflistung an Kommunikationszeichen aufführt. Dabei unterscheidet er zwischen offiziellen Signalen, wie z. B. Fahrtrichtungsanzeiger, Hupe oder Lichthupe, und inoffiziellen Signalen, wie beispielsweise Handgesten. Laut Risser [1] werden die inoffiziellen Signale im Allgemeinen falsch interpretiert und offizielle Signale gestalten sich oftmals als mehrdeutig. Diese Aussagen sind insgesamt kritisch zu betrachten, da sie nicht mit Studien quantitativ nachgewiesen worden sind. Risser [1] schlussfolgert daraus, dass Konflikte im Straßenverkehr da entstehen, wo falsche oder mehrdeutige Signale abgesetzt werden.

Des Weiteren ist auf Basis der Aufzeichnungen von Risser [1] unklar, wie Kommunikationszeichen verwendet werden, in welcher Frequenz und in welchen Kombinationen sie auftreten.

Die Unterscheidung zwischen inoffiziellen und offiziellen Signalen ist wichtig, da im täglichen Straßenverkehr nicht nur die offiziell angegebenen Signale verwendet werden, sondern auch Signale, die sich durch den täglichen Einsatz erst etabliert haben. Björklund und Åberg [6] gehen noch einen Schritt weiter und unterscheiden zwischen offiziellen Regeln und inoffiziellen Regeln. Sie weisen darauf hin, dass es zu Konflikten kommen kann, wenn ein Verkehrsteilnehmer nach den offiziellen Verkehrsregeln und ein anderer Verkehrsteilnehmer nach den inoffiziellen Verkehrsregeln fährt.

Ceunynck et al. [4] führten eine Verkehrsbeobachtung durch, um zwischen dem Kreuzungstyp „Rechts-vor-Links-Kreuzung“ und „Vorfahrtskreuzung“ Unterschiede u. a. in Bezug auf Nachgebenverhalten und Kommunikation zu ermitteln. Methodisch wurde die Beobachtung umgesetzt, indem mit Verkehrskameras an drei Kreuzungen die prozentualen Häufigkeiten folgender Verhaltensweisen protokolliert wurden: die Reihenfolge der Ankunft, die Blickrichtung der Fahrer, Trajektorie und explizites Kommunikationsverhalten, bestehend aus Geste, Lichthupe, Hupe und Fahrtrichtungsanzeiger. Für die hier behandelte Forschungsfrage ist es problematisch, dass das explizite Verhalten zusammengefasst wurde, allerdings konnte in zwei von drei Kreuzungen explizites Verhalten nur einmal beobachtet werden. Aufbauend auf den Beobachtungen haben die Autoren das Nachgebenverhalten mit Hilfe einer logistischen Regression modelliert. Da die Beobachtungsstudie [4] in Schweden durchgeführt wurde, ist es schwierig, die Ergebnisse auf deutsches Fahrverhalten zu übertragen; die Methodik der Beobachtung und Notation der Ereignisse in aufgetreten oder nicht kann allerdings als Vorbild dienen. Interessant wäre es auch, die Reihenfolge des Verhaltensstroms zu erfassen, um zu wissen, in welcher Reihenfolge welches Verhalten gezeigt wird und welchen

Einfluss die Reihenfolge auf die Kooperation hat. In der Studie selbst ging es um Rechts-vor-Links-Situationen, allerdings wäre es für weitere Forschungsfragen interessant, welche Konstellationen an verschiedenen innerstädtischen Kreuzungstypen auftreten, um Rückschlüsse daraus zu ziehen, welche Situationen automatisch geführte Fahrzeuge beherrschen müssen.

3. Entwicklung der Methode

An den beschriebenen Punkten aus dem vorherigen Kapitel setzt die hier vorgestellte Arbeit an, und folgende Anforderungen soll die Verhaltensbeobachtungsmethode erfüllen:

- a) Es soll möglich sein, aufgetretene Verkehrssituationen nachträglich zu rekonstruieren. b) Es ist wichtig, die Reihenfolge der Verhaltensweisen zu erfassen. c) Die Überführung in einen Verhaltensstrom soll möglichst schnell und mit einfachen Mitteln durchführbar sein.

3.1 Verhaltensspezifikation

Es wurde ein Beobachtungsbogen entwickelt, der sowohl für Videobeobachtungen als auch für Beobachtungen vor Ort angewendet werden kann und mit dem folgende Parameter erfassbar sind:

- **Trajektorie:** links, rechts, geradeaus;
- **Implizites Kooperationsverhalten zum Ausdruck der eigenen Verhaltensintention:** Beschleunigen, Verlangsamen, Geschwindigkeit halten und Stoppen;
- **Explizites Kooperationsverhalten zum Ausdruck der eigenen Verhaltensintention:** Hupe, Lichthupe, Fahrtrichtungsanzeiger, Handgeste;
- **Reihenfolge der Ankunft:** Absteigende Reihenfolge der ankommenden Verkehrsteilnehmer
- **Reihenfolge der Abfahrt:** Absteigende Reihenfolge der Situation verlassenden Teilnehmer

Auf die Erfassung der Blickrichtung sowie auf eine Aufschlüsselung der Handgesten (z. B. Heben der Hand als Dankeschön oder ein von links nach rechts Bewegen der Hand als Zeichen für Vorrang gewähren) wurde verzichtet, da dies während einer Echtzeit-Beobachtung nicht adäquat zu erfassen sind. Für eine Videobeobachtung kann angedacht werden, auch diese Parameter zu erheben.

3.2 Vorgehen

In Rücksprache mit dem Polizeipräsidium Karlsruhe wurden zunächst verkehrsintensive Kreuzungen mit einem hohen Potenzial an Kooperationssituationen identifiziert.

Die Methode wird durchgeführt, indem entweder per Videobeobachtung oder mit einem Beobachter vor Ort die Situation beobachtet wird. Für jeden potentiellen Interaktionspartner muss bei der Beobachtung vor Ort ein Beobachter eingesetzt werden. Bei einer X-Kreuzung wären dies vier Beobachter, bei einer T-Kreuzung wären es drei Beobachter.

Jedes Ereignis kann aus unterschiedlich vielen Interaktionspartnern bestehen, deswegen muss jeder Beobachter jedes Ereignis nummerieren und kennzeichnen, welche Verhaltensweisen auf den zugewiesenen Interaktionspartner zutreffen. Am Ende werden die Daten zusammengeführt. Auf diese Weise können die Ereignisse rekonstruiert und so gleiche oder ähnliche Situationen verglichen werden.

Zur Erfassung der Reihenfolge müssen die Beobachter nicht nur angeben, welche Verhaltensweisen aufgetreten sind, sondern auch in welcher Abfolge. Später können dann aus einzelnen Verhaltensweisen ein Verhaltensstrom zusammengeführt werden.

Neben den allgemeinen Angaben können auch zusätzlich erklärende Parameter erfasst werden wie Kreuzungstyp, Verkehrsobjekt (z. B. Fahrradfahrer oder Autofahrer) oder Wetter.

Vor dem Start der Beobachtung wurde ein Training durchgeführt, bei dem verschiedene Videosequenzen betrachtet wurden. Des Weiteren wurde das Codierungsschema besprochen und vereinheitlicht.

Am Ende der Beobachtung müssen die Bögen der Beobachter synchronisiert werden, um eine Auswertung der Situation im Gesamten zu gewährleisten.

3.3 Interrater-Reliabilität

Um sicherzustellen, dass die Bewertungen der Beobachter zusammengeführt werden können, wurde eine Vorstudie zur Interrater-Reliabilität durchgeführt, die im Folgenden kurz erläutert wird.

Insgesamt wurden $N = 64$ Verkehrsteilnehmer beobachtet, um die Interrater-Reliabilität zu bestimmen. Als Maß der Übereinstimmung wird die prozentuale Übereinstimmung sowie Cohens Kappa verwendet. Cohens Kappa gilt nach Bortz [7] im Bereich von 0.61 bis 0.80 als gut und von 0.81 bis 1.00 als sehr gut.

Tabelle 1: Interrater-Reliabilität der einzelnen beobachteten Variablen.

	Übereinstimmung in %	Cohens Kappa
Beschleunigung	100.000	1
Verlangsamung	93.800	0.682
Geradeaus	100.000	1
Geschw. halten	93.800	0.636
Links	100.00	1
Rechts	100.00	1
Stopp	100.00	1
Fahrtrichtungsanzeiger	96.900	0.933
Lichthupe	100.00	1
Horn	100.00	1
Handgeste	100.000	1
Ankunft	92.200	0.817
Abfahrt	96.900	0.927
Gesamtmittelwert	97.300	0.92
Codierung der Reihenfolge	90.625	0.850

Nach den Ergebnissen aus Tabelle 1 sind die Werte als sehr gut einzuschätzen. Im Mittel beträgt Cohens Kappa 0.92. Somit ist die Methode in Hinblick auf die Interrater-Reliabilität nach Bortz [6] als sehr gut einzuschätzen. Cohens Kappa ist mit 0.682 für die Kategorien „Verlangsamen“ und 0.636 für „Geschwindigkeit halten“ immer noch in einem guten Bereich, aber nicht auf dem hohen Niveau der anderen Variablen. Ein Grund könnte sein, dass es für die Beobachter bei einer Echtzeitbeobachtung schwierig ist, einzuschätzen, ob minimal verlangsamt oder die Geschwindigkeit gehalten worden ist. Es gilt zu überprüfen, ob sich die Werte bei einer Videobeobachtung verbessern.

4. Ergebnisse der Beobachtungsstudie

Die Methode wurde getestet, indem eine X-Kreuzung, eine T-Kreuzung, eine einseitige und eine gleichrangige Engstelle beobachtet wurden, die sich alle in Tempo-30-Zonen befinden. Es ist davon auszugehen, dass es bei diesen Straßenmerkmalen zu Kooperationen kommen wird, da keine Schilder oder Ampelanlagen den Verkehr regeln.

Im Folgenden werden die Ergebnisse für jeden Kreuzungstyp einzeln vorgestellt. Der Fokus liegt hierbei nicht auf den Ergebnissen, sondern den Möglichkeiten und Potenzialen der entwickelten Methode.

4.1 X-Kreuzung

Es wurde eine X-Kreuzung fünf Stunden lang beobachtet, dabei konnten $N = 133$ Ereignisse erfasst werden. Darunter werden Verkehrssituationen verstanden, bei denen mind. zwei Verkehrsteilnehmer beteiligt sind und daraus eine Interaktion entstanden ist. Innerhalb der 133 Ereignisse konnten $N = 33$ verschiedene Verkehrssituationen rekonstruiert werden.

Unter Rekonstruktion wird verstanden, dass die verschiedenen Trajektorienkombinationen der Verkehrsteilnehmer nachgebildet worden sind und diese in Kategorien eingeteilt worden sind. Insgesamt gab es $N = 86$ Situationen mit zwei Verkehrsteilnehmern, $N = 42$ Situationen mit drei Verkehrsteilnehmern und $N = 5$ mit vier Verkehrsteilnehmern.

Die am häufigsten eingetretene Situation ist eine Rechts-vor-Links-Situation (siehe Bild 1). Insgesamt konnten neben der klassischen Rechts-vor-Links-Situation auch Situationen beobachtet werden, die Abbiegevorgänge und andere kompliziertere Trajektorien beinhalten (siehe Bild 2).

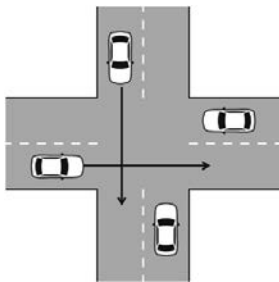


Bild 1: Die häufigsten Situationen bei der X-Kreuzung mit 20 Ereignissen.

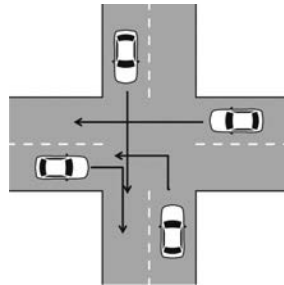


Bild 2: Beispiel für ein komplexeres Ereignis mit vier Teilnehmern.

Die Rekonstruktion der Situationen ist dahingehend interessant, dass auf der einen Seite Situationen ausgewählt werden können, die von Interesse sind, sowie auf der anderen Seite einen allgemeinen Überblick zu erhalten, welche Situationen am häufigsten auftreten.

Neben der Rekonstruktion der Situationen können auch die allgemeinen Verhaltensströme aufgezeigt werden. Dabei kann betrachtet werden, welche Verhaltensweisen im Allgemeinen aufgetreten sind (siehe Bild 3).

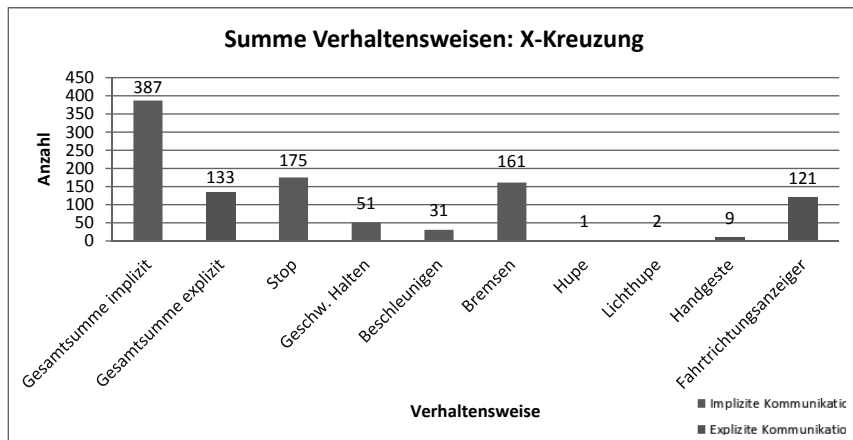


Bild 3: Übersicht über die aufgetretenen Verhaltensweisen in der X-Kreuzung.

Auffällig hier ist, dass wenig über explizite Kommunikationszeichen kommuniziert wird und ein Großteil der Kommunikation implizit über das Fahrverhalten stattfindet. Es gilt anzumerken, dass zum aktuellen Zeitpunkt unklar ist, wie das Verhältnis von impliziter Kommunikation zu expliziter Kommunikation ist. In der Untersuchung von Ceunynck et al. [4] verwendeten ca. 27 % der Fahrer mindestens ein explizites Kommunikationssignal. Bei dieser Beobachtung verwendeten 34,36 % ein explizites Kommunikationssignal. Somit liegt die Verwendung von expliziten Kommunikationssignalen auf einem ähnlichen Niveau.

Was im Gesamtüberblick nicht zu sehen ist, ist der exakte Verhaltensstrom. Unter Verhaltensstrom wird die Reihenfolge der aufgetretenen Verhaltensweisen verstanden. Dies geschieht im nächsten Schritt.

Dafür muss eine Verkehrssituation ausgewählt werden, die von Interesse ist. Beispielsweise könnte es von Interesse sein, wie Verkehrsteilnehmer unabhängig von der Verkehrssituation die Kreuzung überqueren, wenn sie rechts abbiegen wollen. So kann überprüft werden, ob erst der Bremsvorgang eingeleitet wird und dann geblinkt oder ob die umgekehrte Reihenfolge präferiert wird. Die Verhaltensströme für das Beispiel werden in Bild 4 präsentiert.

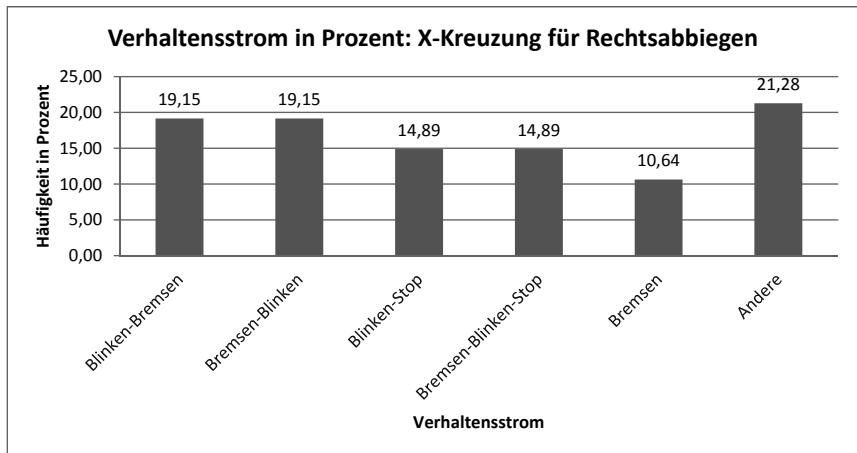


Bild 4: Übersicht Verhaltensströme am Beispiel der X-Kreuzung für Rechtsabbiegen.

An diesem Beispiel wird ersichtlich, dass das meistgewählte Muster Bremsen und Blinken ist, wobei auch die Reihenfolge gleich häufig auftritt. Es lässt sich daher keine Aussage darüber treffen, ob die Verkehrsteilnehmer eine Reihenfolge präferieren. In diesem Fall treten die beiden zu erwartenden Varianten gleich häufig auf.

Wie an diesem Beispiel deutlich wird, ist es auf einen Blick möglich, die aufgetretenen Verhaltensweisen zu betrachten und diese in Verhaltensströme zu überführen.

4.2 T-Kreuzung

Die T-Kreuzung wurde fünf Stunden lang beobachtet. Dabei konnten $N = 33$ Ereignisse beobachtet werden. Es konnten zwölf verschiedene Verkehrssituationen rekonstruiert werden. Insgesamt konnten 30 verschiedene Verkehrssituationen mit zwei Verkehrsteilnehmern rekonstruiert werden und drei mit drei Verkehrsteilnehmern.

Bei der Betrachtung der allgemeinen Verhaltensweisen fällt auf (Bild 5), dass bis auf die Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers und zwei Handgesten keine expliziten Kommunikationszeichen verwendet wurden.

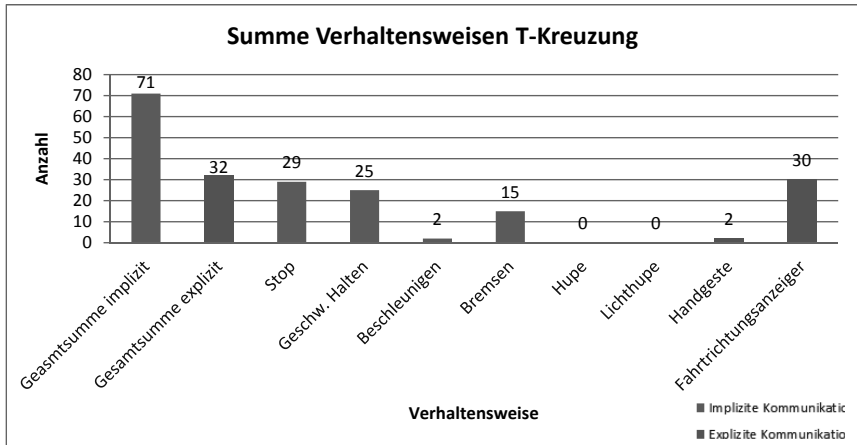


Bild 5: Übersicht der aufgetretenen Verhaltensweisen bei der T-Kreuzung.

Für die bisher gezeigten Verhaltensströme wurden die Daten der Fahrradfahrer herausgefiltert. Man könnte aber beispielsweise auch den typischen Verhaltensstrom eines Radfahrers betrachten. Es können bei der T-Kreuzung drei verschiedene Positionen belegt werden, diese sind in Bild 6 dargestellt. Insgesamt konnten 17 Radfahrer beobachtet werden, wovon zehn von Position 2 (P2) und sieben von Position 3 (P3) kamen.

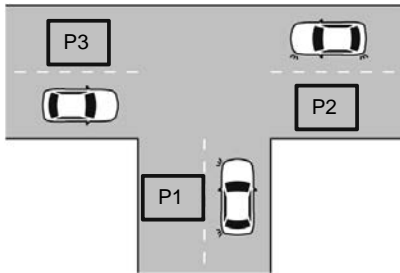


Bild 6: Überblick der verschiedenen Positionen bei der T-Kreuzung.

Für statistisch valide Aussagen ist die Stichprobengröße zu klein. In einem ersten Schritt könnte auf deskriptivem Niveau überprüft werden, ob es einen Unterschied zwischen Radfahrern, die aus Position 2 abbiegen und Radfahrern, die aus Position 3 abbiegen gibt. Es wird deutlich, dass die beobachteten Radfahrer nur in zwei Fällen ein Handzeichen während

des Abbiegens verwendet haben. Des Weiteren haben die Radfahrer in dieser Stichprobe die Geschwindigkeit während des Abbiegens nicht reduziert.

Die dargebotenen Verhaltensströme sind als Beispiele zur Veranschaulichung der Nutzungsmöglichkeiten der Methode zu verstehen. Aufgrund der Detailtiefe können die Verhaltensströme für diverse Untergruppen betrachtet werden.

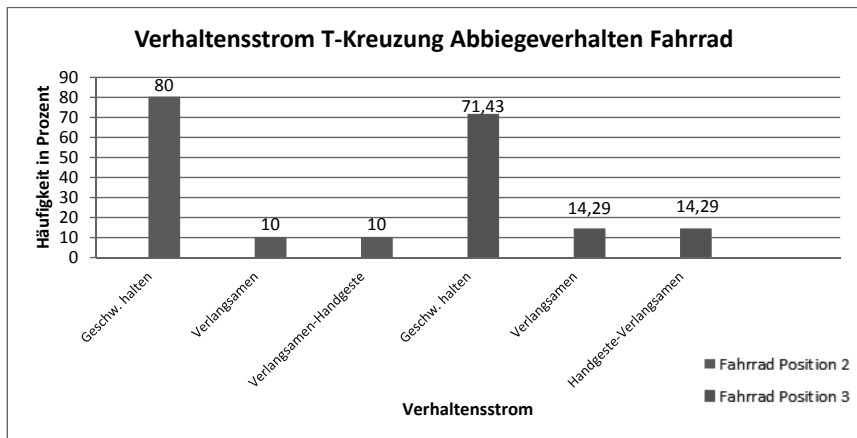


Bild 7: Verhaltensstrom für abbiegende Fahrradfahrer bei der T-Kreuzung.

4.3 Engstelle

Eine Rekonstruktion der Situationen, wie bei der X- oder T-Kreuzung erläutert, ist bei einer klassischen Engstelle nicht notwendig, da nur eine relevante Situation auftreten kann – und zwar wenn sich zwei Verkehrsteilnehmer zeitgleich begegnen.

Für die Methode wurden zwei verschiedene Arten von Engstellen betrachtet. Die erste Engstelle war eine baubedingte, einseitige Engstelle, die zweite eine gleichrangige Engstelle auf Grund zweier gegenüber parkender Autos. Es galt zu untersuchen, ob es einen Unterschied im Verhaltensstrom zwischen einseitiger und gleichrangiger Engstelle gibt.

Insgesamt konnten $N = 51$ Situationen für die einseitige Engstelle und $N = 40$ Situationen für die gleichrangige Situation beobachtet werden.

Im Allgemeinen konnten die in Bild 8 dargestellten Verhaltensströme beobachtet werden. Auffällig ist, dass nur vier Verkehrsteilnehmer an der gleichrangigen Engstelle und niemand an der einseitigen Engstelle geblinkt haben. Des Weiteren stehen 15 Verhaltensströme mit

expliziten Kommunikationszeichen bei der einseitigen Engstelle vier Verhaltensströmen bei der gleichrangigen Engstelle gegenüber.



Bild 8: Übersicht Verhaltensströme für einseitige und gleichrangige Engstelle.

Um die Detailtiefe der Methode zu testen sowie für weitere Forschungsfragen der Autoren ist es von Interesse, ob es einen Unterschied im Verhalten zwischen einer gleichrangigen und einer einseitigen Engstelle gibt. Besonders von Interesse ist, ob die Verkehrsteilnehmer an der einseitigen Engstelle defensiver an die Engstelle heranfahren (Position 1) als die Verkehrsteilnehmer an der gleichrangigen Engstelle. Dafür wurden alle Verhaltensströme ermittelt und in defensiv oder offensiv eingeteilt. Verhaltensströme, die mit Verlangsamen oder einem Stoppen endeten, wurden als defensiv kategorisiert und Verhaltensströme, die mit Geschwindigkeit halten oder Beschleunigen endeten, wurden als offensiv eingeordnet. Des Weiteren wurde zum Vergleich noch bei der einseitigen Engstelle die Position einbezogen, die nach StVO Vorrang hätte (Position 2).

Tabelle 2: Unterschiede zwischen gleichrangiger Engstelle und einseitiger Engstelle für defensive und offensive Verhaltensströme.

	defensiv	offensiv
Gleichrangig Position 2	83,72 %	16,28 %
Gleichrangig – Position 1	25,58 %	74,42 %
Einseitig – Position 2	50,98 %	49,02 %
Einseitig Position 1	25,49 %	74,51 %

Es wird ersichtlich, dass sich Verkehrsteilnehmer an eine einseitige Engstelle deutlich offensiver nähern als an eine gleichrangige Engstelle. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass bei der gleichrangigen Engstelle unklar ist, wer Vorrang hat und deswegen die Verkehrsteilnehmer einen defensiveren Verhaltensstrom wählen. Zusätzlich ist es interessant, dass bei der einseitigen Engstelle für Position 1 das Verhältnis zwischen offensiven und defensiven Verhaltensströmen fast ausgeglichen ist. Im direkten Vergleich zur gegenüberliegenden Position der einseitigen Engstelle ist zu erkennen, dass hier mit 74,51 % ein Großteil der Verkehrsteilnehmer offensiv gefahren ist und somit ein erhöhtes Konfliktpotential besteht.

Für die Engstelle bleibt festzuhalten, dass auf Basis der Beobachtung verschiedene Verhaltensweisen identifiziert werden konnten, um darauf aufbauend ein Experiment abzuleiten.

Des Weiteren wurden für ein weiteres Experiment zum Annäherungsverhalten an Engstellen auf Basis der Ermittlung der Verhaltensströme folgende sechs Annäherungsversuche herausgearbeitet: markantes Stoppen, Verlangsamen mit einer Lichthupe, Stoppen und Lichthupe, Beschleunigen, Geschwindigkeit halten sowie Verlangsamen. Diese werden in einem darauffolgenden Experiment getestet werden, um Unterschiede in der Wahrnehmung zwischen den verschiedenen Annäherungsweisen zu ermitteln.

Des Weiteren ist an der Engstelle ersichtlich, wie wichtig das Zusammenspiel von impliziter Kommunikation und expliziter Kommunikation ist. Insbesondere in Verbindung mit dem Konzept von den inoffiziellen Signalen [6] wird deutlich, dass noch mehr Bedarf für die Analyse von Kommunikationssignalen besteht, denn obwohl das Blinken nach Gesetz verdeutlichen soll, dass ein Vorbeifahren an der Engstelle angedacht ist und kein Stehenbleiben intendiert ist, haben sowohl bei der gleichrangigen Engstelle nur 13,73 % wie auch bei der einseitigen Engstelle nur 9,03 % der Verkehrsteilnehmer geblinkt. Insgesamt sollten die inoffiziellen Signale im Zusammenhang mit den Verhaltensströmen näher analysiert werden, um bessere Aussagen treffen zu können.

5. Fazit

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die vorgestellte Methode es schafft, die gesetzten Ziele der Rekonstruktion der Situationen, Erfassung der Reihenfolge der Verhaltensweisen sowie eine Überführung in einen Verhaltensstrom mit einfachen Mitteln zu erfüllen. Es ist möglich, mit der Methode sehr schnell und mit einem geringen Aufwand, eine Verkehrsbeobachtung durchzuführen. Des Weiteren ist es möglich, verschiedene Kreuzungstypen auf einem ähnlichen Abstraktionsniveau, in diesem Fall die Verhaltensströme, zu analysieren. Deutlich wird dies durch die Analyse der vier verschiedenen Kreuzungstypen, die sich zwar hinsichtlich in ihrer Struktur unterscheiden haben, die Auswertemethodik aber die Gleiche bleibt. Das Hauptziel war die Erfassung von Verhaltensströmen und nicht das alleinige Identifizieren von einzelnen Handlungen. Die Erfassung von Verhaltensströmen ist gelungen. Durch die Rekonstruktion der verschiedenen Situationen ist es möglich, detaillierte Aussagen über einzelne Verhaltensweisen in spezifischen verkehrsrelevanten Interaktionen zu treffen und Fallbeispiele für weitere Experimentaluntersuchungen abzuleiten.

Auf Grund der geringen Zahl an beobachteten Interaktionen, verbietet sich eine Analyse auf inferenzstatistischem Niveau. Angedacht ist, die Analysen ähnlich wie Ceunynck et al. [3] in eine logistische Regression zu überführen. Da die Voraussetzungen für eine logistische Regression sehr streng sind, ist weiter angedacht, die Daten mittels nicht-metrischer multidimensionaler-Skalierung (NMDS) auszuwerten. Dies hat in einem Testdatensatz bereits sehr gut funktioniert. Es gilt zu überprüfen, ob dies auch ein geeignetes Werkzeug für die tatsächlichen Daten ist.

Als Nachteil der Echtzeitbeobachtung bleibt, dass nur die Verhaltensströme innerhalb eines Verkehrsteilnehmers betrachtet werden können. Für die Beobachtung per Video ist vorgesehen, dass nicht nur die Verhaltensströme der einzelnen Verkehrsteilnehmer betrachtet werden, sondern als Interaktionssequenz im Gesamtkontext zu betrachten.

Ein weiterer Kritikpunkt der Methode ist, dass nicht an jeder Kreuzung getestet werden sollte. Im innerstädtischen Bereich kann die Methode problemlos angewendet werden, da die Kreuzungen i. d. R. belebt sind. Eine Kreuzung in einem Ort ist deutlich weniger belebt und die Beobachter würden dort auffallen.

Des Weiteren kann die Reihenfolge auf Grund der Komplexität nicht immer mit erhoben werden, sodass mit einem Datenverlust zu rechnen ist.

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass es auch mit einfachen Mitteln möglich ist, komplexe Verkehrssituationen hinsichtlich ihrer Verhaltensströme zu analysieren und Aussagen zu treffen. Des Weiteren können kritische Verkehrssituationen identifiziert und Fallbeispiele abgeleitet werden.

Danksagung

Dieses Projekt wurde innerhalb des Schwerpunktprogramms „Kooperativ interagierende Automobile“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG finanziert. Die Autoren danken den Projektpartnern für die fruchtbare Zusammenarbeit.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Bauer, T., Risser, R., Soche, P., Teske, W., Vaughan, C.: Kommunikation im Straßenverkehr: Literaturstudie aus juridischem, kommunikationstheoretischem und psychologischen Blickwinkel. 1. *Zwischenbericht*. Wien. 1980
- [2] Färber, B.: Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern. In M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, & H. Winner (Eds.), *Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte* (S. 128–146). Berlin: Springer Vieweg. 2015
- [3] Hoc, J.-M.: Towards a cognitive approach to human–machine cooperation in dynamic situations. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol 54 (4), 2001, 509–540
- [4] Ceunynck, T. de, Polders, E., Daniels, S., Hermans, E., Brijs, T., & Wets, G.: Road Safety Differences Between Priority-Controlled Intersections and Right-Hand Priority Intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2365, 2013, 39–48
- [5] Henrich, J., Ensminger J., McElreath, R., Barr, A., Barrett, C. et al.: Markets, Religion, Community Size, and the Evolution of Fairness and Punishment. *Science*. Vol 327 (5972), 2010, 1480–1484
- [6] Björklund, G., & Åberg, L.: Driver behaviour in intersections: Formal and informal traffic rules. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol 8(3), 239–253, 2005.
- [7] Bortz, J., Döring, N.: *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*, 4. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg New York. 2006

Zuverlässigkeitsanalyse umfelderfassender Sensorik

Eine stochastische Methodik zur Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen am Beispiel von LiDAR Sensoren

M. Berk, Technische Universität München und AUDI AG (INI.TUM);
H.-M. Kroll, Dr. **O. Schubert**, Dr. **B. Buschardt**, AUDI AG, Ingolstadt;
Prof. Dr. **D. Straub**, Technische Universität München

Kurzfassung

Eine wesentliche Grundlage für Fahrerassistenzsysteme und das automatisierte Fahren stellt die maschinelle Wahrnehmung mithilfe umfelderfassender Sensorik dar. Aufgrund der hohen Sicherheitsrelevanz der maschinellen Wahrnehmung ist deren Zuverlässigkeit im Entwicklungsprozess der automatisierten Fahrfunktionen nachzuweisen. Dabei stellen vor allem die kleinen Zielfehlerraten sowie der stochastische Einfluss von zahlreichen Umgebungsbedingungen auf die Sensorperformance eine große Herausforderung dar. Als Grundlage für eine zuverlässigkeitsbasierte Absicherung der Sensoren führen wir in diesem Beitrag umfassende Zuverlässigkeitsmetriken ein, um die Unsicherheiten im Fahrzeugumfeldmodell stochastisch zu beschreiben. Wegen des Einflusses der Umgebungsbedingungen sind diese Metriken jedoch nicht konstant sondern stellen selbst stochastische Größen dar. Dadurch ergibt sich eine hierarchische Unsicherheitsstruktur mit Unsicherheiten höherer Ordnung. Wir schlagen ein Bayes'sches hierarchisches Regressionsmodell vor, um den Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Sensorzuverlässigkeit aus Erprobungsfahrten und Versuchen zu lernen. Zur Demonstration der Methodik untersuchen wir den Einfluss der Temperatur auf die Performance eines LIDAR Sensors. Es zeigt sich, dass dieser Einfluss identifiziert und genau quantifiziert werden kann. Die hier vorgestellten Metriken und die Methodik stellen einen wichtigen Schritt in Richtung formalisierter und zuverlässigkeitsbasierter Absicherung der Umfeldwahrnehmung dar. Für eine umfassende Absicherung der Sensorik muss die hier dargestellte Vorgehensweise um weitere stochastische Methoden ergänzt werden.

Abstract

Machine vision based on automotive environment sensors is the enabling technology for advanced driver assistance systems and automated driving. Due to its important role, the reliability of environment sensing is highly safety relevant and has thus to be assessed and

demonstrated during the development of the system. The main challenges associated with this task are low target error rates and the stochastic influence of different uncertain environmental conditions on the sensor performance. As a basis for the reliability assessment of environment sensors we introduce comprehensive performance metrics that allow a formal description of the uncertainties in a digital environmental model. Due to the influence of environmental conditions on the sensor performance, these metrics however are not constant but are random variables themselves. This leads to a hierarchical uncertainty structure including higher order uncertainties. To quantify the influence of the environmental conditions on the sensor reliability, we use a Bayesian hierarchical regression model. The utility of this method is demonstrated with a case study in which the influence of temperature on sensor reliability is examined. The results show that the proposed methodology is capable of identifying and quantifying the influence of the temperature on sensor performance. The introduced metrics and the proposed methodology are an important step towards a formalized reliability assessment of automotive environment sensing. In order to predict if the sensor reliability complies with the target error rates, the presented methodology has to be adapted and extended with additional stochastic methods.

1. Zuverlässigkeit von Umfeldsensoren im Kontext des automatisierten Fahrens

Die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen und die Erforschung automatisierter Fahrzeuge schreitet zügig voran [1 bis 8]. Der Übergang vom teilautomatisierten zum hoch- bzw. vollautomatisierten Fahren (Klassifikation nach [9]) ist für definierte Anwendungsfälle in der Serienproduktion bereits für die kommenden Jahre geplant [10 bis 12]. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die maschinelle Wahrnehmung basierend auf Umfeldsensoren, die als Grundlage für die Fahrzeugautomatisierung angesehen wird.

Im Gegensatz zu teilautomatisierten Fahrfunktionen (Level 2) muss der Fahrer hochautomatisierte Fahrfunktionen (Level 3) nicht dauerhaft überwachen [9], das System verlässt sich für einen gewissen Zeitraum vollständig auf die Umfeldsensorik. Dadurch erlangt diese eine hohe Sicherheitsrelevanz, sie muss zuverlässig funktionieren, um potentielles Systemversagen aufgrund unzureichender maschineller Umfeldwahrnehmung auszuschließen. Diese Zuverlässigkeit (siehe [13, 14] für eine Definition aus der klassischen Hardwarezuverlässigkeitsproblematik) ist im Zuge der Fahrzeugentwicklung nachzuweisen.

1.1. Problemstellung: Absicherung der Umfeldsensorik

Herkömmliche Absicherungsmethoden für sicherheitsrelevante (Elektrik- und Elektronik-) Komponenten gemäß dem aufsteigenden Ast im etabliertem V-Modell der ISO26262 stoßen jedoch aufgrund der kontext- und umgebungsabhängigen Leistungsfähigkeit von Fahrerassistenzsystemen an ihre Grenzen [15]. Dies gilt nicht zuletzt auch für die Sensorik. Die Leistung und Genauigkeit von Umfeldsensoren hängt von unsicheren und variablen Umgebungsbedingungen ab, etwa vom Wetter, Störstrahlung, Verschmutzungen oder Objektreflexionseigenschaften [16 bis 20]. Eine wesentliche Herausforderung bei der Sensorabsicherung liegt daher in der großen Anzahl dieser räumlich und zeitlich variablen Umgebungsbedingungen mit Einfluss auf die Sensorleistungsfähigkeit.

Neben den variablen Umgebungsbedingungen stellt der hohe Absicherungsaufwand aufgrund von Zielfehlerraten des Gesamtsystems von bis zu 10^{-8} h^{-1} [21] eine wesentliche Herausforderung für die Absicherung der Zuverlässigkeit von Umfeldsensoren dar. Dieser ist empirisch mit reinen Erprobungsfahrten kaum zu bewältigen, wie in [22] für das autonome Fahren gezeigt wird. Zusätzlich zur Erprobungsfahrt selbst liegt ein beträchtlicher Teil des Aufwandes in der Erhebung von Referenzdaten (ground truth) und der Auswertung der Daten.

Um die Freigabe der Systeme für hoch- und vollautomatisiertes Fahren für zahlreiche Anwendungsfälle effizient bewältigen zu können, müssen unter anderem neue Metriken und Methoden entwickelt werden, um die Zuverlässigkeit der maschinellen Wahrnehmung nachzuweisen [23]. Eine Fragestellung ist die Formalisierung der Unsicherheiten der Umfeldsensoren [22]. Dabei reicht es keinesfalls aus, die Leistungsfähigkeit der Sensoren unter Laborbedingungen zu bestimmen, weil der stochastische Einfluss der Umgebungsbedingungen dadurch vernachlässigt werden würde. Stattdessen müssen Wege gefunden werden, die Umgebungseinflüsse adäquat zu berücksichtigen.

In diesem Beitrag skizzieren wir am Beispiel von LIDAR-Sensoren (siehe [24] für die technischen Hintergründe) ein stochastisches Konzept für eine zuverlässigkeitsbasierte Absicherung der Umfeldsensorik, welches den genannten Herausforderungen begegnet. Die wesentliche Innovation dieses Beitrags ist die konsistente Behandlung der Leistungsfähigkeit des betrachteten Sensors mit mathematisch fundierten Zuverlässigkeitsmetriken. Ebenfalls wird ein Lösungsansatz für die Absicherung der Sensoren vor dem Hintergrund von unsicheren und variablen Umgebungsbedingungen aufgezeigt.

Zunächst geben wir in Kapitel 1.2 einen Überblick über vorhandene Metriken zur Beschreibung der Sensorzuverlässigkeit von LIDAR Sensoren. In Kapitel 2 diskutieren wir die Unsicherheiten des Fahrzeugumfeldmodells und führen anschließend in Kapitel 3 mathematisch fundierte Zuverlässigkeitsmetriken für eine konsistente Behandlung der Sensor-Leistungsfähigkeit ein. In Kapitel 4 beschreiben wir ein hierarchisches Regressionsmodell, um eine Beziehung zwischen relevanten Umgebungsbedingungen und den Zuverlässigkeitsmetriken herzustellen. In Kapitel 5 präsentieren wir eine einfache Fallstudie, deren Ergebnisse in Kapitel 5.2 dargestellt und diskutiert werden. Kapitel 6 fasst die wichtigsten Aussagen dieses Beitrags zusammen.

1.2. Etablierte Metriken zur Beschreibung der Sensorzuverlässigkeit

Für die Diskussion vorhandener Metriken zur Beschreibung der Sensorzuverlässigkeit nehmen wir Bezug auf die verschiedenen Stufen der Signalverarbeitung (Bild 1). Die Signalverarbeitungskette eines LIDARs startet mit dem Rohsignal (Bild 1a), wobei zwischen Nutz- und Störsignal auf der Basis von (teilweise dynamisch anpassbaren) Detektionsgrenzwerten unterschieden werden muss. Die Zuverlässigkeit dieser Unterscheidung lässt sich über die Signalentdeckungstheorie mit einer Trefferwahrscheinlichkeit (engl. Probability of Detection) und einer Fehlalarm-wahrscheinlichkeit (engl. Probability of False Alarm) beschreiben [25],

welche vielfach für dichotome Detektionsproblemstellungen verwendet werden [26 bis 29]. Auf Stufe des analogen Rohsignals ist jedoch die Genauigkeit des Sensors bezüglich der primären Messgröße in Form von Distanzmessungen noch nicht enthalten, erst nach der Interpretation des Signals durch einen Detektionsgrenzwert lässt sich die Genauigkeit der Distanzmessungen feststellen. Daher ist es nicht zielführend die Sensorzuverlässigkeit alleine auf Basis des analogen Rohsignals zu beschreiben.

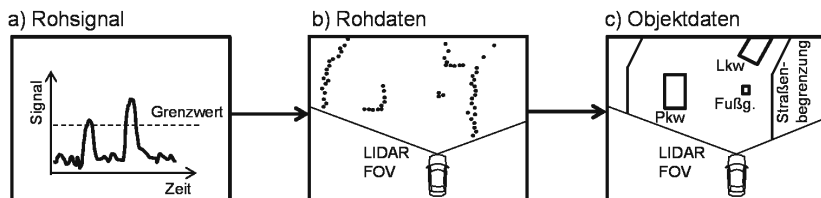


Bild 1: Signalverarbeitungskette eines LIDAR Sensors: a) Analoges Rohsignal: Nutzsignal und Störsignal b) Digitale Rohdaten: Distanzmessungen eines Messzyklus c) Objektdaten: repräsentatives dynamisches Fahrzeugumfeldmodell

Die Zuverlässigkeit der digitalen Rohdaten (Bild 1b), die bei LIDAR Sensoren aus in Messzyklen zusammengefassten Distanzmessungskarten bestehen, kann über einen als normalverteilt angenommenen Messfehler beschrieben werden [30]. Es ist geläufig, die Verteilungsparameter der Distanzmessungsfehler unter kontrollierten Bedingungen in Versuchen zu bestimmen, wie Beispiele aus der Robotik demonstrieren [31 bis 33]. Aus statistischer Sicht ist eine Beschreibung der Sensorzuverlässigkeit auf Ebene der digitalen Rohdaten zwar konzeptionell einfach, nicht enthalten sind aber Fehler, die ihren Ursprung in den Algorithmen haben, wie etwa unzutreffende Assoziationen oder fehlerhafte Objektbildung.

Diese Fehler sind erst in den Objektdaten (Bild 1c) enthalten – dem dynamischen Fahrzeugumfeldmodell [34]. Da die Fahrerassistenzfunktion bzw. die automatisierte Fahrfunktion auf diesen basieren, wird im Rahmen dieser Studie die Zuverlässigkeit der Objektdaten beschrieben. Es ist anzumerken, dass das dynamische Fahrzeugumfeldmodell in der Regel auf der Fusion der Umfeldwahrnehmung von mehreren Sensoren basiert [35], worauf die nachfolgend präsentierten Zuverlässigkeitsmetriken übertragen werden können. Vorerst gilt der Fokus jedoch der Absicherung eines einzelnen Sensors. Eine Möglichkeit dieser Absicherung liegt in dem Nachweis, dass bestimmte Zuverlässigkeitsmetriken gewisse funktionsab-

hängige Grenzwerte einhalten. Diese Grenzwerte können für die Einzelsensoren aus Systemsicherheitsanforderungen abgeleitet werden.

2. Unsicherheiten im Fahrzeugumfeldmodell und Unsicherheiten höherer Ordnung

Zur Einführung von umfassenden Zuverlässigkeitsmetriken auf Basis der Objektdaten mit dem Ziel der Sensorabsicherung ist es notwendig, verschiedene Arten von Unsicherheiten im Fahrzeugumfeldmodell zu berücksichtigen. Diese sind nach [36]:

- Existenzunsicherheit: Unsicherheit über die Existenz eines Objektes im Fahrzeugumfeldmodell. Existiert dieses in Realität oder ist es eine Falschdetektion (Geist)?
- Zustandsunsicherheit: Unsicherheit über die physikalischen Messgrößen der Objekte (Distanz, Position, Größe, Orientierung, Geschwindigkeit, Beschleunigung...) ausgelöst durch zufällige und systematische Messabweichungen vom „wahren“ Wert. Diese Abweichungen können auf Messfehler und fehlerhafte Objektbildung oder Assoziations zurückgeführt werden.
- Klassenunsicherheit: Korrekte semantische Kategorisierung der Objekte. Beispiel: Pkw wird als Pkw erkannt und nicht als Fahrradfahrer.

Alle genannten Unsicherheiten können im Zusammenhang mit automatisierten Fahrfunktionen zu sicherheitsrelevanten Fehlern führen. Daher muss die Leistungsfähigkeit der Sensoren hinsichtlich Objektdetektion, Genauigkeit der physikalischen Messgrößen und Objektklassifikation nachgewiesen werden.

Die Schwierigkeit dieses Nachweises liegt – wie einleitend festgestellt – unter anderem in den variablen Umgebungsbedingungen, welche die Leistungsfähigkeit der Sensoren wesentlich beeinflussen [16 bis 20]. Die Einflüsse der unsicheren Umgebungsbedingungen führen dazu, dass die Existenzunsicherheiten, die Zustandsunsicherheiten und die Klassenunsicherheiten keine konstanten Größen sondern selbst Zufallsvariablen sind. Wir schlagen deswegen vor, zur Liste der relevanten Unsicherheiten einen weiteren Punkt aufzunehmen: Die Unsicherheiten höherer Ordnung, die die Unsicherheiten in den Existenz-, Zustands- und Klassenunsicherheiten selbst darstellen.

Mithin reicht es nicht aus die Existenz-, Zustands- und Klassenunsicherheiten einmal unter kontrollierten Bedingungen zu bestimmen, es muss auch deren Variabilität berücksichtigt werden, um Aussagen über die Zuverlässigkeit von Sensoren im realen Fahrbetrieb treffen

zu können. Eine weitere wichtige Rolle der Unsicherheiten höherer Ordnung für die Sensorzuverlässigkeit ist in Verbindung mit der sensoreigenen Schätzung der Unsicherheiten bzw. der Genauigkeit zum Zeitpunkt der Messung selbst zu sehen (siehe [36] für eine Diskussion der etablierten Methoden). Mithilfe der Unsicherheiten höherer Ordnung lässt sich quantifizieren, wie zuverlässig ein Sensor seine eigene, möglicherweise zu einem Zeitpunkt vorherrschende unzureichende Leistungsfähigkeit erkennt. Die Genauigkeit dieser Eigendiagnose spielt eine wesentliche Rolle für die Sicherheit, da die Eigenschätzung der Leistungsfähigkeit eine wichtige Eingangsgröße für die Gewichtung der Informationen der einzelnen Sensoren in der Sensordatenfusion ist.

3. Metriken zur Beschreibung der Sensorzuverlässigkeit

Zur formalisierten Behandlung der im letzten Kapitel genannten Unsicherheiten führen wir in diesem Kapitel auf Basis bestehender Konzepte mathematisch fundierte Metriken zur Quantifizierung der Sensorzuverlässigkeit ein.

3.1. Existenzunsicherheiten

Zur Beschreibung der Existenzunsicherheiten eignet sich die Signalentdeckungstheorie [25], die bereits in Kapitel 2 vorgestellt wurde. Die Fähigkeit des Sensors, Objekte korrekt zu detektieren, kann als Probability of Detection (POD) bezeichnet werden. Detektionen sind über die Sensorsensitivität immer auch mit Fehldetektionen verbunden, welche über eine Probability of False Alarm (PFA) beschrieben werden. Mathematisch betrachtet ist die POD die konditionale Wahrscheinlichkeit der Objektdetektion D , bedingt darauf dass dieses Objekt existiert (Ereignis O):

$$POD = \Pr(D|O) \quad (1)$$

Äquivalent ist die PFA die konditionale Wahrscheinlichkeit der Objektdetektion D , bedingt darauf dass dieses nicht Objekt existiert (Ereignis \bar{O}):

$$PFA = \Pr(D|\bar{O}) \quad (2)$$

Das jeweilige Komplement ist die Wahrscheinlichkeit ein Objekt nicht zu detektieren bzw. keine Fehldetektionen auszulösen. Der Vollständigkeit halber wird an dieser Stelle auch auf die Receiver Operating Characteristics (ROC) Kurven verwiesen [25], welche die POD und PFA in Abhängigkeit eines Detektionsgrenzwertes beschreiben. Weil es aber nicht das Ziel dieser Analyse ist die POD und PFA zu optimieren, sondern diese für eine bestimmte Konfi-

guration zu bestimmen, wird die Verwendung von ROC-Kurven zur Beschreibung der Existenzunsicherheiten hier nicht weiter verfolgt.

3.2. Zustandsunsicherheiten

Für Objekte, die in Realität existieren, lassen sich die Zustandsunsicherheiten über ein geeignetes statistisches Modell der Messabweichungen Δx vom „wahren“ Wert x_{Wahr} der relevanten physikalischen Messgrößen beschreiben. Dem dafür geläufigsten statistischen Modell liegt die Annahme von additiven gaußverteilten Messabweichungen zugrunde:

$$x_{Messung} = x_{Wahr} + \Delta x \quad (3)$$

$$\Delta X \sim \text{Normal}(\mu_{\Delta X}, \sigma_{\Delta X}^2) \quad (4)$$

Unter diesen Annahmen beschreibt der Mittelwert $\mu_{\Delta X}$ und die Standardabweichung $\sigma_{\Delta X}^2$ die Zustandsunsicherheit der physikalischen Größe X vollständig. Für die Bestimmung der Messabweichung Δx wird sowohl der Messwert $x_{Messung}$ als auch die Referenz x_{Wahr} benötigt. Die technischen Schwierigkeiten und die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Referenz x_{Wahr} gehen über den Rahmen dieses Beitrages hinaus.

Es ist hinzuzufügen, dass zur Absicherung der Sensorzuverlässigkeit das Interesse hauptsächlich in extremen, seltenen Messfehlern liegt. Es ist nicht davon auszugehen, dass die Normalverteilung das Verhalten in den Extremen korrekt wiedergibt. Eventuell gibt ein anderes statistisches Modell der Messfehler das Verhalten in den Extremen besser wieder. Am Ende muss auf Basis der Daten entschieden werden, welches Modell die Zustandsunsicherheiten am besten beschreibt.

Eine Alternative zur Modellierung extremer Messfehler bietet die Extremwerttheorie [37]. Unter Verwendung des Block-Maxima-Ansatzes wird der maximale Messfehler $\max[\Delta X_1, \dots, \Delta X_n]$ von unabhängigen und gleichverteilten Messfehlern ΔX_i in einem gewissen Zeitintervall (z.B. 5 min) unter der Voraussetzung der statistischen Unabhängigkeit aufeinanderfolgender Zeitblöcke über eine Extremwertverteilung beschrieben werden. Durch die Fokussierung auf extreme Messabweichungen wird erreicht, dass die resultierende Statistik von den sicherheitsrelevanten Extremwerten und nicht von den weniger relevanten kleineren Messabweichungen dominiert wird. Ein weiterer positiver Nebeneffekt besteht in der drasti-

schen Reduktion der für die Auswertung relevanten Daten und damit des Rechenaufwands zum Lernen der Modellparameter.

3.3. Klassenunsicherheiten

Neben der Existenz- und Zustandsunsicherheit ist die Unsicherheit über die Klassifikation von Objekten zu beurteilen. Diese Klassenunsicherheit kann über eine Konfusionsmatrix beschrieben werden. Eine beispielhafte Konfusionsmatrix ist in Tabelle 1 dargestellt.

Die einzelnen Zellen enthalten jeweils die konditionale Wahrscheinlichkeit der Objektklassifikation K durch den Sensor, bedingt dass in Realität die Objektklasse R vorhanden ist. Die Konfusionsmatrix hängt mit den Existenzunsicherheiten zusammen, zum Beispiel ist die Summe über die ersten drei Zeilen der letzten Spalte in Tabelle 1 die PFA .

Tabelle 1: Konfusionsmatrix zur Beschreibung der Klassenunsicherheit (R : Objektklasse, die der Realität entspricht, K : Klassifikation des Objektes durch Sensor)

	$R = Pkw$	$R = Lkw$	$R = Fuß.$	$R = Kein Obj$
$K = Pkw$	$\Pr(K = Pkw R = Pkw)$	$\Pr(K = Pkw R = Lkw)$	$\Pr(K = Pkw R = Fuß.)$	$\Pr(K = Pkw R = Kein O.)$
$K = Lkw$	$\Pr(K = Lkw R = Pkw)$	$\Pr(K = Lkw R = Lkw)$	$\Pr(K = Lkw R = Fuß.)$	$\Pr(K = Lkw R = Kein O.)$
$K = Fuß.$	$\Pr(K = Fuß. R = Pkw)$	$\Pr(K = Fuß. R = Lkw)$	$\Pr(K = Fuß. R = Fuß.)$	$\Pr(K = Fuß. R = Kein O.)$
$K = Kein Obj.$	$\Pr(K = Kein O. R = Pkw)$	$\Pr(K = Kein O. R = Lkw)$	$\Pr(K = Kein O. R = Fuß.)$	$\Pr(K = Kein O. R = Kein O.)$

3.4. Unsicherheiten höherer Ordnung

Die letzte Unsicherheit zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit des Fahrzeugumfeldmodells entspringt der Variabilität der bisher eingeführten Metriken, ausgelöst durch eine Abhängigkeit von den jeweiligen Umgebungsbedingungen. Am Beispiel der Zustandsunsicherheit, hier beschrieben durch die Standardabweichung $\sigma_{\Delta X}$ der Messabweichungen ΔX , ist dieser Zusammenhang in Bild 2 dargestellt. In Bild 2a ist die funktionale Beziehung zwischen $\sigma_{\Delta X}$ und den Umgebungsbedingungen dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird hier lediglich der Einfluss des Niederschlags I auf die Sensorgenauigkeit betrachtet, in Realität handelt es sich aber um ein mehrdimensionales Problem mit verschiedenen Einflussfaktoren.

	$R = \text{Pkw}$	$R = \text{Lkw}$	$R = \text{Fuß.}$	$R = \text{Kein Obj.}$
$K = \text{Pkw}$	$\Pr(K = \text{Pkw} R = \text{Pkw})$	$\Pr(K = \text{Pkw} R = \text{Lkw})$	$\Pr(K = \text{Pkw} R = \text{Fuß.})$	$\Pr(K = \text{Pkw} R = \text{Kein O.})$
$K = \text{Lkw}$	$\Pr(K = \text{Lkw} R = \text{Pkw})$	$\Pr(K = \text{Lkw} R = \text{Lkw})$	$\Pr(K = \text{Lkw} R = \text{Fuß.})$	$\Pr(K = \text{Lkw} R = \text{Kein O.})$
$K = \text{Fuß.}$	$\Pr(K = \text{Fuß.} R = \text{Pkw})$	$\Pr(K = \text{Fuß.} R = \text{Lkw})$	$\Pr(K = \text{Fuß.} R = \text{Fuß.})$	$\Pr(K = \text{Fuß.} R = \text{Kein O.})$
$K = \text{Kein Obj.}$	$\Pr(K = \text{Kein O.} R = \text{Pkw})$	$\Pr(K = \text{Kein O.} R = \text{Lkw})$	$\Pr(K = \text{Kein O.} R = \text{Fuß.})$	$\Pr(K = \text{Kein O.} R = \text{Kein O.})$

Bild 2: Schematische Darstellung der Unsicherheit höherer Ordnung am Beispiel der Zustandsunsicherheit: a) Die Sensorgenauigkeit $\sigma_{\Delta X}$ ist eine Funktion der Niederschlagsintensität I ; b) die Niederschlagsintensität I ist eine Zufallsvariable; daraus folgt c) die Sensorgenauigkeit ist selbst eine Zufallsvariable.

Wie in Bild 2a dargestellt, steigt die Variabilität der Messabweichungen $\sigma_{\Delta X}$ mit zunehmenden Niederschlag I . Der Niederschlag ist jedoch eine Zufallsvariable, die sich über eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_I(i)$ beschreiben lässt (Bild 2b). Aus der Kombination dieser beiden Effekte folgt, dass die Standardabweichung $\sigma_{\Delta X}$ selbst eine Zufallsvariable ist (Bild 2c). Die Verteilungsfunktion $f_{\sigma}(\sigma_{\Delta X})$ beschreibt diese Variabilität und damit die Unsicherheit höherer Ordnung. Es ist zu betonen, dass Bild 2c nicht die statistische Unsicherheit von $\sigma_{\Delta X}$ darstellt, sondern die tatsächliche Variabilität von $\sigma_{\Delta X}$.

Die in Bild 2 dargestellten Überlegungen lassen sich äquivalent auf die Existenz- und Klassenunsicherheit übertragen. Mit eingeführten Metriken in diesem Kapitel lassen sich die Unsicherheiten im Fahrzeugumfeldmodell innerhalb der gegebenen Modellannahmen vollständig beschreiben.

4. Hierarchische Bayes'sche Regression: Quantifizierung der Sensorzuverlässigkeit

Um die Zuverlässigkeitsmetriken aus Daten zu lernen, sind Erprobungsfahrten im Fahrzeug und Tests mit den Sensoren notwendig. Für das Lernen der Modellparameter mit einfachen Schätzmethoden ist es aber eine Voraussetzung, dass die Stichproben (z.B. Messfehler Δx_i) unabhängig und identisch verteilt sind. Weil variable Umgebungsbedingungen wie der Niederschlag jeweils über gewisse Zeitabschnitte vorliegen, sind diese Bedingungen jedoch nicht erfüllt. Fehler, wie zum Beispiel hohe Messabweichungen Δx , können miteinander korreliert sein und die Messzeitreihe weist dann eine Abhängigkeitsstruktur auf. Ebenfalls wurde bereits am Beispiel der Zustandsunsicherheiten (Bild 2) erklärt, dass die Messfehler ΔX_i nicht

Zusätzlich wird eine funktionale Beziehung $g(\cdot)$ zwischen der Ausprägung X_j der Umgebung des Zeitblocks j und den Parametern θ_j hergestellt:

$$\theta_j = g(X_j \cdot \beta + \varphi_j) \quad (6)$$

X_j enthält dabei Informationen über Umgebungsbedingungen wie beispielsweise Niederschlag, Temperatur und Gisch, welche bei Tests und Erprobungsfahrten mit erfasst werden. Der Vektor β enthält die Regressionskoeffizienten, welche den Einfluss der verschiedenen Umgebungseinflüsse quantifizieren. Weil es nicht möglich ist, alle relevanten Umgebungsbedingungen in den Erprobungen zu erfassen, bleibt für jeden Zeitblock ein Zufallseffekt φ_j übrig. Für den Zufallseffekt φ_j gelten die gleichen Überlegungen zu den Unsicherheiten höherer Ordnung wie in Kapitel 4.4 am Beispiel von $\sigma_{\Delta X}$ diskutiert. Der Zufallseffekt φ_j enthält den Teil der Stichprobenparameter θ_j , der nicht über die Kenntnis der Umgebungsausprägung X_j erklärt werden kann und repräsentiert damit die Auswirkung der Variabilität der nicht in X enthaltenen Umgebungsbedingungen auf den Sensor. Ausgehend von den Überlegungen zu den Unsicherheiten höherer Ordnung können die Zufallseffekte φ_j der einzelnen Zeitblöcke j als Stichproben einer gemeinsamen Superpopulation $f(\varphi_j|\phi)$ angesehen werden:

$$\varphi_j|\phi \sim f(\varphi_j|\phi) \quad (7)$$

Dabei sind ϕ die Hyperparameter, welche die Unsicherheit höherer Ordnung beschreiben. Mit dem hierarchischen Regressionsmodell soll sichergestellt werden, dass für einen gegebenen Zeitblock j mit gegebenen Parameter $\theta_j = g(X_j \cdot \beta + \varphi_j)$ die Daten $y_{i,j}$ näherungsweise konditional unabhängig und identisch verteilt sind. Dadurch wird die Unsicherheiten höherer Ordnung und die Abhängigkeitsstruktur der Daten mathematisch berücksichtigt. Für eine gegebene Zeitreihe mit Daten y und den jeweiligen Umgebungsbedingungen X können dann die Modellparameter β, φ, ϕ mit dem Ansatz nach Bayes gelernt werden:

$$f(\beta, \varphi, \phi|y, X) \propto f(\beta) \cdot f(\phi) \cdot \prod_{j=1}^m f(\varphi_j|\phi) \prod_{i=1}^n f(y_{i,j}|\varphi_j, X_j, \beta) \quad (8)$$

Dabei ist $f(\beta, \varphi, \phi|y, X)$ die a posteriori Verteilung der Modellparameter β, φ, ϕ für gegebene Beobachtungen y und Umgebungsbedingungen X , $f(\beta)$ und $f(\phi)$ sind die a priori Verteilungen der Regressionskoeffizienten und der Hyperparameter, $f(\varphi_j|\phi)$ ist die Likelihood der Zufallseffekte φ_j und $f(y_{i,j}|\varphi_j, X_j, \beta)$ ist die Likelihood der Beobachtungen $y_{i,j}$.

5. Fallstudie: Einfluss der Temperatur auf die Sensorgenauigkeit

Zur Illustration des vorgestellten hierarchischen Modells wurde ein einfacher Versuch mit einem LIDAR-Sensor durchgeführt. Bei dem Sensor handelt es sich um einen Laserscanner mit einem mechanisch bewegtem Spiegel, über den die Raumrichtung sowohl der Sendepulse als auch der Empfangspulse eingestellt werden [39]. Ziel des Versuchs war die exemplarische Quantifizierung des Einflusses von erhöhten Temperaturen auf die Sensorleistungsfähigkeit in Form von Positionsabweichungen. Dazu wurde eine Heizmatte am Sensorgehäuse befestigt, um erhöhte Temperaturen im Sensor zu erzeugen.

5.1. Versuchsaufbau und Modellbeschreibung

Zur Erfassung der Positionsgenauigkeit wurde ein Fahrzeug mit dem Sensor im Abstand von 37,84 m senkrecht zu einer Holzwand abgestellt. Der Abstand wurde im Laufe des Versuchs nicht verändert, es handelt sich also um einen statischen Versuch. Der Einfallswinkel zwischen dem Laserstrahl mit Strahlrichtung 0° und der Wand betrug näherungsweise 0° . Das Wetter zum Zeitpunkt des Versuchs war bewölkt ohne Niederschlag, ein wetterinduzierter Einfluss ist also nicht zu erwarten. Insgesamt wurden 24 min 36 s Messungen aufgezeichnet, wobei während des Versuchs das Sensorgehäuse aufgeheizt wurde. Der beispielhafte zeitliche Verlauf der Positionsabweichungen Δx der Wand senkrecht zum Sensor, auf Objektdatenebene, ist in Bild 4a dargestellt. Zusätzlich zeigt Bild 4b den Verlauf der Gehäusetemperatur über die Zeit, wobei die Temperatur in willkürlichen Einheiten dargestellt ist.

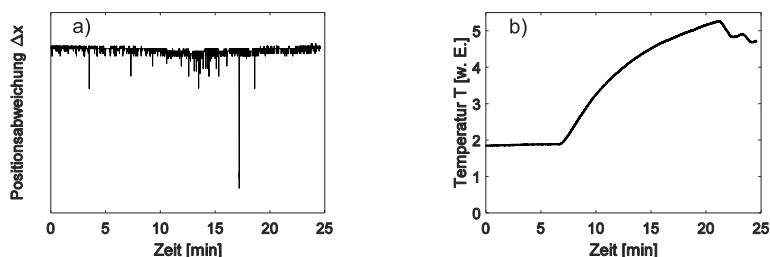


Bild 4: a) Beispielhafte Zeitreihe der Positionsabweichungen Δx und b) Verlauf der Sensortemperatur T in willkürlichen Einheiten [w. E.].

Eine erste visuelle Inspektion der Positionsabweichungen durch einen Vergleich von Bild 4a mit Bild 4b lässt keine offensichtliche Temperaturabhängigkeit erkennen. Dennoch wird nachfolgend der Einfluss der Temperatur mit einem hierarchischen Regressionsmodell näher untersucht. Dazu werden alle Positionsabweichungen in Blöcke mit einer Blockdauer von

$t = 30$ s eingruppiert, insgesamt resultieren daraus 50 Blöcke. Wir modellieren die Abweichung $\Delta x_{i,j}$ der Position (in senkrechter Richtung zum Sensor) im Block j durch eine Normalverteilung mit Mittelwert $\mu_{\Delta X,j}$ und einer Standardabweichung $\sigma_{\Delta X,j}$:

$$\Delta x_{i,j} | \mu_{\Delta X,j}, \sigma_{\Delta X,j} \sim N(\mu_{\Delta X,j}, \sigma_{\Delta X,j}^2) \quad (9)$$

Die Mittelwerte $\mu_{\Delta X,j}$ der einzelnen Blöcke werden als Stichproben einer normalverteilten Superpopulation mit Hyperparametern μ_μ und σ_μ angesehen. μ_μ ist dabei der gemeinsame Mittelwert und σ_μ die Standardabweichung der Mittelwerte $\mu_{\Delta X,j}$ der einzelnen Blöcke j :

$$\mu_{\Delta X,j} | \mu_\mu, \sigma_\mu \sim N(\mu_\mu, \sigma_\mu^2) \quad (10)$$

Die Standardabweichung $\sigma_{\Delta X,j}$ der einzelnen Blöcke j wird als Funktion eines konstanten Einflusses β_0 , in Abhängigkeit der Temperatur T mit Einfluss β_1 und einem blockspezifischen Zufallseffekt φ_j modelliert. Aus mathematischen Gründen normieren wir dabei die Temperaturdaten aus Bild 4b so, dass T_{normiert} einen Mittelwert von 0 und eine Standardabweichung von 1 aufweist:

$$\sigma_{\Delta X,j} = \sqrt{\exp(-\beta_0 - \beta_1 \cdot T_{\text{normiert}} - \varphi_j)} \quad (11)$$

Die Exponentialfunktion in Formel 3 stellt sicher, dass $\sigma_{\Delta X,j}$ nur positive Werte annimmt. Der Zufallseffekt φ_j wird ebenfalls als normalverteilt mit Hyperparameter $\sigma^2_\varphi = 1/\tau_\varphi$ angenommen:

$$\varphi_j | \tau_\varphi \sim N(0, 1/\tau_\varphi) \quad (12)$$

Für alle Modellparameter werden nichtinformativ a priori Verteilungen gewählt. Zum Lernen der Modellparameter wird die Software OpenBugs [40] unter Verwendung von Markov Chain Monte Carlo (siehe beispielsweise [41]) benutzt.

5.2. Ergebnisse

Dieses Kapitel beschreibt beispielhaft die Auswertung und die Ergebnisse des in Kapitel 5.1 beschriebenen Versuchs mit den zugehörigen statistischen Modellannahmen. Es ist anzumerken, dass die Ergebnisse hier mit willkürlichen Einheiten [w. E.] wiedergegeben werden und dadurch auch nur qualitative Aussagekraft besitzen. Bild 5a stellt die Ergebnisse der Parameterschätzung der mittleren Positionsabweichungen $\mu_{\Delta X,j}$ in dar.

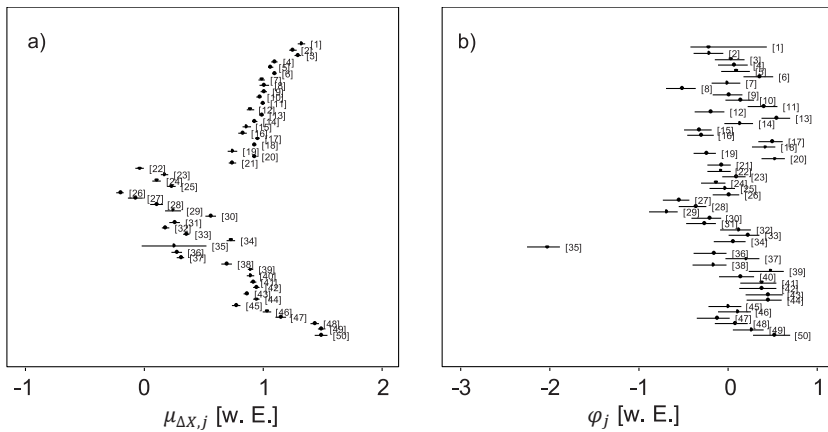


Bild 5: Caterpillar plots a) der Mittelwerte der Positionsabweichung $\mu_{\Delta X,j}$ und b) der Zufallseffekte ϕ_j für alle Blöcke $j \in \{1, \dots, 50\}$. Die Punkte repräsentieren die a posteriori Mittelwerte und die Striche die 95% credible intervals.

Ein hier nicht gezeigter Vergleich mit den empirischen Mittelwerten zeigt, dass das Bayes'sche hierarchische Modell die Mittelwerte korrekt schätzt. Die Unsicherheiten, ausgedrückt durch die 95% credible intervals (Striche in Bild 5) der Parameterschätzung sind für die Mittelwerte $\mu_{\Delta X,j}$ allgemein klein. Eine Ausnahme stellt Block $j = 35$ dar, in welchem eine ungewöhnlich große Positionsabweichung beobachtet wurde. Da die Positionsabweichungen sonst viel kleiner sind, entsteht dadurch eine größere Unsicherheit in der Schätzung von $\mu_{\Delta X,35}$. Der globale Mittelwert μ_μ ausgedrückt in den Einheiten von Bild 5a wird zu 0,76 mit einem 95% credible interval von $[0,64; 0,88]$ geschätzt. Ein visueller Vergleich von Bild 5a mit dem Verlauf der Temperatur Bild 4b lässt eine quadratische Abhängigkeit zwischen $\mu_{\Delta X,j}$ und der Temperatur vermuten. Dieser Effekt wird hier jedoch nicht weiter untersucht, weil die Schwankung der mittleren Positionsabweichung $\mu_{\Delta X}$ in absoluten Werten zunächst vernachlässigbar ist. Für Anwendungsfälle, die über die veranschaulichenden Zwecke dieser Präsentation hinausgehen, sollte dieser Effekt jedoch auch Berücksichtigung finden.

Um Aussagen über die sicherheitsrelevante Performance treffen zu können, wird stattdessen der funktionale Zusammenhang zwischen der Standardabweichung $\sigma_{\Delta X}$ der Positionsabweichung und der Temperatur (siehe Formel 11) weiter untersucht. Eine zentrale Bedeutung hat dabei die Frage, ob die Temperatur die Variabilität der Positionsabweichung wesentlich be-

einflusst. Die Ergebnisse der Parameterschätzung sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die Temperatur T durchaus einen Einfluss auf die Standardabweichung $\sigma_{\Delta X}$ der Positionsabweichung hat, da β_1 (siehe Formel 11) nicht zu Null geschätzt wird.

Tabelle 2: Ergebnisse der Parameterschätzung mit dem Programm OpenBugs [40]

Parameter	Mittelwert	2,5% Quantil	Median	97,5% Quantil
β_0 [w. E.]	1	0,968	1	1,039
β_1 [-]	-0,315	-0,556	-0,318	-0,098
φ_2 [w. E.]	-0,204	-0,396	0,202	0,031
φ_{35} [w. E.]	-2,056	2,270	-2,049	-1,893
τ_φ [w. E.]	5,508	3,532	5,432	7,952
μ_μ [w. E.]	0,76	0,64	0,76	0,88
σ_μ [w. E.]	0,44	0,38	0,46	0,56

Zur Visualisierung des Temperatureinflusses wird in Bild 6a die funktionale Beziehung zwischen der (nicht normierten) Temperatur T und $\sigma_{\Delta X}$ dargestellt. Die gefundene Beziehung gibt die empirischen Standardabweichungen $\sigma_{\Delta X,j}$ tendenziell gut wieder. Die zusätzliche Streuung in den beobachteten $\sigma_{\Delta X,j}$ um die gefundene Abhängigkeit sind durch den Zufallseffekt φ_j erklärt. Um ausschließlich den Effekt der Temperatur darzustellen, beinhalten die in Bild 6a gezeigten credible intervals nicht den Einfluss der Zufallseffekte φ_j . Diese haben unter Annahme des a posteriori Mittelwertes von $\tau_\varphi = 5,508$ [w. E.] mit 95% Wahrscheinlichkeit einen multiplikativen Einfluss zwischen 0.66 und 1.52 auf $\sigma_{\Delta X}$. D.h. die Zufallseffekte φ_j bestimmen die Streuung von $\sigma_{\Delta X}$ um die in Bild 6a gezeigte Beziehung.

Die Schätzung aller Zufallseffekte φ_j ist in Bild 5b dargestellt. Die hohe Variabilität in Block $j = 35$, ausgelöst durch die hohe Positionsabweichung in diesem Block, ist nicht durch den Temperatureinfluss zu erklären, sondern durch einen hohen Zufallseffekt $\varphi_{35} = -2,06$ (dies entspricht einer Erhöhung der Standardabweichung $\sigma_{\Delta X}$ um den Faktor 2,79). Eine genauere Überprüfung der Daten von Block 35 zeigt in der Tat, dass der Fehler in der Objektbildung zu finden ist und nicht auf den Einfluss der Temperatur zurückzuführen ist.

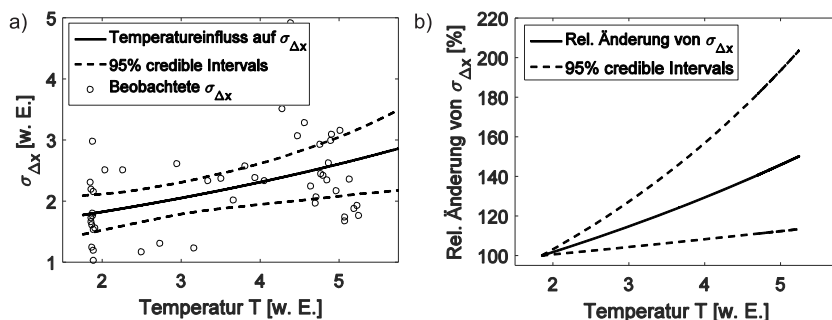


Bild 6: a) Einfluss der Temperatur auf die Standardabweichung $\sigma_{\Delta X}$ der Positionsabweichungen ΔX . Die 95% credible intervals geben die a posteriori Unsicherheit im konstanten Einfluss β_0 und im Temperatureinfluss β_1 an. b) Relative Änderung der Standardabweichung $\sigma_{\Delta X}$ mit der Temperatur. Die 95% credible intervals beziehen sich ausschließlich auf den Temperatureinfluss β_1 .

Abschließend wird in Bild 6b die relative Änderung der Standardabweichung $\sigma_{\Delta X}$ mit der Temperatur T dargestellt. Durch eine Steigerung der Gehäusetemperatur von 1.85 [w. E.] auf 5 [w. E.] nimmt die Standardabweichung $\sigma_{\Delta X}$ der Positionsabweichung ΔX im Mittel um 46% zu.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Der Nachweis der Sensorzuverlässigkeit stellt einen wichtigen Schritt bei der Absicherung von Fahrerassistenzsystemen dar. Eine genaue Kenntnis der Sensorleistungsfähigkeit ist eine wesentliche Grundvoraussetzung für die Absicherung von Fahrerassistenzsystemen.

In diesem Beitrag werden umfassende Metriken für die Beschreibung der Sensorzuverlässigkeit eingeführt. Wichtig ist dabei die Berücksichtigung von Unsicherheiten höherer Ordnung, ausgelöst durch variable Umgebungseinflüsse wie etwa der Temperatur. Ein hierarchisches Regressionsmodell auf Basis der Bayes'schen Statistik erlaubt es, die Einflüsse der Umgebung und die Unsicherheiten höherer Ordnung zu quantifizieren. Die Nützlichkeit dieses Ansatzes wird in einer Fallstudie zur Untersuchung des Einflusses erhöhter Temperaturen auf die Sensorleistungsfähigkeit gezeigt. Der geringe Umfang des dargestellten Versuchs erlaubt es jedoch nicht, weitreichende, sicherheitsrelevante Aussagen über die globale Sensorzuverlässigkeit tätigen zu können. Die hier präsentierten Methoden können aber als

ein Schritt in Richtung zuverlässigkeitsbasierter Absicherung der Sensorik und der Fahrerassistenzsysteme verstanden werden.

Um Aussagen über die Sensorzuverlässigkeit mit den hier dargestellten Methoden treffen zu können sind vor allem ausführlichere Tests mit mehreren Umgebungseinflüssen und auch Erprobungen realen Fahrsituationen notwendig. Ebenfalls ist zu beachten, wie bereits in Kapitel 3.2 erläutert, dass bei der Sensorabsicherung das Interesse vor allem in den Extremwerten (beispielsweise der Positionsabweichungen) liegt. Methoden der Extremwerttheorie erlauben es, sich auf diese für die Sicherheitsrelevanz entscheidenden Werte zu fokussieren, wodurch die Statistik nicht mehr von nicht-extremen Werten dominiert wird. Bei Zeitreihen größeren Umfanges ist es eventuell sinnvoll das hierarchische Modell entsprechend auf die Extremwerttheorie abzustimmen.

Die Ergebnisse der hierarchischen Regression sind die Grundlage, aber noch nicht das finale Ergebnis der Zuverlässigkeitsanalyse von umfelderfassender Sensorik. Im weiteren Projektverlauf ist es geplant, stochastische Methoden auf der Basis Bayes'scher Netzwerke zu entwickeln, die in Kombination mit den Ergebnissen der hierarchischen Regression einen prädiktiven Nachweis der Sensorzuverlässigkeit erlauben. Mit einem solchem Vorgehen lässt sich voraussichtlich die Sensorzuverlässigkeit mit deutlich weniger Fahrkilometern nachweisen, als bei empirischen Erprobungsfahrten notwendig wäre [23].

7. Literaturangaben

- [1] Kammel, S., Ziegler, J., Pitzer, B., Werling, M., Gindele, T., Jagzent, D., Schröder, J., Thuy, M., Goebel, M., Hundelshausen, F. v., Pink, O., Frese, C. u. Stiller, C.: Team AnnieWAY's autonomous system for the 2007 DARPA Urban Challenge. *Journal of Field Robotics* 25 (2008) 9, S. 615–639
- [2] Guizzo, E.: How google's self-driving car works. *IEEE Spectrum Online*, October 18 (2011)
- [3] Franke, U., Pfeiffer, D., Rabe, C., Knoepfel, C., Enzweiler, M., Stein, F. u. Herrtwich, R. G.: Making Bertha See. 2013 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW). 2013, S. 214–221
- [4] Aeberhard, M., Rauch, S., Bahram, M., Tanzmeister, G., Thomas, J., Pilat, Y., Homm, F., Huber, W. u. Kaempchen, N.: Experience, Results and Lessons Learned from Automated Driving on Germany's Highways. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 7 (2015) 1, S. 42–57

- [5] Audi: Mission accomplished: Audi A7 piloted driving car completes 550-mile automated test drive, 2015. <https://www.audiusa.com/newsroom/news/press-releases/2015/01/550-mile-piloted-drive-from-silicon-valley-to-las-vegas>, abgerufen am: 25.02.2016
- [6] Broggi, A., Debattisti, S., Grisleri, P. u. Panciroli, M.: The deeva autonomous vehicle platform. 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), S. 692–699
- [7] Google: Google Self-Driving Car Project, 2015. <http://static.googleusercontent.com/media/www.google.com/en/us/selfdrivingcar/>, abgerufen am: 25.02.2016
- [8] Beiker, A. S.: Einführungsszenarien für höhergradig automatisierte Straßenfahrzeuge. In: Maurer, M., Gerdes, C. J., Lenz, B. u. Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2015, S. 197–217
- [9] Gasser, T. M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J. u. Vogt, W.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Fahrzeugtechnik, Bd. 83. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für Neue Wiss 2012
- [10] Bernhart, W.: Autonomes Fahren Märkte, Treiber und Geschäftsmodelle. ATZe Elektronik 11 (2016) 2, S. 36–41
- [11] Auto Zeitung: Audi A8 (2017): Neuer A8 mit Staupilot. Neuer A8 fährt bis 60 km/h selbst, 2016. <http://www.autozeitung.de/auto-news/audi-a8-2017-staupilot>, abgerufen am: 22.06.2016
- [12] Auto Express: Audi A8 could get posher and longer to rival Maybach, 2016. <http://www.autoexpress.co.uk/audi/a8/95433/audi-a8-could-get-posher-and-longer-to-rival-maybach>, abgerufen am: 05.07.2016
- [13] 2010. *IEEE Standard Framework for Reliability Prediction of Hardware*
- [14] IEEE guide for selecting and using reliability predictions based on IEEE 1413. New York, N.Y.: Institute of Electrical and Electronics Engineers 2003
- [15] Weitzel, A., Winner, H., Peng, C., Geyer, S., Lotz, F. u. Sefati, M.: Absicherungsstrategien für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung. [Bericht zum Forschungsprojekt FE 82.0546/2012]. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Fahrzeugtechnik, Bd. 98. Bremen: Fachverl. NW 2014
- [16] Rasshofer, R. H., Spies, M. u. Spies, H.: Influences of weather phenomena on automotive laser radar systems. Advances in Radio Science 9 (2011), S. 49–60
- [17] Sensor data integrity: Multi-sensor perception for unmanned ground vehicles, Peynot, T., Terho, S. u. Scheduling, S., Sydney Australia 2009

- [18] Pascoal, J., Marques, L. u. Almeida, A. T. de: Assessment of Laser Range Finders in risky environments. 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2008, S. 3533–3538
- [19] Ishimaru, A.: Wave propagation and scattering in random media and rough surfaces. Proceedings of the IEEE 79 (1991) 10, S. 1359–1366
- [20] Blevis, B.: Losses due to rain on radomes and antenna reflecting surfaces. IEEE Transactions on Antennas and Propagation 13 (1965) 1, S. 175–176
- [21] International Standard. *ISO 26262:2011(E) Road vehicles - Functional safety*
- [22] Wachenfeld, W. u. Winner, H.: Die Freigabe des autonomen Fahrens. In: Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B. u. Winner, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2015, S. 439–464
- [23] Winner, H.: Quo vadis, FAS? In: Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F. u. Singer, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015, S. 1167–1186
- [24] Gotzig, H. u. Geduld, G. O.: LIDAR-Sensorik. In: Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F. u. Singer, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015, S. 317–334
- [25] Peterson, W., Birdsall, T. u. Fox, W.: The theory of signal detectability. Transactions of the IRE Professional Group on Information Theory 4 (1954) 4, S. 171–212
- [26] Schoefs, F., Clément, A. u. Nouy, A.: Assessment of ROC curves for inspection of random fields. Structural Safety 31 (2009) 5, S. 409–419
- [27] Sättele, M., Bründl, M. u. Straub, D.: Reliability and effectiveness of early warning systems for natural hazards: Concept and application to debris flow warning. Reliability Engineering & System Safety 142 (2015), S. 192–202
- [28] Zweig, M. H. u. Campbell, G.: Receiver-operating characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine. Clinical chemistry 39 (1993) 4, S. 561–577
- [29] Alfieri, L., Thielen, J. u. Pappenberger, F.: Ensemble hydro-meteorological simulation for flash flood early detection in southern Switzerland. Journal of Hydrology 424 (2012), S. 143–153
- [30] Zheng, P. u. McDonald, M.: The effect of sensor errors on the performance of collision warning systems. 2003 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. 2003, S. 469–474
- [31] Ye, C. u. Borenstein, J.: Characterization of a 2D laser scanner for mobile robot obstacle negotiation. 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2002, S. 2512–2518

- [32] Kneip, L., Tache, F., Caprari, G. u. Siegwart, R.: Characterization of the compact Hokuyo URG-04LX 2D laser range scanner. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2009, S. 1447–1454
- [33] Lee, K.-H. u. Ehsani, R.: Comparison of two 2D laser scanners for sensing object distances, shapes, and surface patterns. *Computers and Electronics in Agriculture* 60 (2008) 2, S. 250–262
- [34] Dietmayer, K., Nuß, D. u. Reuter, S.: Repräsentation fusionierter Umfelddaten. In: Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F. u. Singer, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015, S. 453–480
- [35] Darms, M.: Fusion umfelderfassender Sensoren. In: Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F. u. Singer, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015, S. 439–451
- [36] Dietmayer, K.: Prädiktion von maschineller Wahrnehmungsleistung beim automatisierten Fahren. In: Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B. u. Winner, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2015, S. 419–438
- [37] Coles, S.: *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer Series in Statistics. London: Springer London : Imprint: Springer 2001
- [38] Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S. u. Rubin, D. B.: *Bayesian data analysis*. Texts in statistical science. Boca Raton, Fla.: Chapman & Hall 2004
- [39] Barth, H.: *LiDAR Technology for Active Safety and Automated Driving*. 3. VDI-Konferenz - Automatisiertes Fahren. 2016
- [40] Lunn, D., Spiegelhalter, D., Thomas, A. u. Best, N.: The BUGS project: Evolution, critique and future directions. *Statistics in medicine* 28 (2009) 25, S. 3049–3067
- [41] Brooks, S.: Markov chain Monte Carlo method and its application. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)* 47 (1998) 1, S. 69–100



Fahrzeug- und
Verkehrstechnik

ISBN 978-3-18-092288-1

<https://doi.org/10.51202/9783180922887> - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2025, 02:54:15. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede unberechtigte Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts in Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.