

11. VDI-Tagung

Fahrzeugsicherheit

**VDI-Berichte 2312**

VDI-BERICHTE

Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH

11. VDI-Tagung

Fahrzeugsicherheit

Berlin, 28. und 29. November 2017



VDI-Berichte 2312

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

(German National Library)

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie

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

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

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

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

Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092312-3

Inhalt

		Seite
Vorwort		1

Auswirkungen vom automatischen Fahren auf den Insassenschutz

<i>M. Unger, Ö. Cebeci</i>	Neue Sitzpositionen im automatischen Fahrmodus – Eine Herausforderung für die Bewertung von Submarining	3
<i>B. Peters, M. Khalil, K. Rink, S. Kern</i>	Strategy for the limits of automated driving – Terminal stop, system shut down – all out please?	21
<i>F. Krauns, K. Kietlinski, R. Henze, M. Tijssens, F. Küçükay</i>	Analyse von Fahrerbewegungen unter dem Einfluss von Automatisierungsstufen und einer Pre-Crash Maßnahme	33

Bewertungsmethoden für die aktive Sicherheit

<i>H. Feifel, M. Wagner</i>	Szenarien zur Bewertung von aktiven Sicherheitssystemen basierend auf In-Depth-Unfalldaten	43
<i>C. Buchholz, R. Stark</i>	Vergleich hybrider und virtueller Model-in-the Loop Methoden für die frühe menschzentrierten Verifikation und Validierung fortschrittlicher Fahrerassistenzsysteme	69
<i>P. Wimmer, C. Klein</i>	Wirksamkeitsbewertung aktiver Sicherheitssysteme anhand des Verletzungsrisikos als Basis für System- optimierung	81

Methoden und Prozesse der integralen Sicherheit

B. Maier	Vision Zero: Crash tests no obsolescent model, but indispensable grounding of vehicle safety moon	93
----------	---	----

Sicherheit ungeschützter Verkehrsteilnehmer

M. Li,	Herausforderungen, Anwendungsfälle und Zukunfts-	105
M. Kunert,	technologien für einen besseren Radfahrerschutz mit	
R. Henze	hochauflösenden Automobilradaren	
M. Köbe,	Der Motorradfahrer als Anforderungsgeber für	123
S. Hans,	Fahrerassistenzsysteme	
G. Prokop		
M. Kühn,	Können ITS-Systeme das Sicherheitsniveau von	143
M. Lindenau	motorisierten Zweirädern erhöhen?	

Unfallsicherheit alternativer Fahrzeugkonzepte

L. Hollmots,	Sicherheit Lithium-Ionen-Batterien in Kfz – Risiken und	159
O. Schoeneich,	Gefährdungen, Crashverhalten, Weiterbetrieb nach	
S. Kott	Crash und numerische Simulation	
J. Holtz,	Sicherheitskonzept für Leichtkraftfahrzeuge mit	171
L. Zink,	Karosseriestrukturen aus Sandwichmaterial	
M. S. Pedersen		

Auslegung integraler Sicherheitssysteme

<i>K. Schneider,</i> <i>G. J. Sequeira,</i> <i>R. Lugner,</i> <i>A. Kamann,</i> <i>T. Brandmeier,</i> <i>R. Burgmeier</i>	Verification of pre-crash information for a predictive activation of passive safety actuators	185
<i>H. Freienstein,</i> <i>H. Höpfner,</i> <i>F. Drews,</i> <i>T. Lich,</i> <i>F. Österle,</i> <i>W. Klier</i>	Reliable pre-crash detection and decision making for accident against oncoming traffic	197
<i>S. Heine,</i> <i>R. Schöneburg,</i> <i>M. Fehring,</i> <i>J. Richert</i>	Wirkpotentiale von PRE-SAFE® Impuls Seite am Beispiel eines schweren Kreuzungsunfallszenarios	215

Fahrer- und Fahrzeuginteraktion

<i>K. Mahdi,</i> <i>C. Thiele,</i> <i>A. Meyer-Damcke,</i> <i>L. Diwischek</i>	Fahrerwille oder sichere Übergabe?	233
<i>A. Forster,</i> <i>B. Peters,</i> <i>S. Zecha</i>	Automated Driving: New interior concepts and occupant safety – Contradiction or opportunity?	245
<i>M. Östling,</i> <i>C. Sunnevång,</i> <i>C. Svensson,</i> <i>H.-O. Kock</i>	Potential future seating positions and the impact on injury risks in a Learning Intelligent Vehicle (LIV) – How to avoid submarining in a reclined seating position in a frontal crash	261
<i>S. Brandenburg,</i> <i>F. Roche,</i> <i>M. Thüring</i>	Kognitionspsychologische Erkenntnisse zum hochautomatisierten Fahren – eine Übersicht	277

Neue Ratingverfahren und neue Märkte

<i>K. Hallbauer, U. Dierks, M. Wendt</i>	Wenn's auf der falschen Seite kracht... – Untersuchung der neuen Euro NCAP Far Side Seitenaufprallanforderungen	293
<i>P. Seiniger, A. Hellmann, M. Wisch, J. Gail</i>	Schutz von schwächeren Verkehrsteilnehmern: kommende Anforderungen aus Gesetzgebung und Euro NCAP	313
<i>S. Bogdanow, B. Kleinert, M. Marutzky</i>	IIHS Test und Potentiale zur Verbesserung der Verkehrssicherheit	331
<i>J. Feese</i>	SAFE ROADS in Indien und China – Nachhaltige Kommunikationskampagnen zur Fahrzeugsicherheit	343

Posterausstellung

<i>F. Bosma, P. A. van Hooijdonk, M.G.A. Tijssens, K. Kietlinski, M. Unger, J. Schüling</i>	Das Verbesserungspotential von Systemen der Passiven Sicherheit für 50% Insassen	351
<i>J. Holtz, G. Müller, S. Müller</i>	Kindermenschmodellierung in der Unfallrekonstruktion im Vergleich zum Q6 Dummy	383

Vorwort

Zum Jahresende 2017 findet die 11. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit in Berlin statt. Traditionell wird der gesamte Themenkomplex der integralen Sicherheit adressiert. Wie alle zwei Jahre haben wir jedoch auch für diese Tagung ein Fokusthema ausgewählt, das im Rahmen von Active Sessions und Diskussionsrunden detaillierter behandelt werden soll.

Seit Jahren steigt in Deutschland der Anteil ungeschützter Verkehrsteilnehmer an der Gesamtzahl der Unfallopfer kontinuierlich an. In 2015 verunglückten 1.621 dieser Gruppe tödlich. Inzwischen beträgt der Anteil mit 47% etwa die Hälfte aller im Straßenverkehr verunglückten Personen. Grund genug, diese Entwicklung gemeinsam mit Ihnen intensiv zu diskutieren und nach Lösungen zu suchen.

Unter ungeschützte Verkehrsteilnehmer versteht man üblicherweise vor allem Fußgänger, Zweirad- und Motorradfahrer. Wie auch im Rahmen der Berliner Erklärung zur Fahrzeugsicherheit des VDI' bereits adressiert, werden ohne eine deutliche Verbesserung der Situation dieser Verkehrsteilnehmer die gesteckten Ziele hinsichtlich Reduzierung der Verkehrsoffener in Deutschland nicht zu erreichen sein.

Es stellt sich daher die Frage, wo die Stellhebel und Möglichkeiten, eine Trendwende herbeizuführen, nun liegen? Welche Möglichkeiten haben Fußgänger, Zweiradfahrer und Motorradfahrer, sich selbst besser schützen? Wie kann das spezifische Risiko von Zweirädern beim Alleinunfall gemindert werden? Wie lassen sich die Risiken dieser schwächeren Verkehrsteilnehmer durch Maßnahmen an den stärkeren Unfallpartnern (PKW/LKW) minimieren? Welchen Beitrag könnte die Infrastruktur leisten?

Aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der Umfelderkennung, die zunehmende Automatisierung von Fahrzeugen, aber auch die Evolution vorhandener sowie völlig neuer Sicherheitskonzepte bieten Möglichkeiten, den Straßenverkehr sicherer zu machen und äußere Verkehrsteilnehmer besser zu schützen. Allerdings gibt es auch Faktoren, die das Risiko, im Straßenverkehr verletzt oder getötet zu werden, erhöhen: der demografische Wandel, mehr Verkehr, zunehmender Stress, Multitasking und Ablenkung sind nur einige dieser Elemente.

Wir möchten Sie motivieren, sich an dieser Tagung aktiv zu beteiligen. Bereichern Sie die Veranstaltung mit Ihrer Kompetenz in den Diskussionen. Helfen Sie uns, Fahrzeuge und damit den Straßenverkehr sicherer zu gestalten. Wir freuen uns auf den Austausch mit Ihnen!

Neue Sitzpositionen im automatischen Fahrmodus – Eine Herausforderung für die Bewertung von Submarining

Autonomous driving enables new seating positions – a challenge to assess submarining

Dr.-Ing. Martin Unger, Özgür Cebeci, IATmbh, Berlin

Zusammenfassung

In autonom fahrenden Automobilen werden sich die Insassenpositionen deutlich verändern. Aktuelle Szenarien reichen von „entspanntem Sitzen“ über „Nutzung eines mobilen Büros“ bis zu „liegenden/schlafenden Insassen“. Zudem soll in selbstfahrenden Fahrzeugen der Zugewinn an Bewegungsfreiheit nicht durch zusätzliche Sicherheitskomponenten beschränkt werden. Aus der Entwicklung von Liegesitzen ist bekannt, dass bei einer flacher gestellten Rückenlehne zur Kompensation des Submariningrisikos Gegenmaßnahmen erforderlich sind. Mit Sitzpositionen bis hin zu gänzlich liegenden und schlafenden Passagieren steigt der Bedarf einer genauen Bewertung des Submariningrisikos. Die heute in der Entwicklung eingesetzten Insassenmodelle geben hier unterschiedliche Antworten bei sonst gleichen Ausgangsbedingungen. Daher muss die binäre Submarining-Nonsubmarining-Betrachtung um eine bewertbare Größe ergänzt werden, die aufzeigt, wie „robust“ der Insasse gegenüber Submarining geschützt ist.

Mit einer detaillierten Lastpfadanalyse wird der Gleichgewichtszustand „Sitz-Becken-Gurt“ in den unterschiedlichen Insassenmodellen beschrieben. Die am Becken angreifenden Kräfte und Momente wirken unter anderem am Lumbar spine, Femur, Ilium und Sitzbeinknochen. Darüber hinaus gibt es untergeordnete Kräfte aus dem Kontakt der inneren Organe. Sie werden mit Hilfe der verschiedenen, numerischen Modelle beurteilt und zusammen mit der Insassenkinematik beschrieben.

Eine Beurteilung der Sicherheit gegen Submarining erlaubt einen objektiven Vergleich unterschiedlicher Insassenmodelle, Sitzpositionen und konstruktiver Maßnahmen zur Vermeidung von Submarining.

Abstract

Autonomous driving provides the opportunity to choose between different seating positions. As it is not necessary to sit upright to hold the steering wheel, one can slouch for higher ease and more comfort up to an almost straight sleeping position. Therefore additional belting and restrictive security devices should be avoided.

The concept development for occupant safety has revealed the requirement for additional measures to prevent the occupant from submarining in the case of a rearward inclined seat. Considering different occupant models in hardware testing respectively in numerical simulations, there are diverse responses from each testing device regarding the assessment of submarining.

In addition to a strict binary “submarining-non-submarining” evaluation, a measurable parameter has to be defined that shows how far an occurring submarining could be. This helps to define the occupant-restraint-system-interaction as a stable condition.

First of all, a detailed force path analyses has to be carried out for each subject. This identifies the condition of an equilibrium for the Seat-Pelvis-Belt interaction. Forces and moments are generated from the interaction between components such as the lumbar spine, femur, iliac crest, seat contact and the abdominal foam and accordingly the inner organs of a human body model.

An evaluation of submarining prevention leads to an objective comparison between different occupant models, seating positions and design features.

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage
2. Lastpfadanalyse am H350 bezüglich einer Submarininguntersuchung
3. Lastpfadanalyse am H350 mit auftretendem Submarining
4. Lastpfadanalyse am THUMS v4 in herkömmlicher Sitzposition
5. Lastpfadanalyse am THUMS v4 in liegender Position und Submarining
6. Fazit und Ausblick

1. Ausgangslage

Die Zahl der im Straßenverkehr getöteten Personen ist seit einem Höchststand in den 1970er Jahren von über 20.000 auf 3.206 im Jahr 2016 gesunken [1]. Neben der Einführung einer Promillegrenze im Jahr 1973 und der flottenweiten Durchsetzung von elektronischen Fahrdynamikregelungen in allen Fahrzeugklassen im Bereich der aktiven Sicherheit in jüngerer Vergangenheit, trugen hauptsächlich die allgemeine Anschnallpflicht und deren Ahndung bei Nichteinhaltung dazu bei die passive Sicherheit zu erhöhen. [2]

Besonders der Dreipunktgurt ermöglicht es dem Insassen frühzeitig an der Fahrzeugverzögerung teilzunehmen. So wird die Erhöhung der Relativgeschwindigkeit zwischen Insasse und Fahrzeug während des Crashes verringert und die Kräfte auf den Körper sinken. Funktions- und nutzungsbedingt können Sicherheitsgurte bei unsachgemäßer Nutzung zur Gefahr für die Insassen werden.

Der Beckengurt eines Dreipunktgurtes kann beim Submarining (Bild 1) in ungünstigen Konstellationen schwere Verletzungen der inneren Organe verursachen, wenn die Gurtkraft nicht in die knöcherne Struktur des Insassen eingeleitet werden kann, sondern das Becken unter dem Gurt durchrutscht. Abdominelle Aortenverletzungen bis hin zu Verletzungen der Lendenwirbelsäule können aufgrund von Submarining verursacht werden [3], [4].

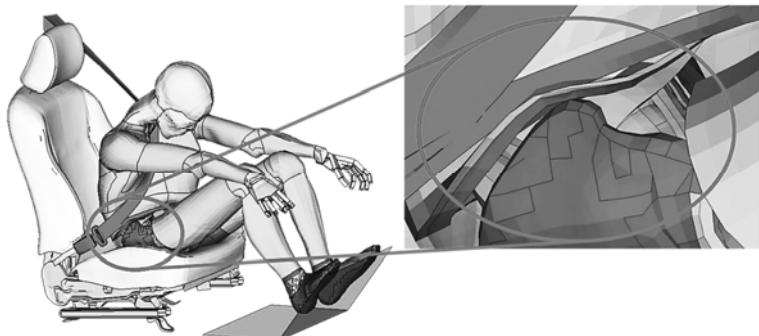


Bild 1: Submarining am Beispiel eines THUMS v5 in LS-Dyna, [7].

Die Bestimmung des Submariningrisikos neben der Auslegung des Rückhaltesystems ist auch stark von dem betrachteten Insassenmodell abhängig. Wie in [7] gezeigt, reagieren die heute gebräuchlichen Insassenmodelle H350, THOR und THUMS sehr unterschiedlich.

Die konstruktiven Faktoren, welche Submarining beeinflussen sind z.B. die Gurtankerlage des Beckengurtes, Geometrie und Steifigkeit der Sitzschalenstruktur, ggf. Femurabstützung, und Abstimmung der Kraftbegrenzung am Schultergurt auf der Fahrzeugseite und die Steifigkeit der unteren Lendenwirbelsäule [5].

Die Bewertung von Submarining wird im EuroNCAP für den H305 anhand der Änderung der gemessenen Ilium-Kraft über der Zeit beschrieben. Zudem findet eine visuelle Überprüfung der Zeitlupenaufnahmen aus dem Versuch statt [6].

Steigt der *Iliac Force Drop (IFD)* am Ilium über $IFD = 1 \frac{kN}{ms}$, ist von Submarining auszugehen (Bild 2). In der Vergangenheit hat sich der Grenzwert in herkömmlichen Sitzpositionen als verlässlich erwiesen.

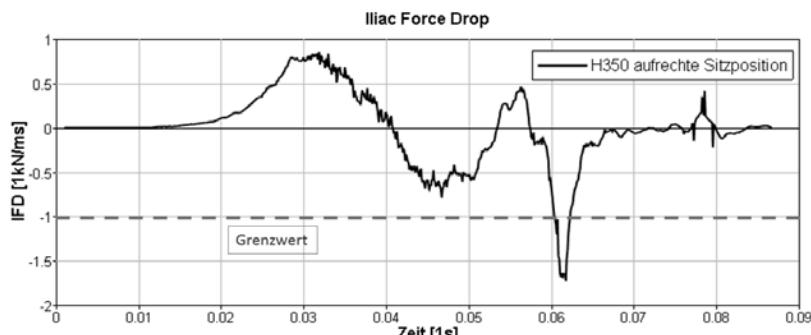


Bild 2: IFD-Verlauf mit Submarining am Bsp. H350, IATmbH, 2017.

Neben der Kraftbestimmung gibt es rein geometrische Betrachtungen, welche die Beckengurtlage mit der Beckenposition des Insassen in Relation setzen. So sollte der Beckengurtwinkel gemessen vom Anlagepunkt am Körper und dem Gurtverankerungspunkt größer $\alpha > 45^\circ$ zur Horizontalen sein.

Erfahrungsgemäß sind Gurtverankerungspunkte – innerhalb der gesetzlichen Grenzen – möglichst weit vorn und tief zu wählen um Submarining zu verhindern [7].

Diese Bewertungsmethoden stoßen bei der Auslegung von Rückhaltesystemen für autonom fahrende Fahrzeuge schnell an ihre Grenzen, wenn dabei andere Sitzpositionen, als die zum Führen eines Fahrzeugs üblichen eingenommen werden. Als Beispiel sei eine entspannte Liegeposition genannt. Der Oberkörper und das Becken des Insassen sind dabei stärker nach hinten geneigt als üblich und der Beckengurt liegt gegenüber dem Ilium ungünstig.

Bild 3 zeigt einen oberhalb des Beckenknochens liegenden Gurt. Muss das Becken im Crash zurückgehalten werden, so hat der Gurt ohne Straffungen an Endbeschlag und Gurtschloss wenig Möglichkeit Kraft in das Skelett einzuleiten. Während der Vorverlagerung des Beckens rutscht der Gurt über den Beckenkamm in den Abdominalbereich.

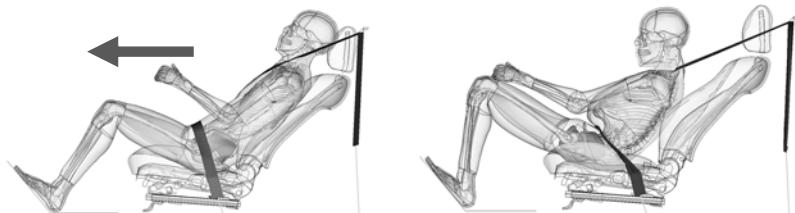


Bild 3: Gurtlage in entspannter Sitzposition mit resultierendem Submarining am Beispiel eines THUMS v4 in LS-Dyna, IATmbH, 2017.

Trotz eindeutig erkennbarem Submarining greift eine Auswertung mit Hilfe des *IFD* hier nicht. Bild 4 zeigt den kritischeren Kraftverlauf am rechten Iliac Crest. Da der Beckengurt geometrisch bedingt keine Möglichkeit hat signifikant am Ilium anzuliegen, wird auch beim Abrutschen keine größere Kraftdifferenz beobachtet. Weiterhin zeigt sich, dass das weiche Beckenfleisch des THUMS beim Submarining über den Beckenknochen „fließt“ und so den Gurt in Richtung Abdomen ableitet (Bild 5).

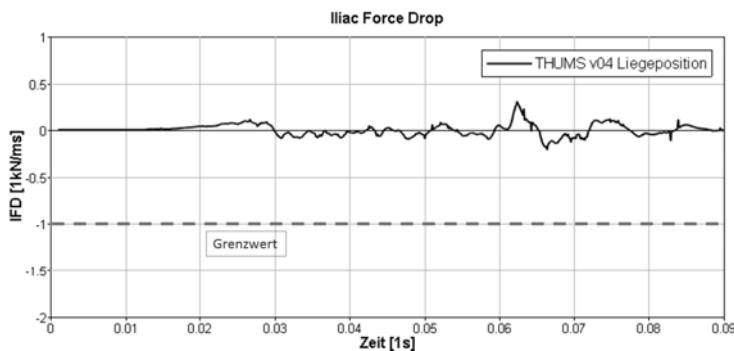


Bild 4: IFD-Verlauf des THUMS v4 in LS-Dyna in Liegeposition, IATmbH, 2017.

Im Vergleich zu einem H3-Dummy sind die zeitlichen Kraftänderungen durch den Gurt am Ilium nicht sehr trennscharf und für eine Bewertung des Submarining wie es für den H305 angewandt wird weniger verlässlich.

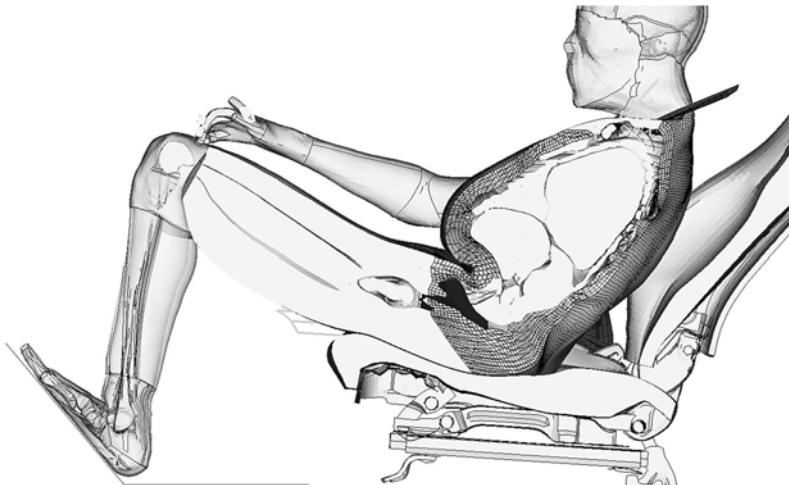


Bild 5: Abgleiten des Beckenfleischs THUMS v4 in LS-Dyna in Liegeposition, IATmbH, 2017.

Mit einem stark abstraierten Ansatz kann man das Abrutschen des Beckengurtes in Abhängigkeit der Reibung zwischen Gurt und Becken beschreiben. Dabei sind alle Elastizitäten und Nichtlinearitäten vernachlässigt. Übersteigt die Winkeldifferenz zwischen Beckengurt und der gedachten, gradlinigen Vorderkante des Iliums einen kritischen Winkel, so reicht die Reibkraft zwischen Beckengurt und Becken nicht mehr aus um den Gurt am Becken zu halten [8]. Bild 6 zeigt zwei Momentaufnahmen aus einer Simulation mit Submarining am THUMS v4. Die linke Darstellung zeigt den Zeitpunkt, in welchem die volle Gurtkraft ohne Querkraft in das Becken eingeleitet wird. Im weiteren Verlauf der Vorverlagerung rotiert der Beckengurt im Verhältnis zum Becken weiter nach oben, wodurch nach Erreichen des kritischen Winkels α_{krit} in Abhängigkeit des Reibbeiwertes μ die wirkende Reibkraft F_R überschritten wird.

Mit $F_N = F_{Gurt} \cdot \cos \alpha$ und $F_R = F_{Gurt} \cdot \sin \alpha = F_N \cdot \mu$ ergibt sich nach Umstellung der kritische Winkel $\alpha_{krit} = \arctan(\mu)$. Bei einem Reibbeiwert von $\mu = 0,35$ erhält man einen kritischen Gurtwinkel von $\alpha_{krit} \approx 20^\circ$.

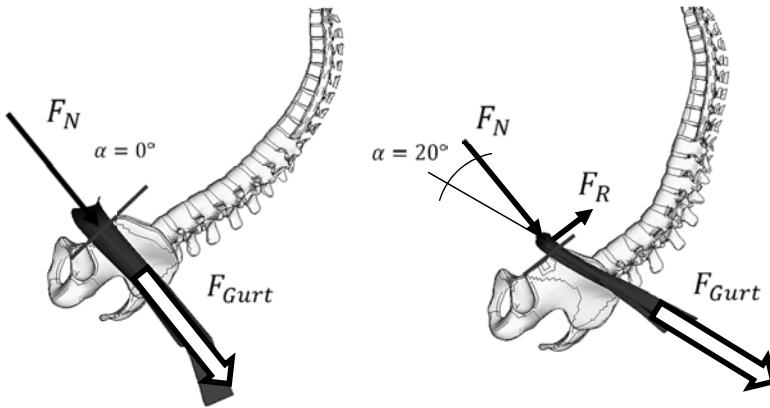
Winkeländerung Becken zu Gurt $\sim 20^\circ$ 

Bild 6: Einleitung der Gurtkraft ohne Querkomponente und kritischer Beckenwinkel, IATmbH, 2017.

Dabei bleibt jedoch zu beachten, dass die reine Winkelbetrachtung einen ersten Ansatz zur Auslegung des Rückhaltesystems darstellt, darüber hinaus bedarf es für eine submaringerechte Auslegung in erster Linie der sicheren Beherrschung des Momentengleichgewichts am Becken.

2. Lastpfadanalyse am H350 bezüglich einer Submaringuntersuchung

Die verwendeten Simulationsmodelle wurden unter generischen Randbedingungen entsprechend der Literatur aufgebaut. Dazu zählen sowohl Parameter der Rückhaltung als auch des Pulses. [9]. Als Variation zur Submaringuntersuchung wurden neben Steifigkeiten der Sitzstruktur [10] die unteren Gurtankerpunkte, sowie Parameter der Gurtkraftbegrenzung verändert.

Für eine Analyse des Submarings müssen alle am Becken angreifenden Kräfte und Momente bekannt sein. Im Folgenden finden alle Betrachtungen in der x-z-Ebene statt, da der y-Anteil für die Problemstellung vernachlässigt werden kann. Bild 7 zeigt am Beispiel eines H350 alle am Becken angreifenden Kräfte und Momente.

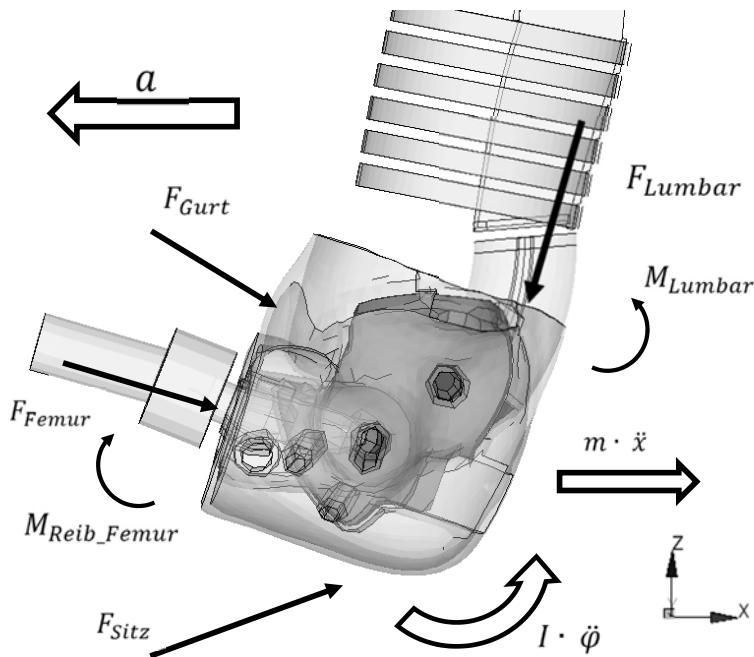


Bild 7: Angreifende Kräfte und Momente am Becken des H350, IATmbH, 2017.

Entsprechend der Bewegungsgleichung müssen alle am Becken wirkenden Kräfte und Momente ausgeglichen sein. Zur Überprüfung der definierten Messpunkte im FE-Modell zeigt Bild 8 alle angreifenden Kräfte in globaler x- und z-Richtung. Zusammen mit der wirkenden Massenträgheit ist die Summe näherungsweise „null“. Zum Zeitpunkt des Rebounds ist bei $t = 68ms$ eine minimale Schwingung der Nulllinie zu beobachten. Dies kann jedoch als vernachlässigbar betrachtet werden. Erwartungsgemäß sind die Kräfte des Sitzes und des Gurtes am höchsten und wirken der Massenträgheit des Beckens entgegen. Da die Oberschenkel ohne Abstützung sind, wirken deren Kräfte negativ am Becken.

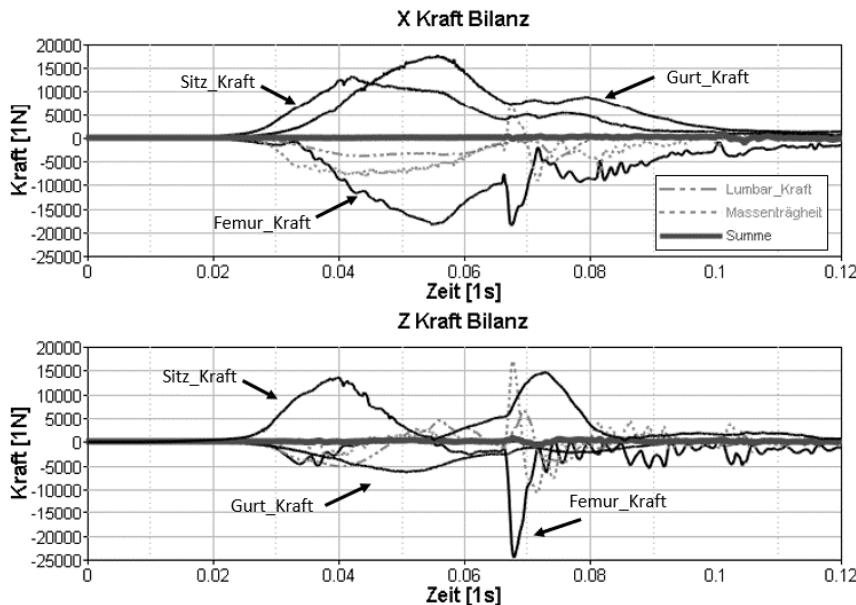


Bild 8: Kräftegleichgewicht H350, IATmbH, 2017.

Bild 9 zeigt die Momentenbilanz des Beckens um die y-Achse bezogen auf den Massenschwerpunkt. Entsprechend der Wahl des Koordinatensystems (Bild 7) wirken positive Momente in die Richtung, in welcher Submarining begünstigt wird und negative Momente, die das Becken zurückhalten. Hauptanteil an der Rückhaltung haben demnach das Moment aus der Sitzkraft, das Moment an der unteren Lendenwirbelsäule durch Biegung und das Moment des Oberkörpers, wenn er am Becken durch einen weichen Gurtkraftbegrenzer zieht. Negativ wirken das positive Moment der Oberschenkel, da sie keine Abstützung finden, die Gurtkraft, wenn die unteren Gurtankerpunkte zu weit oben liegen und so das eingebrachte Moment durch einen ungünstigen Winkel positiv wird und wiederum das durch den Oberkörper eingebrachte Moment aus dessen Druckkraft auf die untere Lendenwirbelsäule. Lässt die Gurtkraftbegrenzung am Thorax eine zu geringe Vorverlagerung zu, so beginnt der Oberkörper auf das Becken zu drücken und begünstigt die positive Rotation des Beckens und Submarining wird wahrscheinlicher.

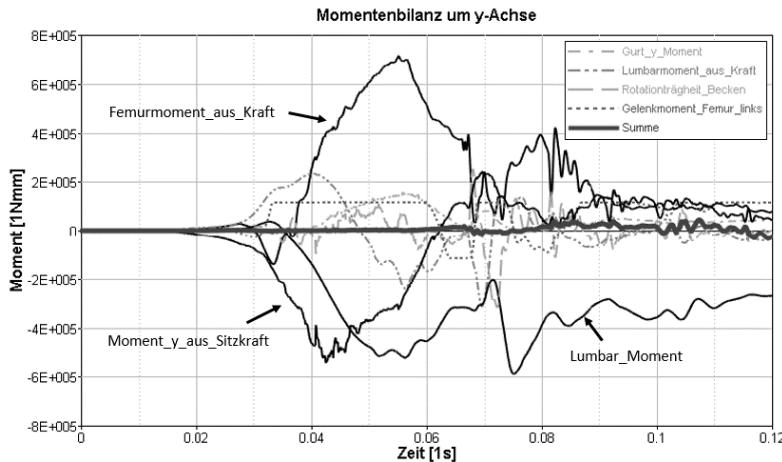


Bild 9: Momentengleichgewicht am Becken H350, IATmbH, 2017.

Von Vorteil bezüglich Submariningvermeidung ist es, wenn sowohl das Lumbarmoment, als auch die Zugkraft vom Oberkörper frühzeitig ein negatives Moment in das Becken einbringen. Nach anfänglicher Druckkraft am Lumbarspine, überschreitet der Thorax den aufrechten Winkel bei $t = 48ms$ und beginnt am Becken zu ziehen, wodurch Submarining entgegengewirkt werden kann. Das durch die Gurtkraft eingeleitete Moment bleibt auf niedrigem Niveau und in diesem Fall wird Submarining sicher verhindert.

Bild 10 zeigt die jeweiligen Anteile der Momente auf die Drehung des Beckens. Die negativen und positiven Anteile sind sehr ausgeglichen. In der Simulation ist kein Submarining zu beobachten. Aufgrund der Geometrie der Testumgebung mit einfacherem Sitzblock ohne Fahrzeugumgebung und der Struktur des Sitzes, ist keine signifikante Beckendrehung zu beobachten.

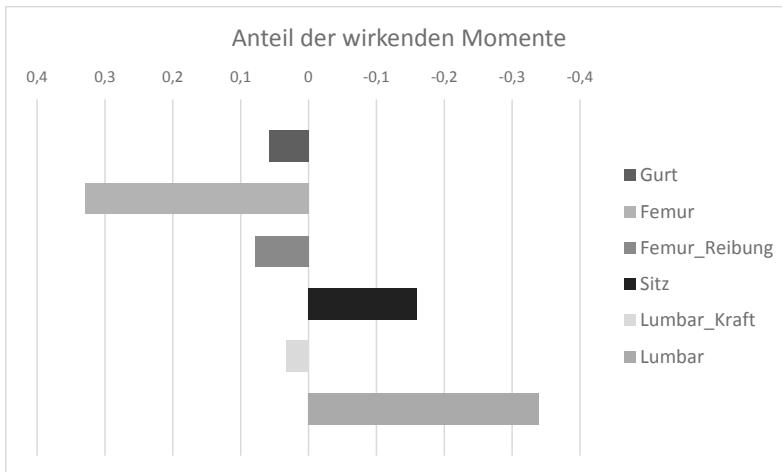


Bild 10: Anteile nach Drehrichtung, IATmbH, 2017.

Hauptanteil an der positiven Drehung haben die unteren Extremitäten, da sich ihnen hier keine Abstützung bietet. In negativer Drehrichtung, also dem Submarining entgegenwirkend, helfen das Moment an der unteren Lendenwirbelsäule und das Moment aus der Sitzkraft.

3. Lastpfadanalyse am H350 mit auftretendem Submarining

Bild 11 zeigt die am Becken angreifenden Momente. Das auftretende Submarining am H350 Dummy wurde bewusst durch eine sehr weiche Sitzstruktur erzwungen. Im Vergleich zu Bild 9 ist zu beobachten, dass gerade die Momente, welche dem Submarining entgegenwirken wesentlich geringer ausfallen. So ist entsprechend der geschwächten Sitzstruktur das Moment aus der Sitzkraft wesentlich niedriger. Den Hauptanteil hat hier das negative Biegemoment des Lumbar spines, welches dem Submarining entgegenwirkt. Das Moment, welches aus der Gurtkraft resultiert, erreicht schon weit vor dem Abrutschen des Gurtes vom Ilium bei $t = 80ms$ sein Maximum.

Die weit oben gewählten Gurtpunkte haben großen Einfluss auf den initialen Gurtwinkel, die Steifigkeit des Sitzes hat zusätzlich großen Einfluss auf die Veränderung des Gurtwinkels während der Vorverlagerung (vgl. [8]). So überschreitet der relative Winkel zwischen Beckengurt und Ilium den kritischen Winkel und es kommt zum Submarining.

Positive und negative Momente scheinen relativ ausgewogen am Becken zu wirken. Das dem Submarining entgegenwirkende Negativmoments, steigt besonders ab $t = 70ms$ an.

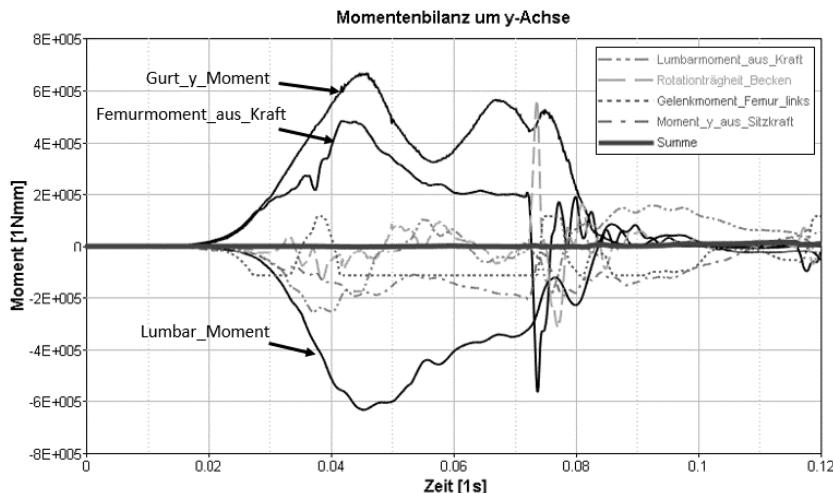


Bild 11: Momentengleichgewicht am Becken H350 mit Submarining, IATmbH, 2017.

4. Lastpfadanalyse am THUMS v4 in herkömmlicher Sitzposition

Prinzipiell gelten für Menschmodelle dieselben Randbedingungen für die Lastpfadanalyse wie für HIII-Dummies. Da die Analyse der wirkenden Momente am Becken hier in der x-z-Ebene aufgebaut ist, ergeben sich aus den größeren Elastizitäten im Menschmodell größere Ungenauigkeiten. So findet bei der Vorverlagerung des Insassen eine teils größere Rotation um seine z-Achse statt, die hier nicht betrachtet wird.

Bild 12 zeigt die angreifenden Momente am Becken des THUMS v4 mit deutlichem Submarining bei $t = 62ms$.

Auch hier ist ein deutlicher Überschuss des positiv wirkenden Momentes aus der Gurtkraft zu erkennen, welches abrupt mit dem Submarining einbricht.

Während der Zeit vor dem Maximum des Momentes aus der Gurtkraft kann die entgegenwirkende Sitzkraft kein genügend großes Moment aufbauen um Submarining zu verhindern.

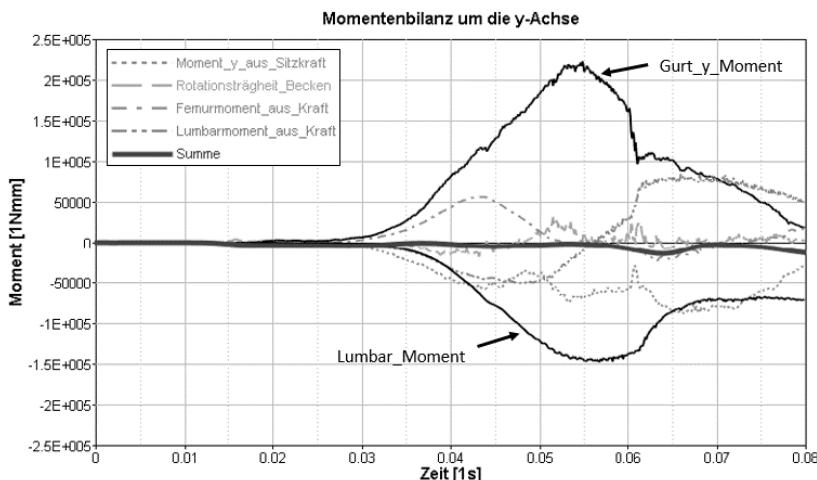


Bild 12: Momentengleichgewicht am Becken THUMS v4 mit Submarining, IATmbH, 2017.

Betrachtet man die Momentenbilanz am Becken eines THUMS v4 ohne Submarining (Bild 13), so ist der Unterschied weniger deutlich als bei der Betrachtung der Momentenbilanz mit und ohne Submarining beim H3-Dummy.

In beiden Fällen hat die in das Becken eingeleitete Gurtkraft und das daraus resultierende Moment einen großen Einfluss auf die im Koordinatensystem positive Rotation um die y-Achse. Zwar bricht der Momentenverlauf nicht ein, aber die Momentenverhältnisse sind weniger stark ausgeprägt als beim Dummy. Hier kommen die größeren Elastizitäten des Menschmodells zum Tragen und es wirkt sich in der Variante ohne Submarining aus, dass es sich um ein relativ knappes Verhindern des Abrutschens des Beckengurtes vom Ilium handelt. Das absolute Maximum des Momentes aus der Beckengurtkraft wird zu einem späteren Zeitpunkt erreicht und ist zudem niedriger. Der positiv wirkende Momentenanteil ist im Vergleich niedriger und führt so zu keinem Submarining.

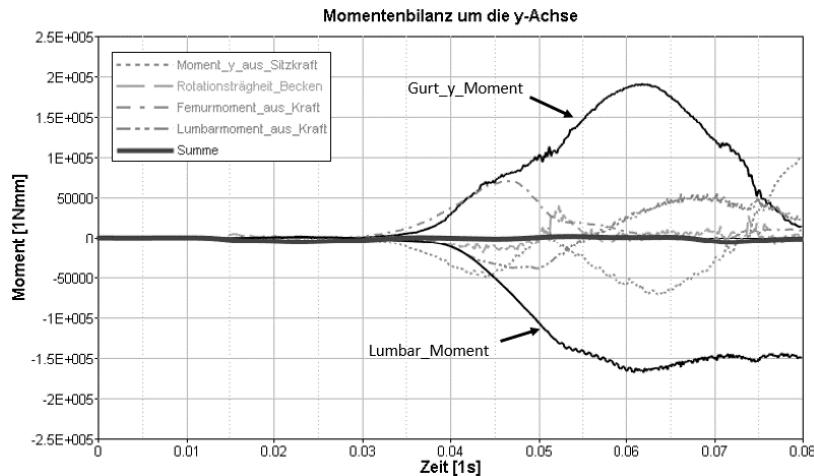


Bild 13: Momentengleichgewicht am Becken THUMS v4 ohne Submarining, IATmbH, 2017.

5. Lastpfadanalyse am THUMS v4 in liegender Position und Submarining

Betrachtet man die Verläufe der am Becken angreifenden Momente eines nach hinten geneigten Menschmodells (Bild 14), so sind deutliche Unterschiede zu einer aufrechten Fahrposition zu beobachten. Hier wird der Bereich bis zum Submarining gezeigt, um einen klareren Blick zu gewährleisten.

Deutlich geringer fallen die negativen Momente auf das Becken aus. Das aus der Gurtkraft resultierende Moment führt zu einer starken Beckendrehung mit folgendem Submarining bei $t = 50ms$. Wegen der fehlenden Abstützung am Interieur leiten die Beine zusätzlich ein positives Moment in das Becken ein.

Der stark nach hinten geneigte Oberkörper beginnt zudem ab $t = 47ms$ zusätzlich ein positives Moment in das Becken einzuleiten.

Weder das Moment an der unteren Lendenwirbelsäule, noch das Moment aus der Gegenkraft des Sitzes können der Rotation des Beckens etwas entgegenstellen. Besonders wegen des flachen Neigungswinkels der Sitzfläche (Bild 5) kann Submarining nicht verhindert werden.

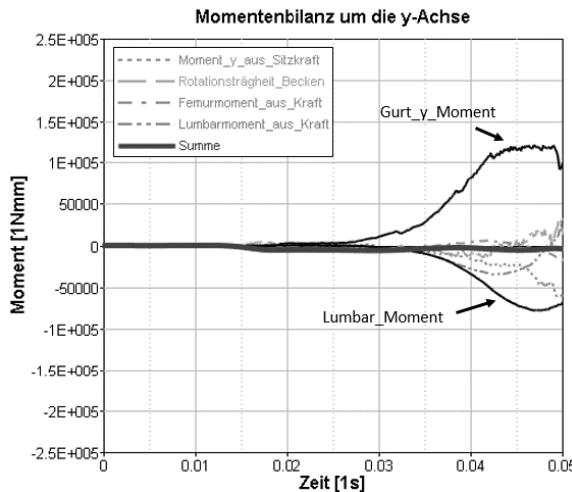


Bild 14: Momente am Becken THUMS v4 mit Submarining, IATmbH, 2017.

Zur Veranschaulichung sind die Anteile der für die Drehung verantwortlichen Momente in Bild 15 dargestellt. An den Momentverläufen ist zu erkennen, dass besonders der durch die Gurtkraft in das Becken eingeleitete Momentenanteil bei knapp 50% liegt. Zusammen mit dem Moment aus der Femurkraft weisen diese mit 60% einen deutlichen Überschuss an positiv drehenden Momenten auf.

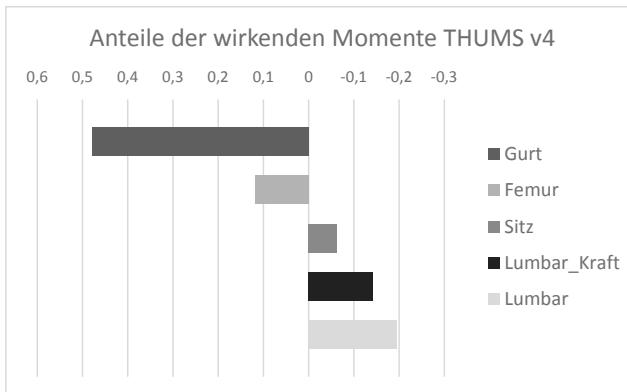


Bild 15: Anteile nach Drehrichtung THUMS v4 liegend, IATmbH, 2017.

6. Fazit und Ausblick

Die Entwicklung autonom fahrender Fahrzeuge ermöglicht es dem Insassen eine Sitzposition zu erlauben, die ihn während der Fahrt entspannen lässt. Liegende Positionen sind denkbar und verlangen daher nach neuen Rückhaltemaßnahmen, da Submarining nicht mehr sicher verhindert werden kann. Besonders die herkömmlichen Bewertungsmethoden können zu verfälschten Ergebnissen führen, da Wirkrichtung und Wirkzusammenhang grundsätzlich verschieden zu einem selbstfahrenden Insassen in aufrechter Position sind.

Mit der detaillierten Analyse der am Becken angreifenden Kräfte und der daraus resultierenden Momente kann aufgezeigt werden, ob es sich im entsprechenden Lastfall um einen stabilen Zustand handelt, oder durch eine Verschiebung der Lasteinträge Submarining zu erwarten ist. Notwendige Maßnahmen können daraufhin abgeleitet werden, wie z.B. veränderte Oberkörperkinematik durch Änderung des Gurtkraftbegrenzers oder Versteifung der Sitzrampe in der Sitzstruktur bei zu geringer Sitzgegenkraft.

Die Untersuchung ist auf die x-z-Ebene begrenzt und genügt dem Verhalten eines H3-Dummys. Dieser ist ausreichend steif und zeigt im Vergleich zum Menschmodell weniger Rotation um seine Hochachse. Die hohe Biofidelität des THUMS zeigt den komplexen Zusammenhang der betrachteten Größen und führt zu stärkeren Abweichungen. Rutscht nur eine Seite des Gurts über den Beckenkamm, wird die Bewertung erschwert, da eine größere Rotation um die Hochachse entsteht. Hier kann es von Vorteil sein die Untersuchung in alle drei Raumachsen zu erweitern.

Anschließende Untersuchungen sollen Aufschluss darüber geben, in welchem Maß einzelne Momenteneinträge voneinander abhängig sind und bezogen auf die eingenommene Position im Fahrzeug Anteil an Submarining oder nicht Submarining haben. Besonders die Erweiterung der Analyse auf das Modell des THORs wird weitere Einblicke in dessen Kinematik und Verhalten in aufrechter und liegender Position geben.

Literaturverzeichnis

- [1] Statistisches Bundesamt: Fachserie 8 Reihe 7 – Verkehrsunfälle - Wiesbaden, 2017.
- [2] Appel H, Krabbel G, Vetter D. 2002. Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion. Kippenheim: Verlag INFORMATION Ambs GmbH.
- [3] Dimomeletis, I., et all.: Infrerenale Aortenruptur durch „Submarine“ effekt bei Frontalzusammenstoß eines PKW, mcn Nürnberg, 2013.
- [4] Torba M, et al. 2014. Seat Belt Syndrom, a new pattern of injury in developing countries. Case report and review of literature. G Chir Vol 35: 170-180.
- [5] Uriot J, et al. 2015. Comparison of HII, HIII and THOR dummy responses with respect to PMHS sled tests. IRCOBI: IRC-15-55.
- [6] EuroNCAP. Assessment Protocol – Adult Occupant Protection. 2015.
- [7] Unger, M., Cebeci, Ö.: An approach to compare the submarining behavior of THUMS vs. THOR, 6. Internationales Symposium “Human Modeling and Simulation in Automotiv Engineering”, Heidelberg, 2016.
- [8] Nakae K, et al. 2015. Analysis of Abdominal Injuries Caused by the Submarining Phenomenon in the Rear Seat Occupants. ESV: Paper Number 15-0023.
- [9] Richard O, et al. 2015. Occupant restraint optimization in frontal crash to mitigate the risk of submarining in out-of-position situation. IRCOBI: IRC-15-19.
- [10] Beck B, Brown J, Bilston L E. 2001. Variations in Rear Seat Cushion Properties and the Effects on Submarining. Traffic Injury Prevention 12: 54-61.

Strategy for the limits of automated driving

Terminal stop, system shut down – all out please?

Bardo Peters, Continental, Regensburg;
Maged Khalil, Klaus Rink, Frankfurt;
Stefan Kern, Alzenau

Zusammenfassung

Auch Jahrzehnte nach der Einführung von elektronischen Systemen für die sicherheitskritischen Funktionen im Auto fungiert der Mensch als sogenannte Rückfallebene in der Funktionsweise von vielen dieser Systeme. Das gilt auch für Funktionen mit hohen Verfügbarkeitsanforderungen. Beispielsweise kann ein elektrisches Lenksystem so konstruiert werden, dass es sich abschaltet, wenn es Unsicherheiten bei der Eigendiagnose entdeckt (Fail-safe Design), denn der Fahrer kann das Lenkrad auch ohne das System noch von Hand drehen und so das Auto kontrollieren. Ebenso kann der Fahrer die mechanische Kraft seiner Beine nutzen, um die Bremsen zu bedienen, auch wenn die hydraulische Unterstützung versagt. Im Wesentlichen macht also der Mensch (als Teil der Rückfallebene) die Systeme betriebssicher. Per Definition entlassen die Systeme hochautomatisierter (SAE/VDA Level 4) oder autonomer (AD) Fahrzeuge (SAE/VDA Level 5) den Fahrer von jeglicher Verantwortung für die Fahraufgabe solange sie aktiv sind. Auf den Fahrer kann in Level 4 und 5 als Rückfallebene nicht zurückgegriffen werden und die Systeme müssen abgesichert und zuverlässig sein. Angeichts der Tatsache, dass wir im Wesentlichen die gleichen Technologien nutzen, was passiert, wenn das AD-System die Fahraufgabe nicht mehr wahrnehmen kann? Wer steht als Fail Operational Layer (oder Rückfallebene) zur Verfügung? Gewiss nicht mehr der Fahrer, dessen Aufmerksamkeit und somit Reaktionszeit dramatisch sinkt, sobald wir ihm erlauben andere Aufgaben wahrzunehmen (E-Mails lesen, Filme schauen, vielleicht sogar ein Nickerchen zu halten). Ein sehr viel früheres und wirkungsvolleres Warnkonzept könnte eine mögliche Lösung sein. Aber eine zweite hochverfügbare Systemebene, funktional getrennt von dem Fahr-funktion umsetzenden AD-System, ist unabdingbar. Dieses „Auffangnetz“ kommt dann zum Einsatz, wenn die Fahrfunktion weder vom AD System noch vom Fahrer aufrechterhalten werden kann. Dieses System hat die Aufgabe, schnellstmöglich einen sicheren Nothalt durchzuführen. Ein dazugehöriges Rescue-Konzept muss auch einen Crash und Postcrash abwickeln

können, weil die Handlungsweise anderer Verkehrsteilnehmer einen Unfall im Einzelfall unvermeidbar machen kann.

Die Rückfallebene muss mit höchster Zuverlässigkeit und Crashsicherheit in einem entsprechend ausgelegten Sicherheitssteuergerät im AD-Fahrzeug umgesetzt werden, um den hohen Verfügbarkeitsanforderungen gerecht zu werden. Continental entwickelt diesen Fail Operational Layer parallel zum AD-System. Dabei überwacht ein System das andere.

Zusätzlich zur integrierten Eigendiagnose des AD-Systems wird ein externer „Beobachter“ aktiviert sein, welcher permanent das AD-System und seine Komponenten auf Fehler und Fehlverhalten plausibilisiert. Bei Abweichungen wird die Information an einen „Entscheider“ weitergegeben, der situationsadaptiv an die Ausfallschwere die Warn- und Notfallmaßnahmen einleitet.

Abstract

Many decades after the introduction of electronic systems performing the most safety-critical functions of an automobile, the human driver has continued to factor as a fallback solution in the design of many of these systems. This is especially true for functionalities with high availability requirements. For instance, an electric-power steering system can be designed to shutdown if it detects any uncertainty about its own operation (i.e. a fail-safe design), because the driver can still manually turn the wheel and steer the car. Similarly, the driver can use the mechanical power of his legs to apply the brakes, even if the hydraulic assistance fails. In all essence, the driver (as part of the fallback solution) makes the system fail-operational. By definition, highly automated (SAE/VDA Level 4) or autonomous driving (AD) (SAE/VDA Level 5) systems relieve the driver of any responsibility while they are active. The driver cannot be counted upon to provide any fallback, and the system has to intrinsically be fail-operational. Given that we are essentially using the same technologies, what happens if an AD system cannot perform the driving task any longer? Who will provide the Fail Operational Layer (or fallback path)?

Certainly no longer the human drivers, whose level of attention and thus response time will drastically drop once we allow them to carry out other tasks (read emails, watch movies, maybe even take a nap). A much earlier and much more effective warning concept could be a possible solution. But a second and highly available system level is indispensable, which is functionally separated from the AD system and designed to carry out the driving task. This “safety net” becomes active as soon as the AD-system or the driver is not able to perform the driving task any more. The main task of this system is to bring the vehicle to a safe emergency stop. An associated rescue concept needs to be capable of initiating in-crash and post-crash strategies

because the actions of other road users, for instance, may make a crash unavoidable in a given case.

This fallback path shall be allocated to a suitable safety control unit in the AD car where it offers maximum reliability and crash safety to meet the high level of availability required for this type of system. Continental is developing the Fail Operational Layer in parallel with the main AD system. Both systems mutually monitor each other.

In addition to the integrated self-diagnosis of the main AD system, an external “observer” will be activated. It permanently carries out plausibility checks on the AD system and its components for faults or any incorrect behavior. If it reveals deviations, this information is passed on to a “supervisor” which will initiate warning and emergency actions depending on the severity of the malfunction.

1. Status quo and trend

Future vehicles capable of highly automated or autonomous driving will be the result of an ongoing evolution that has already led to assisted driving (“partial automation”, SAE/VDA Level 2). Vehicles with a Level 2 system support the driver within clearly defined driving situations and/or speed limits, for instance in a stop-and-go situation on a highway at a driving speed of up to 60 km/h. At all times the driver must monitor the system, and has to be able to act immediately, should the automation not respond adequately to the immediate traffic situation. To meet this requirement, drivers must not take their hands off the wheel for more than the briefest of timespans. The driver fully remains within the loop at all times within this Level 2 automation. The driver is fully responsible for the dynamic driving task and safety.

The next step up the automation ladder is a Level 3 system (“conditional automation”). From this automation level onwards the AD system is responsible for the driving task. This step will greatly increase the system complexity. In Level 3 automation the driver must still be able to take back the dynamic driving task within an “appropriate timespan” if the system requests the human behind the wheel to intervene. Often the acceptable time for a handover procedure is specified within a ten second delay. However, depending on the driving situation it could be shorter or longer. Driving tests at Continental have shown that an alert driver will, on average, take over the dynamic driving task within a little less than three seconds. Nevertheless for this level of alertness the driver has to remain in the loop, which excludes secondary tasks like using a smartphone. If the driver shifts attention to, for instance, reading e-mails this should be done by using the cluster instrument screen as an automotive-optimized part of the human-

machine interface because automation can switch the cluster instrument content back to contents that are immediately relevant to the driving task. This will help the driver to re-focus on the main task.

2. Challenges of highly automated driving

The whole point of automated driving is to increase driving safety. Therefore an AD system (Level 4 / "highly automated") must perform better than a human driver to make sense and to gain acceptance. Level 4 AD systems are expected for the year 2020 or later. The Cruising Chauffeur, developed by Continental and first presented to a trade audience in 2016, is such a Level 4 AD system which is currently in its third generation of development.

Considering that the driver is at least partially responsible for around 90 percent of all accidents, an activated Level 4 AD system will avoid causes of accidents such as falling asleep behind the wheel, health problems of the driver, lack of attention, failure to follow traffic rules and so on. However, as a Level 4 AD system frees the driver to pursue other tasks during driving, the driver's level of attention can vary greatly at the moment of a takeover request. Therefore any Level 4 AD system has to detect the driver's state. The information about the driver is essential to decide whether the driver is capable to take back the driving function, if he/she needs more time to do so, or if he/she is completely out of the loop (e.g. asleep or seriously ill). If the driver is in no shape to take back the dynamic driving task this means that there is no human fallback for the AD system. Therefore the AD system has a meta control level of diagnostics which not only monitor the correct system function of the automation but also the driver. This meta level concept is a core element of any AD system's main path *and* the fallback path. It serves to maintain the comfort and safety of automated driving for as long as possible – and to switch to the fallback path when necessary. In a situation where the main AD system path cannot perform the normal driving task any longer, and the driver does not respond to the takeover request (= no human driver available as fallback path), automation must be able to bring the vehicle to a safe state. This can mean gradual deceleration down to a complete stop in the lane or on the shoulder (Minimum Risk Maneuver, MRM), **Fig. 1**.

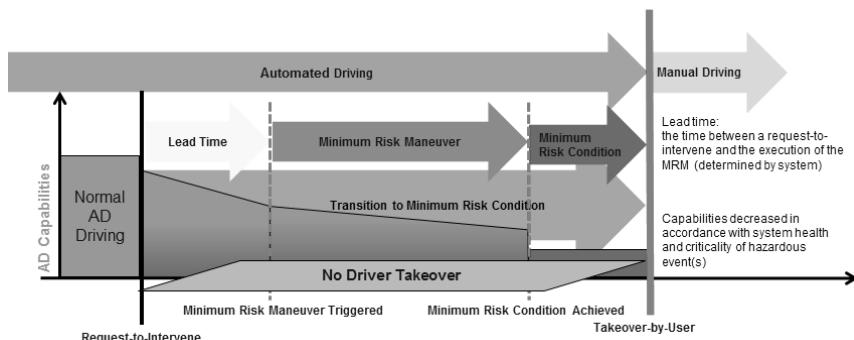


Fig. 1: If the driver fails to respond to a takeover request by the AD system, the Minimum Risk Maneuver (MRM) will be initiated by the automation

But what if the main AD system path cannot perform the driving task any longer because of a serious system fault, the handover procedure to the driver fails, and the main system cannot perform the MRM? In this situation an AD vehicle must have a fallback path (= Fail Operational Layer) which takes over immediately and brings the vehicle to a safe state. This Fail Operational Layer makes the AD system fail-safe by replacing the driver performance in a situation where the main AD path fails.

Statistically a Fail Operational Layer is absolutely essential. As an AD system must meet the requirements of ASIL D (FIT rate = 10, i.e., 1 critical fault during 10^8 (100 million) hours of operation) the underlying factors of controllability, severity, and probability strongly advocate a Fail Operational Layer. While 100 million hours sounds like a large value, given the millions of cars and millions of drivers on the road every day, that number is quickly reached. To ensure a fail-safe operation necessitates a fallback path. In other words: A main AD path failure must be considered, accepted as a possibility, and safely addressed within a redundant architecture. Fail Operational Layer is indispensable for AD.

3. Elements of a solution

A fail-safe operation of an AD system is a matter of architecture. The key element is obviously redundancy. It is a question of system design and architecture how far the extent of redundancy goes: Solutions could span everything from a complete hardware redundancy with a backup for each individual component plus a finely graded degradation concept down to a minimum solution with a simple two-step degradation concept. Continental has investigated

possible options for a fallback path and Fail Operational Layer and has decided to pursue a solution with two separate ECUs and a finely graded degradation concept. **Fig. 2** shows the principal approach used, for instance, in the Continental Cruising Chauffeur Level 4 AD system.

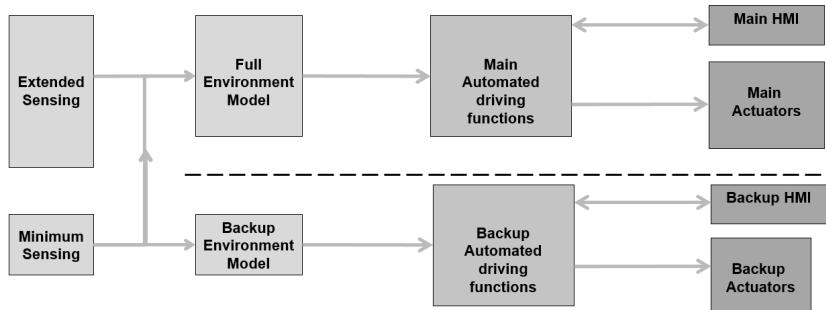


Fig. 2: Vehicle system architecture approach with two support levels

To facilitate a reliable MRM, both paths have access to the required sensors which have been distributed in a redundant way in order to achieve the goals of safe and reliable fallback functionality as well as high performance main functionality together with cost efficiency.

In a case of malfunction on the main path, the fallback path instantly takes over and executes the action which is required in accordance with the degradation concept. The reverse is also true, the main path executes a safe stop if the fallback path is no longer available and the driver does not respond to a takeover request.

For the Cruising Chauffeur Level 4 AD system, Continental has applied these principles within a redundant architecture with two ECUs. **Fig. 3** shows the functional blocks of the architecture with the main path ECU (Automated Driving Control Unit, ADCU) and the fallback ECU (Safety Domain Control Unit, SDCU).

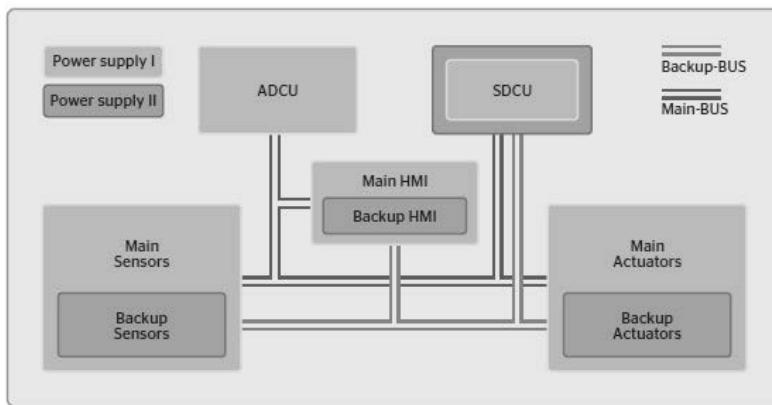


Fig. 3: Redundant safety architecture of the Cruising Chauffeur

The architecture depicted in **Fig. 3** is the result of an analysis which investigated core requirements to design a Fail Operational Layer. The following criteria have been defined as main contributors to safety:

- Functional content and hardware of the Fail Operational Layer shall be a separate technical entity. This is implemented in the separate SDCU.
- The Fail Operational function shall be carried out in an ECU, which is located in a crash-safe position. As the SDCU is also the airbag controller, this condition is complied with.
- The ECU needs to be located in a place where it is protected against harsh environmental influences, such as high temperatures or temperature fluctuations. A suitable place (e.g. transmission tunnel) depends on the type of vehicle.
- The ECU shall have an independent power supply and shall be always available. Again, this is covered by the SDCU concept because this ASIL D ECU for automated driving has a redundant power supply.
- The Fail Operational Layer needs to be closely linked to the Event Data Recorder (EDR). This EDR is integrated in the SDCU.
- The ECU needs to be protected against manipulation or damage. Among other factors, this is also fulfilled by the location in the vehicle.
- A pre-crash environment model, capable of rapidly processing critical objects, is projected as part of the SDCU to facilitate an activation of restraint systems at or prior to the crash.

- In parallel with the activation of the Fail Operational Layer, pre-crash strategies need to be initiated very quickly, to better prepare the vehicle occupants for an emergency situation.

Among the many aspects of the clear cutting line between the AD main path and the fallback path is the fact that the SDCU is connected to two power supplies as shown in **Fig. 4**. The architecture with two completely separate ECUs offers the highest level of reliability and availability. The SDCU is an extension of the existing Airbag Control Unit (ACU) which is needed to provide the required control over passive safety functions. By expanding the functional scope of this ECU, which must be located in a crash-safe position in the vehicle anyway, the utmost level of availability is given even in the case of a crash. This solution offers the benefits of ECU scalability and an economic cost-benefit ratio. In case of a failure on the main path, the remaining functionality of the fallback path is shown in **Fig. 4**.

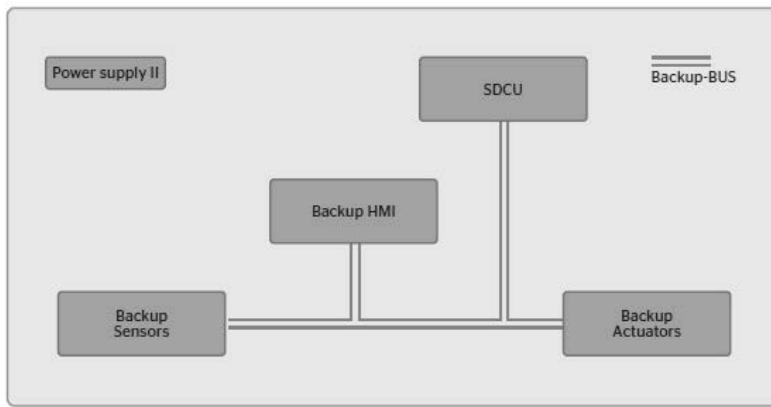


Fig. 4: Even if one of the SDCU power supplies fails, the Fail Operational Layer remains available to execute the MRM

The AD fallback path's primary focus is to provide fail-operationality and bring the vehicle to a safe stop in the unlikely event that the primary path is no longer functional. As such, it is purposefully designed for fast and robust response rather than comfort or fancy functions.

4. Features of the fallback path / “safety net” and chain of effects

One key task of the fallback path is the ability to *recognize* a problem on the main path. To provide this capability, each functional block of the fallback path (as well as the main path) is equipped with diagnostic functions (Fig. 2). The permanent monitoring between the two paths will feed the information about a self-detected uncertainty or fault to the other path. However, there may be types of faults which will not be detected within an isolated diagnostics routine of one path. One example of this type of fault is misleading sensor signals (e.g. camera and radar in combination), which may suggest an available space for the planned trajectory when in fact there is none. Checking both paths for this kind of fault is part of the permanent monitoring task to expand the fail operational capabilities. Continental is developing a new approach called “Consistency Observer”. It is a new element of AD safety which already delivers excellent detection test results in its development phase.

4.1 Consistency Observer

The new Consistency Observer (hereinafter: Observer) currently analyzes sensor signals. It is an application making use of the strength of artificial intelligence in detecting certain patterns in large datasets. In this particular application the patterns which need to be detected are sensor and function data including inconsistencies. An example of this would be a camera image showing a free space and a radar image showing a blocked area. Although still in the early development phase, the Observer detects false/misleading surrounding sensor information with great reliability. This performance is based on feature extraction and a machine learning classification algorithm. The feature set is calculated from raw sensor data and function data and shows a high sensitivity for consistency detection. The machine learning algorithm is based on millions of kilometers of driving on the road as a learning data pool. In test situations when false camera signals were included in a simulated AD process, over 90% of these were detected by the Observer. In future, this algorithm would provide additional information for the supervisors to decide whether to change from the AD main path to the fallback path (and vice versa) and to bring the vehicle to a safe stop. The Observer would thus complement the Supervisor on the sensor side. Also, the Observer will provide valuable diagnosis data, which can be used during the development and the product life of driver assistance systems. Another advantage of the Observer is that it can be a source for the Event Data Recorder (EDR) by providing essential and compact measurement on data validity required for legal questions during crash evaluation.

4.2 Safety Supervisor

The Supervisor is the part of the architecture which decides when to change from the main path to the fallback path or vice versa. The Supervisor is part of both paths. It collects self-diagnostic information from system functions, checks availability of system functions, covers temporary failures or scheduled system downtime. If one path is diagnosed as unavailable, the Supervisor triggers the disengagement procedure onto the other path. It also initiates the degradation mode when parts of the Cruising Chauffeur system are faulty or not available any longer. The principle interaction between Observer and Supervisor is shown in **Fig. 5**.

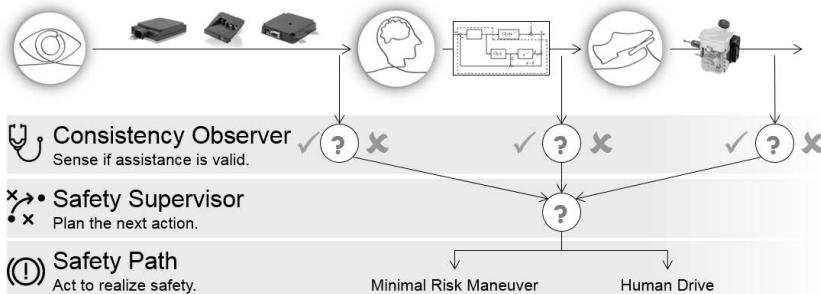


Fig. 5: The Consistency Observer serves as an additional element of the Supervisor's decision making

4.3 The degradation concept

From a practical point of view, the fallback path is a virtual "2nd "driver", capable of performing one particular maneuver (the MRM) to bring the car to a safe state. However not every request for a MRM results in a disengagement of the main path.

For instance, in a situation where the driver did not take over upon request, but the full system capability is still available, an MRM can mean continuing to drive on the main roadway for a few more minutes until an optimal traffic situation and stopping zone (e.g. shoulder, lay-by) has been reached, to bring the vehicle to a safe stop.

On the other hand in case of severe failures (e.g. multiple main AD system E/E failures) the MRM would be a much more urgent maneuver, safely executed by the backup path.

4.4 Rescue Mode, Event Data Recording and eCall

If an MRM needs to be carried out, this will mean that there is also an increased risk of a crash because the normal driving mode (AD or manual) has been abandoned. It is therefore important that the SDCU which harbors the fallback path also begins to prepare for a potential crash. Allowing for the potential reactions of other road users, the rescue mode cascade is activated during the MRM. This includes passive safety measures such as activating the belt tensioners, bringing the back-rest to an upright position, rolling up the window(s), closing the roof, and pre-conditioning or activating the airbags in the case of an impact, potentially even before t_0 .

Assuming that any MRM is automatically classified as a safety-related event, this type of maneuver will also trigger the Event Data Recorder for Automated Driving (EDR/AD) [1]. The primary purpose of the EDR/AD is to establish the factual operating circumstances in the case of an accident and/or a significant safety-related event. The information generated will provide evidence of the role of the vehicle systems, including AD mode on/off (i.e. roles and responsibilities, AD health state) and of the driver of the vehicle at the time of the relevant event. There are many reasons for requesting such information. Vehicle manufacturers, drivers, insurance companies, and the judicial authorities all have specific needs for objective data.

In the case of an MRM, the driver will need support, because the vehicle is potentially stationary in a lane on a multi-lane highway with traffic flowing around it. Even if the vehicle is parked on the shoulder, safety dictates that it needs to be removed from there as soon as possible. So, it is not only a crash situation, in which the eCall needs to be activated, to give the driver easy access to help and support.

5. Prospect

A fallback path is indispensable for highly automated driving. The fallback path must be robust, and it must be able to take over the driving task without delay, if a fault or uncertainty occurs on the main path which prevents critical functionality, e.g. an MRM is to be carried out by the main path. New elements such as the Consistency Observer can help to increase the total AD system performance and level of safety.

In the future, the level of automation will further increase to the point where no driver is in the vehicle any longer and no control elements (such as steering wheel or brake pedal) are available either. Fully automated vehicles of the new “people mover” or “robo-taxi” class will pose additional challenges, as there will be no more human driver. This class of vehicle therefore will need a modified fallback path, tailored to the boundary conditions of driverless automation. As the amount of information about the vehicle environment will increase over the coming

years, fallback concepts for people movers will benefit from the development of the Fail Operational Layer for Level 4 AD vehicles. However, they may also require totally new system components. One example could be found in a bird's-eye view which could be provided through the cloud in a situation where in-vehicle sensors, for instance, might fail. Depending on the severity of the event or fault, a degradation concept could be helpful to perform a graduated MRM, which could be anything between an immediate complete stop and a graduated MRM (cf. section 4.3). In any case, driverless automation will require further elements of a Fail Operational Layer.

- [1] Forster, A., Kuhrt, C., Peters, B.: **Event Data Recorder (EDR) for Automated Driving.** Proceedings of the 25. Annual Congress of the EVU (Europäische Vereinigung für Unfallforschung und Unfallanalyse, European Association for Accident Research), Bratislava, 2016

Analyse von Fahrerbewegungen unter dem Einfluss von Automatisierungsstufen und einer Pre-Crash Maßnahme

F. Krauns, Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay, Dr.-Ing. R. Henze,
Institut f. Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig;
K. Kietlinski, TASS International GmbH, Wiesbaden;
Dr. M. Tijssens, TASS International B.V., Niederlande

Kurzfassung

Die zunehmende Automatisierung von Fahrzeugen macht die Betrachtung der mittelbaren Auswirkungen aktiver Sicherheitsfunktionen auf den passiven Schutz der Fahrzeuginsassen und die Konditionssicherheit notwendig. Durch automatische Notbremsungen können z.B. out-of-position Situationen bezogen auf den Airbag entstehen. Zur simulativen Untersuchung der Insassenbewegung werden Human Models entwickelt, die die menschliche Kinematik in Abhängigkeit von Rückhaltesystemen und Fahrdynamik beschreiben. Aufbauend auf dieser Problemstellung wird eine Testmethode zur Messung der Ober- und Unterkörperbewegung eines Fahrers in einem PKW entwickelt, wobei der Fahrer im Zusammenhang mit verschiedenen Automatisierungsstufen unterschiedliche Körperhaltungen annehmen kann. Im Rahmen einer Probandenstudie wurden Bremsversuche durchgeführt, um Daten zur Validierung der beschriebenen Simulationsmodelle zu erhalten und den Einfluss eines reversiblen Gurtstraffers und verschiedener Automatisierungsstufen auf die Insassenkinematik zu analysieren.

Abstract

The increasing automation of vehicles makes it necessary to consider indirect effects of active safety functions on passive safety of the occupants. Autonomous emergency brakes, for example, could cause out-of-position situations regarding the airbag deployment. For the simulative investigation of the occupant motion, human models are developed which describe the human kinematics depending on restraint systems and vehicle dynamics. Based on this task, a test method for measuring the upper and lower body movement of a driver in a passenger car is developed in this paper, whereby the driver position can vary depending on the automation level. A study with deceleration maneuvers was conducted to determine validation data for the described simulation models and to analyze the influence of a reversible belt pretensioner and different automation levels on the occupant kinematics.

1. Einleitung

Fahrerassistenzsysteme und Automatisierungsfunktionen beeinflussen oder übernehmen bereits heute in gewissen Situationen die Längs- und Querführung der Fahrzeuge, um Komfort- und Sicherheitsziele zu erreichen, und es ist zu erwarten, dass der Anteil der elektronisch geregelten Fahrzeugführung in der Zukunft weiterhin steigen wird. Insbesondere Funktionen, die Unfälle vermeiden oder deren Folgen vermindern sollen, nehmen direkt Einfluss auf die Fahrzeugsicherheit, in dem sie in kritischen Situationen unmittelbar vor einem potenziellen Unfall verzögern oder lenken.

Es sollte dabei aber sichergestellt werden, dass eine automatisiert durchgeführte Fahrzeugsteuerung möglichst nicht zu unerwünschten Nebenwirkungen führt oder dass potenzielle Gefahren zumindest erkannt und durch Gegenmaßnahmen vermieden werden. Als Beispiel könnte durch eine automatische Notbremsauslösung, die der Fahrer aufgrund von Unaufmerksamkeit nicht antizipiert hat, bezogen auf den Airbag eine out-of-position Situation entstehen. Eine starke Vorverlagerung des Oberkörpers und des Kopfes vor der Kollision kann hierbei die Wirksamkeit der Rückhaltesysteme einschränken oder sogar zu zusätzlichen Verletzungen durch die Explosion des Airbags führen.

Es ist zu erwarten, dass mithilfe adaptiver Rückhaltesysteme in der Pre-Crash Phase, wie beispielsweise einem elektrischen reversiblen Gurtstraffer, bereits vor Beginn des Notmanövers eine bessere Anbindung des Insassen und somit eine Vermeidung der Vorverlagerung erreicht werden kann.

Um derartige Effekte zu untersuchen, werden Entwicklungswerkzeuge benötigt, die eine Abschätzung und Bewertung der Fahrzeuginsassenbewegung unter den gegebenen Rahmenbedingungen ermöglichen. Es werden daher Toolketten mit integrierten Human Models, wie von TASS International in [1] vorgestellt, entwickelt, die die Kinematik des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Fahrzeugdynamik und den Rückhaltesystemen simulieren können.

Das Institut für Fahrzeugtechnik (IfF) der Technischen Universität Braunschweig und TASS International haben in einem gemeinsamen Projekt eine Testmethodik zur Messung der Bewegung von Kopf, Ober- und Unterkörper sowie Extremitäten eines Fahrers während der Fahrt in einem Realfahrzeug weiterentwickelt und auf eine Probandenstudie angewendet. Mit den gewonnenen 3D-Bewegungsdaten kann in Abhängigkeit der Geometrie der Rückhaltesysteme und der Fahrzeugdynamik eine Parametrierung und Validierung von Human Models erfolgen. Die Neuerung gegenüber ähnlichen Untersuchungen in der Vergangenheit, z.B. [2] und [3], ist, dass die Kinematik des Fahrers und nicht des Beifahrers

während der Fahrt in verschiedenen relevanten Körperhaltungen gemessen wird. Diese Körperhaltungen zeichnen sich durch das zu erwartende Fahrerverhalten bei unterschiedlichen Automatisierungsstufen des Fahrzeugs aus (vgl. „levels of automation“ in [4]). Zudem wird reversibel und leicht zu montierende Messtechnik in einem Fahrzeug, welches sich hinsichtlich relevanter Einflussparameter in Serienzustand befindet, verwendet. Es erfolgt eine Erfassung der Hüft- und Armbewegung neben der des Oberkörpers und es wird eine bedarfsgerechte Ansteuerung einer Pre-Crash Maßnahme in Form eines reversiblen Gurtstraffers eingesetzt.

2. Messung von Fahrer- und Fahrzeugkinematik

In der beschriebenen Probandenstudie wurde die Insassenbewegung in Voll- und Teilverzögerungsmanövern für Körperhaltungen, die das Fahrerverhalten bei verschiedenen Automatisierungsstufen repräsentieren sollen, gemessen. Die hochfrequente Erfassung der Position, Translation und Rotation einzelner Komponenten des Körpers erfolgte mit einem Stereokamerasystem, welches zum fahrzeugfesten Koordinatensystem referenziert und mit der Fahrzeugmesstechnik synchronisiert wurde. Die Automatisierungsfunktionen und die Pre-Crash-Maßnahme wurden dabei mittels Rapid Control Prototyping auf einem Versuchsträger des IfF dargestellt.

Tabelle 1: Test-Parameter

Soll-Verzögerung	revers. Gurtstraffer	Körperhaltung	
-4 m/s ²	Inaktiv	Manuell (Fuß am Pedal, Hände am Lenkrad) entspannt	
		Manuell, Muskulatur angespannt	
-10 m/s ²	Aktiv mit Maximalkraft (~200N)	Fahrerassistenz (eine Hand am Lenkrad ohne zu lenken), entspannt	
		Automatisiert (Hände z.B. auf dem Oberschenkel), entspannt	

Als Fahrmanöver wurde eine Bremsung aus 50 km/h in den Stillstand mit zwei Sollverzögerungen, die einer Notbremsung und einer starken Komfortbremsung entsprechen (z.B. Maximalverzögerung eines ACC-Systems), gewählt. Der Katalog von Test-Parametern in Tabelle 1 sieht zudem die Aktivierung (maximale Kraft während der gesamten Verzögerung) oder Nichtaktivierung des reversiblen Gurtstraffers und eine Variation der Körperhaltung bzw. –spannung der Probanden vor. Aus der Kombination von allen drei Parametern ergibt sich eine Gesamtanzahl von 16 Fahrmanövern, die für jeden Probanden jeweils mit drei gültigen Wiederholungen durchgeführt wurde.



Bild 1: Bewegungserfassung am Probanden

Während der Fahrer beim manuellen Fahren (SAE Level 0) auf das Verkehrsgeschehen fokussiert ist und normalerweise mit beiden Händen am Lenkrad fährt und somit eine gewisse Abstützung gegen auftretende Beschleunigungen gegeben ist, kann es bereits beim assistierten Fahren (Level 1) der Fall sein, dass die Querführung primär von einer Fahrzeugfunktion übernommen wird und der Fahrer nur noch eine Hand am Lenkrad hat, um die Deaktivierung des Assistenzsystems durch eine „hands-off“-Erkennung zu umgehen. Die dritte Variante (Level 2 und höher) stellt automatisiertes Fahren dar, wobei der Fahrer seine Hände nicht mehr am Lenkrad und seine Füße nicht mehr an den Pedalen hält. Im vorliegenden Versuch wird zur Vergleichbarkeit trotzdem eine normale Sitzposition und gerade Ausrichtung des Körpers nach vorne mit den Händen im Schoss angenommen und

auf die Abbildung von Nebentätigkeiten verzichtet. Mittels Versuchsanweisungen wurden diese drei Haltungsvarianten untersucht, wobei beim manuellen Fahren zusätzlich zum einen eine normale, entspannte Körperhaltung und zum anderen eine angespannte Haltung, bei der sich der Fahrer während der Verzögerung aktiv am Lenkrad abstützt, angefordert wurde. Die Messungen wurden mit 6 Probanden durchgeführt, die hinsichtlich ihrer Körpergröße und ihres Gewichts jeweils einen 50% Mann repräsentieren. Für die Auswahl wurde auf Basis des Hybrid III Dummys und statistischer Daten ein zulässiger Größen- und Gewichtsbereich festgelegt.

Die optische Erfassung der Fahrerkinematik im Innenraum eines Fahrzeugs stellt eine große Herausforderung dar. Um kamerabasiert dreidimensionale Positionen verschiedener Körperteile mit einer hohen Genauigkeit zu erhalten, müssen diese aus mindestens zwei Perspektiven erkannt und mittels Epipolargeometrie getrackt werden können. Schlechte Lichtverhältnisse, geringe Abstände zum Fahrzeuginnenraum und Verdeckungen, z.B. durch das Lenkrad, erschweren die Erfassung. Für diese Aufgabe wurde im Rahmen einer Forschungskooperation mit der GOM GmbH ein modifiziertes 3D Bewegungsmesssystem ARAMIS (vgl. [5]) mit frei positionierten Kameras, die mit aktiver Ringbeleuchtung und Weitwinkelobjektiven ausgestattet sind, zur Verfügung gestellt und verwendet. Das normale Einsatzgebiet ist die statische und dynamische Bauteil- und Materialprüfung mit fester Kameraanordnung im Labor, vorliegend werden die Kameras mit Kugelköpfen an der Frontscheibe des Fahrzeugs befestigt. Das System ermöglicht die Erfassung von retroreflektierenden Klebemarkierungen, welche in zufälliger Anordnung auf starren Komponenten, sogenannten Adapters, angebracht werden, sodass diese in drei Translations- und drei Rotationsrichtungen relativ zu einem fahrzeugfesten Koordinatensystem erfasst werden können. Für die Messung im Fahrversuch werden die selbstgefertigten Adapter an enganliegender Kleidung der Probanden, an einer Brille und mittels Gurten direkt an Körperteilen befestigt, sodass jeweils ein Rückschluss von der Adapterbewegung auf die eigentliche Körperteilbewegung erfolgen kann (siehe Bild 1).

Da mit dieser Konfiguration je nach Anordnung entweder nur Kopf, Schultern und Brust oder Unterarme, Hüfte und Oberschenkel gleichzeitig gemessen werden können, wurde eine Hauptstudie zur Erfassung der Oberkörperbewegung mit einer Vielzahl an Versuchsvarianten durchgeführt und ergänzend ein kleinerer Ausschnitt des Versuchskatalogs (nur manuelle, entspannte Körperhaltung und kein Gurtstraffer) für die Bewegung des Unterkörpers vermessen.

Um ein globales Koordinatensystem für das 3D Messsystem im Fahrzeuginnenraum zu erhalten, wurden Tracking-Marker im Sichtbereich der Kamera angebracht und im Labor mit einer statischen Koordinatenmessung zu fahrzeugfesten Punkten referenziert.

Für die Versuche wurde das Versuchsfahrzeug TIAMO (Testing of Integrated Automation and MOnitoring systems) des IfF verwendet. Dabei handelt es sich um einen Volkswagen Golf 7 1.4 TSI DSG, der mit zusätzlicher Messtechnik, u.a. einer Inertial Measurement Unit Genesys ADMA Speed, und einem Rapid Control Prototyping-Framework auf Basis einer dSPACE MicroAutoBox II und CAN-Gateways zur Manipulation der Fahrzeugaktorik ausgestattet ist. Hiermit besteht die Möglichkeit eine Ablaufsteuerung sowohl für das Fahrmanöver als auch für die zeitverzögerte Pre-Crash Maßnahme und die Aktivierung der Messtechnik, wie in Bild 2 dargestellt, zu implementieren. Neben den Fahrzeubewegungsgrößen werden dabei der Fahrzeugbus sowie Gurtkraft und –auszug aufgezeichnet.

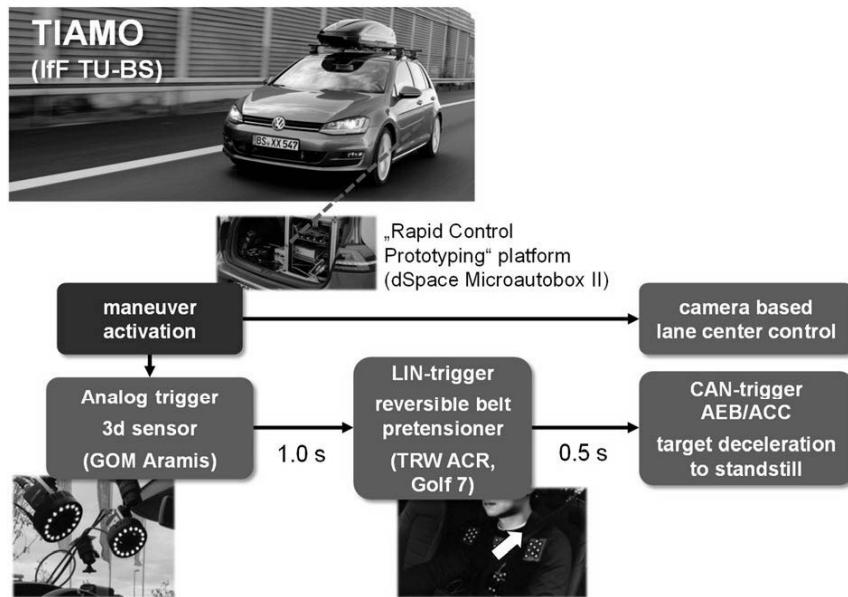


Bild 2: Messtechnikkonfiguration

Um im Rahmen der Darstellung unterschiedlicher Automatisierungsstufen das Fahren ohne Hände am Lenkrad zu realisieren, wird eine eigenentwickelte, kamerabasierte Spurmittlen Regelung eingesetzt. Im Fahrzeug wird das Verzögerungsmanöver durch den mitfahrenden Versuchsleiter zu einem für die Probanden zufällig gewählten Zeitpunkt aktiviert. Unmittelbar im Anschluss beginnt die Messung der Insassenposition mittels des 3D Sensors und je nach Versuch wird der Gurtstraffer 0,5 s vor dem Einsetzen der konstanten Bremsung bis in den Stillstand mit 4 m/s² bzw. 10 m/s² Verzögerung aktiviert und nach Stillstand wieder deaktiviert.

3. Einfluss von Automatisierung und reversibler Gurtstraffer auf die Fahrerbewegung

Durch die Untersuchungen werden Bewegungstrajektorien der zuvor dargestellten Adapter (siehe Bild 1) an den Ober- und Unterkomponenten des Körpers in drei translatorischen und drei rotatorischen Bewegungsrichtungen relativ zum Fahrzeugkoordinatensystem ermittelt. In Abhängigkeit der Versuchspараметer lassen sich gemittelte Bewegungsverläufe über der Zeit generieren und unter Berücksichtigung der gemessenen Fahrzeugverzögerungen sowie der statischen Sitz-, Gurt- und Probandenposition im Verhältnis zum Fahrzeuginnenraum zur Validierung der eingangs erwähnten Human Models verwenden. Durch die Berücksichtigung von zwei Lastfällen (Voll- und Teilverzögerung) kann ein Abgleich an zwei relevanten Stützstellen der simulierten Insassenbewegung durchgeführt werden.

Mittlere Vorverlagerungen bieten darüber hinaus die Möglichkeit Kennparameter, die die komplexe Bewegung zu einem gewissen Teil charakterisieren, zu berechnen. Damit lässt sich der Einfluss der Versuchsparameter, wie beispielsweise der Automatisierungsstufe auf die Insassenbewegung, objektiv vergleichen. Beispiele für Kennparameter sind:

- maximale Vorverlagerung („Plateau“)
- mittlerer Gradient der Vor- und Rückverlagerung
- maximale Rotation zwischen Komponenten (z.B. Kopf und Brust)

Die Auswertung der Versuche lässt darauf schließen, dass ein signifikanter Einfluss der Automatisierungsstufe und der Pre-Crash Maßnahme auf die Insassenbewegung besteht. In diesem Bericht liegt der Schwerpunkt zwar auf der Testmethodik, es werden im Folgenden aber ausschnittsweise Ergebnisse der Studie vorgestellt. Detaillierte Resultate werden in eine zukünftige Veröffentlichung unter Berücksichtigung der gesamten Entwicklungs-Toolkette einfließen.

Wie in Bild 3 sichtbar, zeigt sich im Mittel über die gesamten Versuche mit Vollverzögerung, dass die aktive Abstützung des Fahrers am Lenkrad durch eine angespannte Körperhaltung die Vorverlagerung des Oberkörpers in Fahrtrichtung deutlich reduzieren kann. Wenn die Verzögerung unerwartet bei entspannter, manueller Fahrhaltung einsetzt, vervierfacht sich der maximale Abstand. Außerdem lässt sich feststellen, dass die Verlagerung weiter ansteigt, wenn mit Fahrerassistenz oder automatisiert gefahren wird, auch wenn die Unterschiede nicht so groß wie zwischen der angespannten und entspannten manuellen Haltung sind.

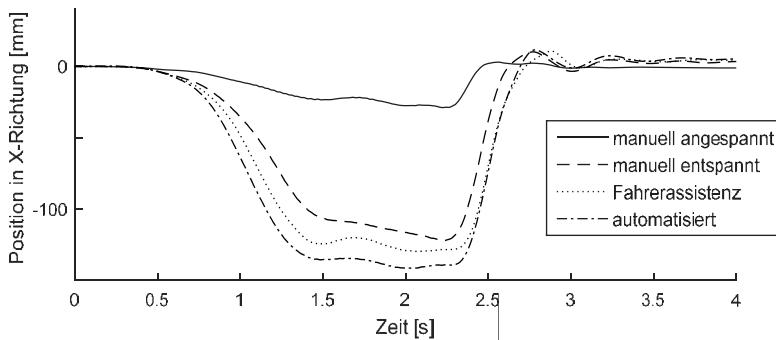


Bild 3: Einfluss der Körperhaltung/Automatisierungsstufe auf die durchschnittliche Vorverlagerung der Brust bei -10 m/s^2 Verzögerung

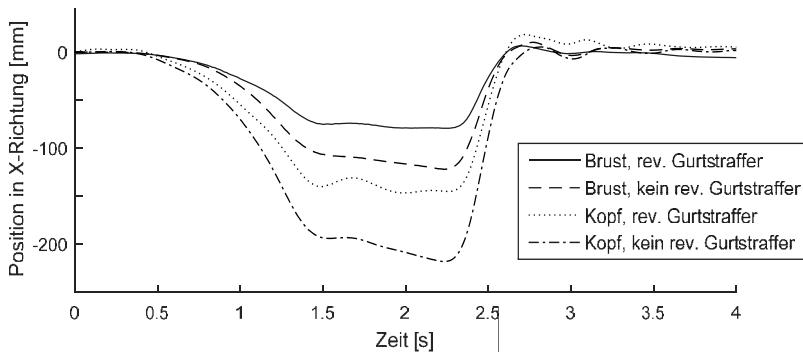


Bild 4: Einfluss des reversiblen Gurtstraffers auf die durchschnittliche Vorverlagerung der Brust und des Kopfes bei -10 m/s^2 Verzögerung

Der reversible Gurtstraffer als Pre-Crash Maßnahme bewirkt in den Versuchen, wie in Bild 4 erkennbar, dass bei rechtzeitiger und andauernder Aktivierung eine deutlich verbesserte Anbindung des Insassen in der aktiven Verzögerungsphase erreicht werden kann. Im Vergleich zwischen Brust- und Kopfkomponente zeigt sich, dass durch die relativ kleine Verbesserung der Anbindung der Brust eine noch größere Begrenzung der Bewegung des Kopfes ermöglicht wird, da hier der Oberkörper vermutlich eine Art Hebelwirkung auf den Kopf ausüben kann.

Neben dem Bezug zu aktiven Sicherheitssystemen zeigen die Daten aus den Versuchen, in denen lediglich eine starke Komfortverzögerung von 4 m/s^2 angesteuert wurde, auch Einflüsse der Fahrdynamik komfortbasierter Assistenz- und Automatisierungssysteme auf den Insassen. Die Vorverlagerungen und Nickbewegungen während der manuellen, entspannten Fahrt weisen eine große Varianz zwischen den einzelnen Probanden auf. Es wird vermutet, dass es in diesem Bereich einen Einfluss verschiedener Körpergrundspannungen bei den Probanden gibt, da bei der angespannten Haltung bei allen Probanden nur eine sehr geringe Bewegung zu beobachten ist. Für die automatisierte Fahrt ist eine ähnliche Streuung wie bei der manuellen Fahrt zu beobachten, jedoch erhöht sich analog zu den Versuchen mit Vollverzögerung die Vorverlagerung deutlich und es kann mit einem reversiblen Gurtstraffer eine Reduzierung der Vorverlagerung auf ein Niveau unterhalb der entspannten Normalfahrt ohne Gurtstraffer erreicht werden.

Diese Erkenntnisse können Hinweise darauf geben, dass sich das Komfort- und Sicherheitsempfinden des Fahrers und die Konditionssicherheit beim automatisierten Fahren in Zukunft auch in weniger kritischen Szenarien reduzieren könnten, wenn der Fahrer keine klassische Körperhaltung wie beim manuellen Fahren mehr einnimmt und zum „Beifahrer mit Lenkrad“ wird. Den negativen Auswirkungen könnte mit defensiveren Funktionsauslegungen hinsichtlich erreichter Ruck- und Verzögerungswerte, angepassten Fahrzeugkonzepten und adaptiven Rückhaltesysteme entgegengewirkt werden.

4. Fazit

In einem gemeinsamen Projekt des Instituts für Fahrzeugtechnik der TU Braunschweig mit TASS International konnte eine geeignete Testmethodik zur optischen Messung von Insassenbewegungen in realen Versuchsträgern entwickelt und zum Einsatz gebracht werden. Probandenversuche haben eine grundlegende Datenbasis zum Abgleich und zur Validierung von Human Models in einer Entwicklungstoolkette für Systeme der integralen Sicherheit geliefert. Der Fokus lag auf der Untersuchung der Folgen eines definierten Eingriffs eines Notbremsassistenten und einer Fahrerassistenz bzw. Automatisierungs-

funktion. Im Rahmen der Versuche konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass für beide Lastfälle sowohl der Einsatz eines reversiblen Gurtstraffers als auch Variationen in der Körperhaltung der Fahrer, die sich durch die Automatisierung ergeben können, das Bewegungsverhalten beeinflussen.

Literaturangaben

- [1] Tijssens, M., Bosma, F. u. Kietlinski, K.: A Methodology and Tool Chain to Develop Integrated Safety Systems. 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) (No.15-0329), Göteborg 2015
- [2] Kirschbichler, S., Sinz, W., Prüggler, A., Huber, P., Steidl, T. u. Steiner, K.: Validation data for reactive human body models in the pre-collision phase. crash.tech, München 2012
- [3] Olders, S., Krauns, F., Weinkopf, A. u. Henze, R.: Probandenstudie zur Veränderung der Insassenposition beim Eingriff von aktiven Sicherheitssystemen – Einfluss des reversiblen Gurtstraffers und unterschiedlicher Sitzvarianten. 10. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit, Berlin 2015
- [4] SAE International: Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. 2014
- [5] ARAMIS, GOM GmbH, Braunschweig <http://www.gom.com/de/messsysteme/aramis.html> (11.10.2017)

Szenarien zur Bewertung von aktiven Sicherheitssystemen basierend auf In-Depth-Unfalldaten

Harald Feifel, Michael Wagner, Continental Teves, Frankfurt

Zusammenfassung

Unfalltypen eignen sich für die Klassifizierung der Verkehrsunfälle in der Pre-Crash Phase. Sie werden durch systematisches Clustern in abstrakte Unfallszenarien zusammengefasst, die als Grundlage für die Wirkfeldbetrachtung von aktiven Sicherheitssystemen (ADAS) dienen. Daraus entstehen Anforderungen an die Sensorik die Algorithmik und Aktuatorik der ADAS. Außerdem kommen Unfallszenarien bei der simulativen prospektiven Effektivitätsbewertung der betrachteten Sicherheitssysteme zum Einsatz.

Abstract

Accident types classify the conflict situation of traffic accidents in detail. Clustering the accident types into more abstract accident scenarios allows for a systematic analysis of the mode of operation of active safety systems (ADAS). Safety systems that target particular accident scenarios are tailored towards specific requirements of the sensor, the algorithm and the actuation. Additionally accidents scenarios are stimuli for prospective effectiveness evaluations of active safety systems by using simulation.

1. Hintergrund

Unfalldaten sind eine wesentliche Voraussetzung für die Bewertung des Nutzens von Sicherheitssystemen. Während der Wirkfeldbetrachtung wird zunächst analysiert, welche Situationen generell durch das System adressiert werden. Die Effektivitätsbewertung untersucht im Weiteren die Wirksamkeit des Sicherheitssystems innerhalb ihres Wirkfeldes. Für beide Entwicklungsschritte ist eine Klassifikation der Unfälle anhand von gemeinsamen Merkmalen, sowohl vor als auch während der Kollision notwendig. Dazu werden beispielsweise die Trajektorien der Unfallbeteiligten und die Kollisionsgeometrien untersucht und die Unfälle entsprechend eingeordnet [1].

Die Klassifikation der Unfälle erfolgt anhand von Szenarien, die sich wie folgt gegenüber den Begriffen Szene und Situation abgrenzen. Eine Szene beschreibt eine Momentaufnahme eines Umfelds und umfasst alle Akteure und deren räumlichen und dynamischen Eigenschaften. Darüber hinaus beinhaltet eine Situation die Ziele und Werte der Akteure. Ein Szenario um-

fasst, neben den Eigenschaften einer Szene und einer Situation, zusätzlich die zeitliche Entwicklung durch Aktionen und Ereignissen [2]. Unfallszenarien beschreiben den Unfallhergang aufgrund der Intentionen und Bewegungsmuster der Unfallbeteiligten innerhalb der Unfallszene und eignen sich daher zur Beschreibung des Wirkbereichs eines Sicherheitssystems. Entscheidend für die Definition der Unfallszenarien ist die Einordnung in primäre, sekundäre und tertiäre Sicherheit. Aktive Sicherheitssysteme (ADAS) adressieren die primäre Sicherheit durch eine Fahrerwarnung oder einen aktiven Eingriff in die Fahrdynamik. Dieser basiert auf der Einschätzung der Kritikalität aufgrund der Ego-Kinematik und Objektinformationen aus der Umfeldsensorik. Die Einordnung der Unfälle in Unfallszenarien erfolgt dazu vorteilhaft mittels gemeinsamer sensorrelevanter Eigenschaften in der Pre-Crash-Phase. Dazu gehören vor allem die Positionen und Bewegungsrichtungen der Unfallbeteiligten.

Unfalltypen beschreiben Konfliktsituationen, die zu Verkehrsunfällen führen, auf der Basis von Piktogrammen. Sie stellen den ersten Konflikt zwischen zwei Verkehrsteilnehmern dar, unabhängig davon, ob in der Folge noch weitere Beteiligte involviert werden. Unfalltypen werden verwendet, um Unfälle zu klassifizieren und systematisch einzuordnen. Sie zeichnen sich durch eine teilweise sehr feine Differenzierung aus. Außerdem ordnen sie die Unfälle anhand einer Beschreibung des jeweiligen Unfallauslösers ein [3]. Aufgrund dieses hohen Detaillierungsgrades sind sie in der Regel zu unhandlich, um das Unfallgeschehen aus Systemsicht kompakt darzustellen.

Es stellt sich die Frage in wieweit Unfalltypen für die Wirkfeldbetrachtung und die Wirksamkeitsanalyse verwendet werden können. Dazu müssen sie unter Berücksichtigung von Charakteristiken und Restriktionen möglicher aktiver Sicherheitssysteme betrachtet werden.

Im Folgenden wird eine Methode aufgezeigt, die Unfalltypen in Unfallszenarien zusammenzufassen. Außerdem wird ein Szenarienkatalog auf der Grundlage von CATS (Cyclist-AEB Testing System) vorgeschlagen [4]. Der Fokus soll auf der Anwendbarkeit für die Bewertung aktiver Sicherheitssysteme liegen. Als Datenbasis dient die In-Depth Datenbank GIDAS [5]. Das Vorgehen wird beispielhaft für Kollisionen von PKW mit motorisierten Zweirädern (MZR) gezeigt.

2. Ziel

Die Methode soll es erlauben, das Unfallgeschehen unter Verwendung der jeweils angegebenen Unfalltypen in einfacher und systematischer Weise qualitativ und quantitativ zu erfassen. Dies soll unabhängig der jeweils untersuchten Fahrzeug- und Beteiligtenarten möglich sein. Ziel ist eine einheitliche Darstellung der Schwerpunkte des Unfallgeschehens und die Identifikation noch nicht adressierter Szenarien (White Spots).

Durch Clustern der drei-stelligen Unfalltypen sollen Unfallszenarien abgeleitet werden. Diese Unfallszenarien bilden die Basis für eine Wirkfeldbeschreibung aktiver Sicherheitssysteme. Durch Detailbetrachtungen können wichtige Erkenntnisse zur Auslegung der Sensorik, der Algorithmik sowie der Aktuatorik der ADAS gewonnen werden. Die Unfallszenarien sind außerdem Grundlage für eine prospektive Effektivitätsbewertung mittels Simulation gemäß PEARS (Prospective Effectiveness Assessment for Road Safety) [9].

Idealerweise sollen die Unfallszenarien in gleicher Weise auf eine Vielzahl weltweit verfügbarer In-Depth Unfalldatenbanken angewendet werden. Dadurch lassen sich vergleichbare Analysen für verschiedene Regionen generieren. Außerdem kommen wiederverwendbare Werkzeuge zur Datenauswertung zum Einsatz.

Die Verwendung einer standardisierten Cluster-Methode zur Erzeugung der Unfallszenarien sowie eines einheitlichen Szenarienkatalogs erleichtert nicht zuletzt die Vergleichbarkeit von Unfallforschungsanalysen aus verschiedenen Quellen.

3. Methodik

Aktive Sicherheitssysteme verhindern Unfälle durch Eingriff in die Längs- oder Querdynamik aufgrund von Sensorinformationen in der Pre-Crash-Phase. Die Klassifikation der Verkehrsunfälle durch die den Konflikt beschreibenden Unfalltypen eignet sich daher besonders für die Wirkfelddefinition von ADAS.

Die GIDAS Datenbank beschreibt für jeden erfassten Unfall den drei-stelligen Unfalltyp als Parameter UTYP und klassifiziert die beiden an der ursächlichen Konfliktsituation Beteiligten als UTYP A und UTYP B. Im Allgemeinen wird der Auslöser des Unfalls als Beteiligter UTYP A festgelegt. Die Ausnahme bilden Unfälle mit Fußgängern die unabhängig der Schuldfrage stets als UTYP B codiert werden. Die Unfälle werden aufgrund dieser Parameter zu Clustern gruppiert aus denen sich die Unfallszenarien ableiten. Bild 01 beschreibt die dazu nötigen Schritte.

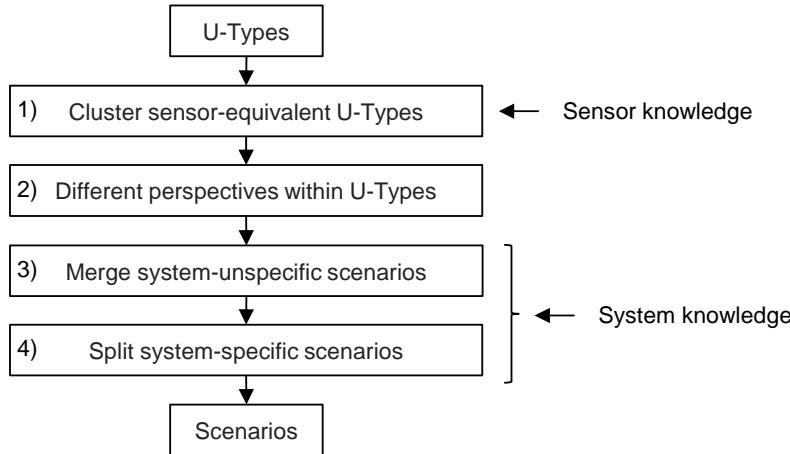


Bild 1: Erzeugung der Unfallszenarien aus U-Typen

Im ersten Schritt werden sensoräquivalente Unfalltypen zusammengefasst. Dies sind alle Unfalltypen, die für die Umfeldsensorik des Assistenzsystems nicht unterscheidbar sind und daher identische Situationen darstellen.

Beispielsweise beschreibt das Szenario L1 Auffahrunfälle. Bei Auffahrunfällen ist es für das auffahrende Fahrzeug nicht entscheidend auf welcher Fahrspur die Situation auftritt und ob das Vorderfahrzeug bremst, steht oder abbiegt. All diese Unfalltypen stellen aus Sicht des Beteiligten UTYP A das Szenario L1 dar, siehe Bild 02.

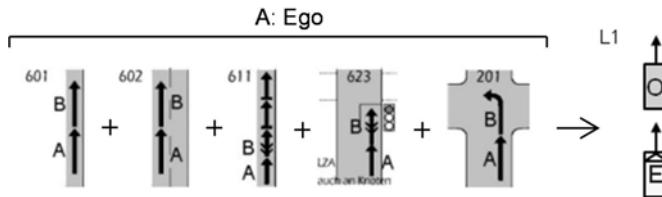


Bild 2: Zusammenfassen äquivalenter U-Typen zum Szenario L1

Der zweite Schritt kombiniert die Perspektiven beider Unfallbeteiligten. Jeder Unfalltyp stellt aus Sicht der beiden Beteiligten UTYP A und UTYP B eine andere Situation dar und kann daher in zwei verschiedenen Szenarien eingruppiert werden.

Bild 03 zeigt wie sich das Szenario C1 unter Berücksichtigung beider Beteiligten aus Unfalltypen unterschiedlicher Art zusammensetzt. Wesentlich ist, dass es sich aus Sicht des Ego-Fahrzeugs um eine Kreuzen-Situation von rechts handelt.

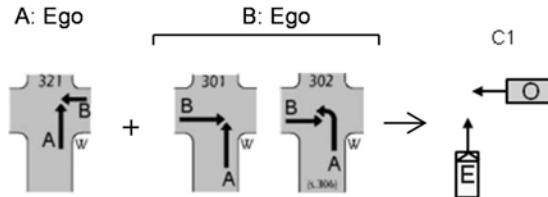


Bild 3: Perspektivenwechsel beim Erzeugen des Szenarios C1

Schritt drei befasst sich mit der Kombination von System-unspezifischen Szenarien, d.h. Szenarien, die das Ziel-Sicherheitssystem nicht unterscheiden muss. Damit reduziert sich die Anzahl der Szenarien auf ein notwendiges Maß. Insbesondere relativ seltene Szenarien sollten in diesem Schritt zusammengefasst werden.

Für ein Rückfahrrassenzsystem ist es bei kleinen Geschwindigkeiten irrelevant, von welcher Seite sich ein Kollisionsobjekt nähert. Das Szenario B kann deshalb Objekte aus allen Richtungen einschließen, siehe Bild 04.

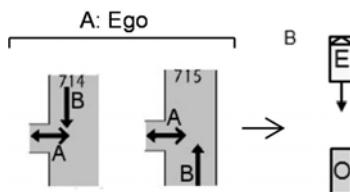


Bild 4: System-unspezifisches Szenario B

Im Gegensatz dazu werden im vierten Schritt Szenarien getrennt, weil die enthaltenen Unfalltypen für das betrachtete Sicherheitssystem nicht gleichbedeutend sind. Diese System-spezifischen Situationen finden sich in verschiedenen Unfallszenarien wieder und werden von unterschiedlichen ADAS adressiert. Auch hierbei können besonders häufige Szenarien bevorzugt aufgeteilt werden.

Entgegenkommens-Szenarien sind beispielsweise aus Sensorsicht äquivalent und deshalb zunächst in einem gemeinsamen Szenario abgebildet. Für die Auslegung eines aktiven Sicherheitssystems ist es entscheidend, ob das Kollisionsobjekt a-priori auf der eigenen Spur entgegenkommt oder das Ego-Fahrzeug die kritische Situation durch einen Spurwechsel provoziert hat. Aus Ego-Perspektive eignen sich sehr verschiedenen Ansätze, die Kollision zu verhindern der abzumildern. Das Szenario On1 kann durch AEB-Oncoming (Autonomous Emergency Braking) adressiert werden, während Szenario On2 durch LKA (Lane Keep Assist) verhindert wird. Die Zusammensetzung der Szenarien On1 und On2 aus Perspektive von UTYP A und UTYP B ist in Bild 05 ersichtlich.

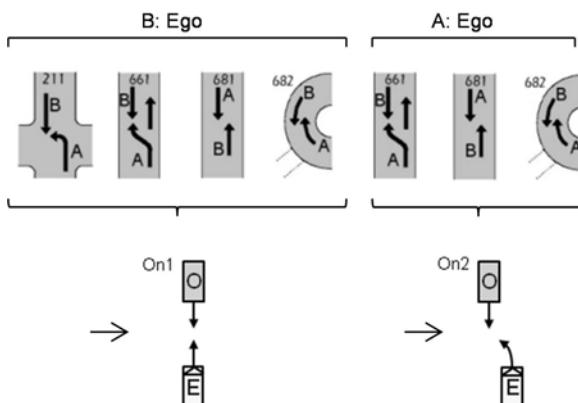


Bild 5: System-spezifische Szenarien On1 und On2

Voraussetzung für die Methodik ist eine eindeutige Identifikation der beiden in der ersten Konfliktsituation Beteiligten. Dies kann durch die Klassifikation der Beteiligten UTYA und UTYPB nach Auslöser und Nicht-Auslöser stattfinden. Die Einordnung der beiden Beteiligten bedingt jedoch keiner Systematik bzgl. der Verursacher. Die geläufige Definition von UTYP A als Auslöser und UTYPB als Nichtauslöser ermöglicht jedoch zusätzlich eine einfache Detailanalyse nach Verursacher.

Die Unfallszenarien definieren sich durch Positions- und Bewegungszustände der beiden Beteiligten. In der Regel kann außerdem für das Ego-Fahrzeug nicht jedoch für das Objekt-Fahrzeug die Bewegungsintention, z.B. Richtungsänderung, erkannt werden. Aus diesem Grund, und um die Anzahl der Unfallszenarien überschaubar zu halten, erhält nur das Ego-Fahrzeug

eine Intention, die mit einem gebogenen Pfeil dargestellt wird. Tabelle 01 zeigt welche Bewegungszustände für Ego und Objekt möglich sind.

Tabelle 1: Ego- und Objekteigenschaften innerhalb der Szenarien

Property	Ego	Object
Position	yes	yes
Heading	yes	yes
Movement state	yes	yes
Movement direction	yes	yes
Movement intention	yes	no

Eine Reihe von In-Depth-Datenbanken eignen sich für die Generierung der Unfallszenarien. Verwendete Datenanalysemethoden und Werkzeuge sollten sich nach Meinung der Autoren mit wenig Aufwand an entsprechende Datenbanken anpassen lassen. Tabelle 02 zeigt mögliche Unfalldatenbanken und die verwendeten Merkmale zur Bestimmung der Unfallbeteiligten [5-8].

Tabelle 2: Datenbanken

Database	Region	Attributes
GIDAS	Germany	UTYP, UTYP A, UTYP B
CIDAS	China	UTYP, UTYP A, UTYP B
RASSI	India	PRECREV, PRECRA, PRECRB
iGLAD	worldwide	ACCTYPE, ACCTYPE A, ACCTYPE B

Die Methodik klassifiziert Unfälle mithilfe der Unfallszenarien aus Sicht beider Beteiligter. Da sich jeder Unfall je nach Perspektive in zwei verschiedenen Szenarien wiederfindet, generiert dieser Schritt aus einer Anzahl m betrachteter Unfälle eine Anzahl $n=2^m$ von Szenarien. Die Betrachtung des Unfallgeschehens auf Szenarienebene bietet eine ganzheitliche Sicht, die für eine Wirkfeldbetrachtung notwendig ist. Bild 06 zeigt die verschiedenen Ebenen, auf denen sich das Unfallgeschehen analysieren lässt.

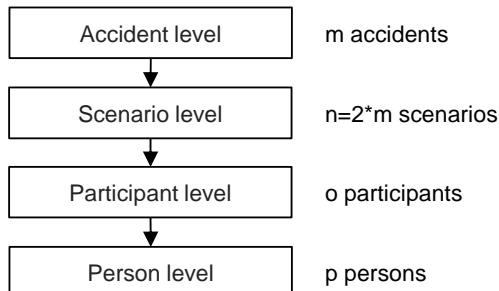


Bild 6: Verschiedene Ebenen der Unfalldatenanalyse

System- und Funktionswissen ist essentiell für die Erzeugung des Szenarienkatalogs. Im ersten Schritt der beschriebenen Methodik werden sensoräquivalente Unfalltypen zusammengefasst. Schritt drei und vier verbindet systemspezifische bzw. trennt unspezifische Szenarien. Ohne diese Informationen bzgl. der Funktionsweisen der verwendeten Umfeldsensorik und der ADAS-Systeme, können die Unfallszenarien nicht sinnvoll definiert werden. Umgekehrt unterliegen die Unfallszenarien bedarfsgerechten Anpassungen aufgrund neuer technologischer Entwicklungen der Sensorik, Algorithmik und Aktuatorik der aktiven Sicherheitssysteme. Die Analyse der Unfälle innerhalb eines Szenarios ermöglicht es, wie einleitend beschrieben, Anforderungen an die Erkennungsgüte der benötigten Sensorik, die Funktionsweise der Algorithmik sowie an die Aktuatorik des entsprechenden ADAS zu identifizieren. Dafür wird mithilfe der Unfallszenarien das Wirkfeld der Sicherheitssysteme untersucht und die Effektivität durch prospektive Simulation evaluiert. Bild 07 zeigt den gegenseitigen Zusammenhang zwischen der Definition der Unfallszenarien und der Ableitung von Anforderungen an das aktive Sicherheitssystem.

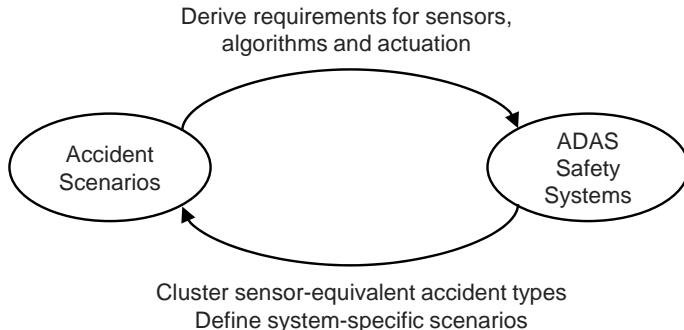
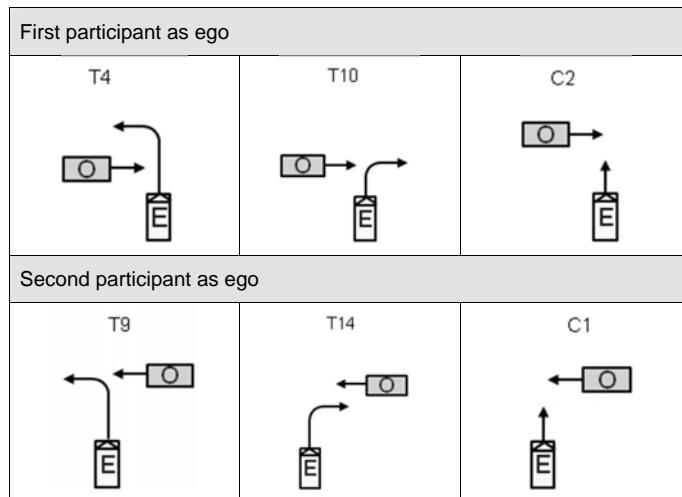


Bild 7: Wechselwirkung zwischen Systementwicklung und Unfallszenarien-Definition

Jeder Unfall kann aus Sicht des ersten oder des zweiten Beteiligten betrachtet und adressiert werden. Deshalb findet sich jeder Unfall in zwei reziproken Unfallszenarien aus Sicht des jeweiligen Beteiligten wieder. Auf Szenarienebene bietet sich daher die Analyse des Unfallgeschehens aus Sicht beider Beteiligten an. Beide Beteiligten werden dabei im Rahmen eines Beteiligtentausches sowohl in der Rolle des Ego-Fahrzeugs als auch des Objekt-Fahrzeugs in jeweils reziproken Unfallszenarien betrachtet. Die Relevanz eines Sicherheitssystems ergibt sich aus der Summe der Möglichkeiten in beiden reziproken Szenarien den entsprechenden Unfall zur adressieren. Beispielsweise können Unfälle zwischen zwei beteiligten PKW unter Berücksichtigung der jeweiligen Szenarien durch entsprechende Sicherheitssysteme in beiden PKW verhindert werden. Tabelle 03 zeigt beispielhaft Kreuzen-Szenarien für beide Beteiligte. Dieselben Kreuzen-von-links-Szenarien aus Sicht von Beteiligten 1 entsprechen den Kreuzen-von-rechts-Szenarien aus Sicht von Beteiligten 2. Ein ADAS System, das Kreuzungsunfälle verhindert, kann in beiden Szenarien aktiv werden. Man sieht in diesem Beispiel außerdem, dass für die Ego-Fahrzeuge im Vergleich zu den Objekten jeweils mehr Freiheitsgrade vorgesehen sind, um die Fahrintention zu verdeutlichen.

Tabelle 3: Reziproke Kreuzen-Szenarien



4. Fallbeispiel Unfälle zwischen PKW und MZR

Die Methodik wird anhand eines Fallbeispiels mit Unfällen zwischen PKW und motorisierten Zweirädern MZR demonstriert. Dabei wird sowohl das Auto als auch das MZR in der Rolle des Ego-Fahrzeugs dargestellt. Daraus lassen sich Anforderungen an die Entwicklung für aktive Sicherheitssysteme für PKW (Advanced Driver Assistant Systems - ADAS) bzw. für MZR (Advanced Rider Assistant System - ARAS) ableiten. Siehe die Relativpositionen aus Sicht des PKW sowie des MZR als Streudiagramme in den Bildern 09 ff.

Folgende Schritte werden durchgeführt und im Anhang 1 gezeigt:

- Quantitative Analyse der Unfallszenarien in der GIDAS Datenbank aus Sicht der Beteiligtenarten PKW und MZR (Tabellen 03 und 04),
- Zusammenfassen der analysierten Unfallszenarien in jeweils vier Bundles pro Beteiligtheitsrichtung,
- Betrachtung der Kreuzen-Szenarien durch Beteiligtentausch als Relativpositionen zur Zeit TTC=2,7s (Tabelle 05 sowie Bilder 09 und 10),
- Betrachtung der MZR-Auffahrtszenarien (Tabelle 06 sowie Bilder 11 und 12),
- Betrachtung der PKW-Auffahrtszenarien (Tabelle 07 sowie Bilder 13 und 14),
- Betrachtung der Entgegenkommen-Szenarien (Tabelle 08 sowie Bilder 15 und 16).

6. Diskussion

Die Methodik beschreibt eine systematische Vorgehensweise zur Analyse des Unfallgeschehens für eine bestimmte Beteiligtenkonfiguration. Aus Unfalltypen werden in mehreren Schritten Unfallszenarien erzeugt, die eine Beschreibung von Wirkfeldern von aktiven Sicherheitssystemen ermöglichen und außerdem als Eingangsvektoren für die simulative Effektivitätsbewertung der ADAS zum Einsatz kommen.

Idealerweise kommen für die Szenarien-basierten Unfalldatenanalyse automatische Datenanalyse-Werkzeuge zum Einsatz, die entsprechend auf regionale Besonderheiten verschiedener In-Depth Datenbanken angepasst werden.

Das Verfahren wurde anhand eines Fallbeispiels für Unfälle zwischen PKW und MZR demonstriert. Innerhalb von vier Szenarien-Bundles konnte das Unfallgeschehen aus Sicht beider Beteiligter als Grundlage der Entwicklung entsprechender ADAS bzw. ARAS Systeme dargestellt werden.

Folgende Vorteile der Methodik konnten demonstriert werden:

- Unfalldatenanalyse auf Basis einer kleinen Menge abstrakter Unfallszenarien,
- Szenarien unabhängig der analysierten Beteiligtenarten (keine Beteiligten-Bindung),
- Szenarien unabhängig der Unfallverursacher (keine Verursacher-Bindung),
- Systemspezifische Szenarien in Pre-Crash-Phase
- Analyse von aktive Sicherheitssystemen ADAS/ARAS,
- Szenarien als Grundlage für Wirkfeldbetrachtungen und Effektivitätsbewertungen,
- Vergleichbarkeit von Unfallanalysen und Systembewertungen,
- Anwendbarkeit auf weltweite Unfalldatenbanken,
- Fokus auf visuelle Sensorik.

Diese Einschränkungen müssen berücksichtigt werden:

- Beschränkung auf ursächliche Konfliktsituation, d.h. keine Analyse der Folgekollisionen,
- Nicht für passive Sicherheitssystem anwendbar,
- Anwendung für V2V erfordert Erweiterung der Szenarien.

Anhang 2 zeigt den vorgeschlagenen Szenarienkatalog und die Zusammensetzung der Unfallszenarien aus Unfalltypen.

5. Literaturangaben

- [1] Lindman M., et. al. Cyclists interacting with passenger cars; a study of real world crashes. IRCOBI 2015.
- [2] Ulbrich S., et. al. Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren. FAS 2015.
- [3] UDV. Unfalltypenkatalog. 2016.
- [4] Op den Camp O., et. al. Cyclist Target and Test Setup for Evaluation of Cyclist-Autonomous Emergency Braking. International Journal of Automotive Technology 2017.
- [5] German In-Depth Accident Study GIDAS codebook.
- [6] China In-Depth Accident Study CIDAS codebook.
- [7] Road Accident Sampling System India RASSI codebook.
- [8] Initiative for the Global Harmonisation of Accident Data iGLAD codebook.
- [9] Page Y., et. al. A comprehensive and harmonized method for assessing the effectiveness of advanced driver assistance systems by virtual simulation. ESV 2015.
- [10] Kuschefski A., et.al. Advanced Rider Assistance Systems for Powered Two-Wheelers (ARAS-PTW). ESV 2011.

Anhang 1: Fallbeispiel Unfälle zwischen PKW und MZR

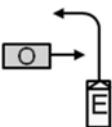
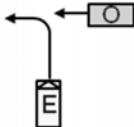
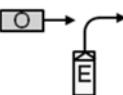
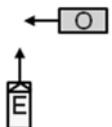
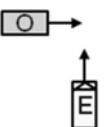
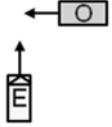
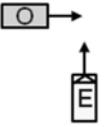
Tabelle 03: Kombinationen PKW / MZR, aus PKW-Sicht, GIDAS 2005-2017

Ego	Opponent	Scenario	Causer	Occurrence	Percentage	Bundle
Car	Motorcycle	T1	Car	18	1,0%	Rear
		T3	Car	246	13,8%	Oncoming
		T4	Motorcycle	1	0,1%	Crossing
		T4	Car	231	12,9%	Crossing
		T5	Car	209	11,6%	Rear
		T9	Car	53	2,9%	Crossing
		T10	Car	47	2,6%	Crossing
		T14	Car	8	0,5%	-
		C1	Motorcycle	20	1,1%	Crossing
		C1	Car	84	4,7%	Crossing
		C2	Motorcycle	37	2,1%	Crossing
		C2	Car	77	4,3%	Crossing
		L1	Motorcycle	2	0,1%	Run-up
		L1	Car	77	4,3%	Run-up
		L2	Motorcycle	39	2,2%	Run-up
		L3	Motorcycle	21	1,2%	Run-up
		L4	Motorcycle	298	16,6%	Rear
		L5	Car	65	3,6%	Rear
		L6	Car	87	4,9%	Rear
		On1	Motorcycle	72	4,0%	Oncoming
		On2	Car	35	1,9%	Oncoming
		S1	Car	2	0,1%	-
		S2	Car	2	0,1%	-
		B	Car	30	1,7%	-
		Rest		32	1,8%	
		Total		1793		
		Bundles		Occurrence	Percentage	
		1) Crossing		550	31%	96%
		2) Rear		676	38%	
		3) Run-up		139	8%	
		4) Oncoming		353	20%	

Tabelle 4: Kombinationen PKW / MZR, aus MZR-Sicht, GIDAS 2005-2017

Ego	Opponent	Scenario	Causer	Occurrence	Relative	Bundle	
Motorcycle	Car	T1	Motorcycle	2	0,1%	-	
		T3	Car	9	0,5%	-	
		T3	Motorcycle	26	1,4%	-	
		T4	Car	5	0,3%	Crossing	
		T4	Motorcycle	8	0,5%	Crossing	
		T5	Motorcycle	25	1,4%	-	
		T9	Car	3	0,2%	Crossing	
		T9	Motorcycle	5	0,3%	Crossing	
		T10	Motorcycle	4	0,2%	Crossing	
		T14	Car	2	0,1%	-	
		T14	Motorcycle	3	0,2%	-	
		C1	Car	364	20,3%	Crossing	
		C1	Motorcycle	31	1,7%	Crossing	
		C2	Car	142	7,9%	Crossing	
		C2	Motorcycle	8	0,4%	Crossing	
		L1	Car	10	0,5%	-	
		L1	Motorcycle	298	16,6%	Run-up	
		L2	Car	296	16,5%	Run-up	
		L3	Car	81	4,5%	Run-up	
		L4	Car	77	4,3%	Rear	
		L5	Motorcycle	19	1,1%	Rear	
		L6	Motorcycle	15	0,8%	Rear	
		On1	Car	277	15,5%	Oncoming	
		On2	Motorcycle	38	2,1%	Oncoming	
		B	Motorcycle	2	0,1%	-	
		Rest		43	2,4%		
		Total		1792			
Bundles			Occurrence	Relative			
1) Crossing			570	32%	93%	93%	
2) Run-up			675	38%			
3) Rear			110	6%			
4) Oncoming			315	18%			

Tabelle 5: Bundle mit relevanten Kreuzen-Szenarien

Car is Ego		
T4	T9	T10
		
13.0%	2.9%	2.6%
C1	C2	
		
5.8%	6.4%	
Motorcycle is Ego		
C1	C2	
		
22%	8%	

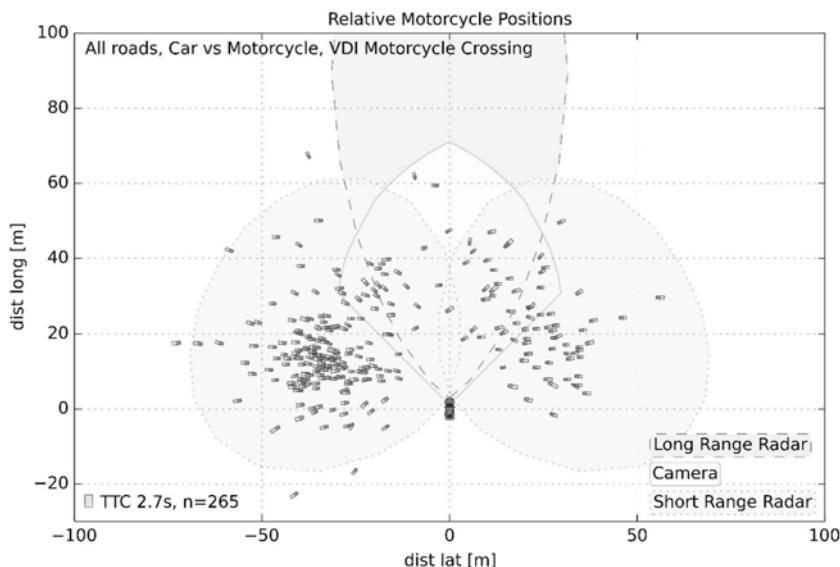


Bild 9: Kreuzen-Szenarien, MZR relativ zu PKW, Zeit TTC 2,7s

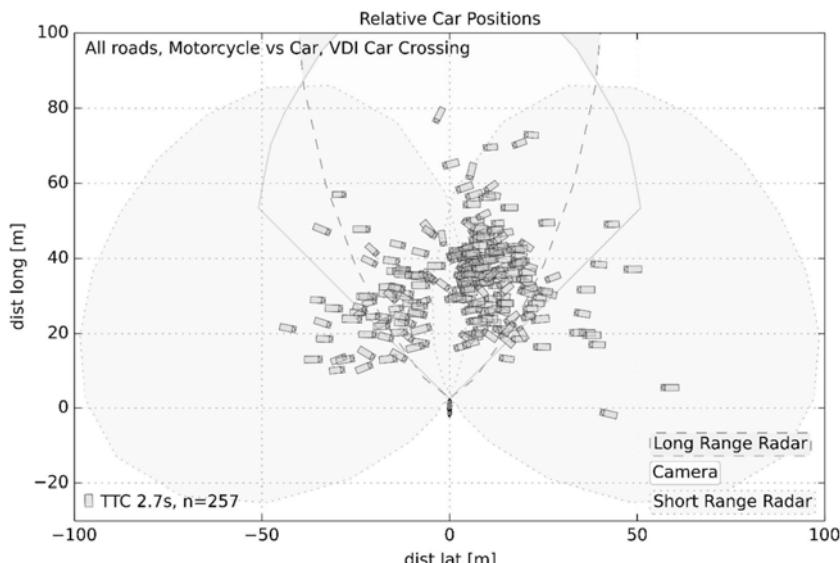
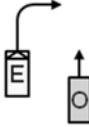


Bild 10: Kreuzen-Szenarien, PKW relativ zu MZR, Zeit TTC 2,7s

Tabelle 6: Bundle mit relevanten MZR-Auffahr-Szenarien

Car is Ego		
T1	T5	L4
		
1.0%	11.6%	16.6%
L5	L6	
		
3.6%	4.9	
Motorcycle is Ego		
L1	L2	L3
		
17.1%	16.5%	4.5%

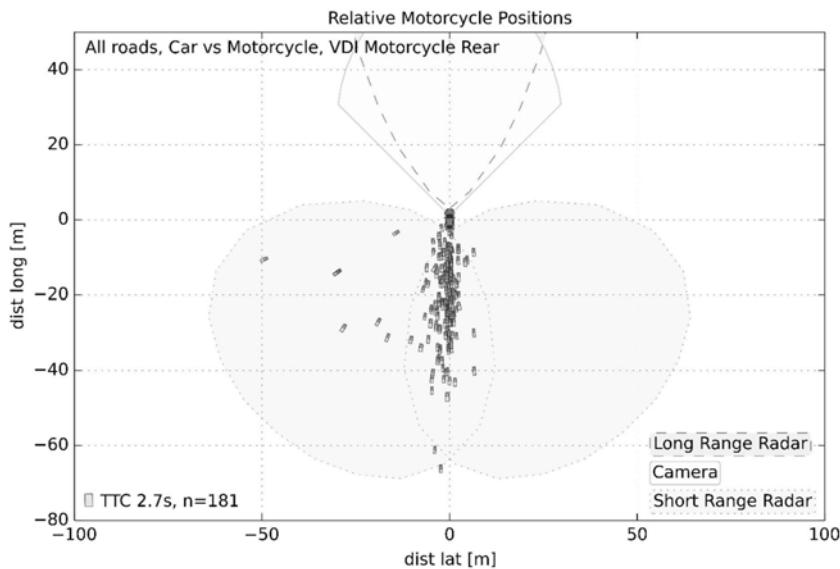


Bild 11: MZR-Auffahr-Szenarien, MZR relativ zu PKW, Zeit TTC 2,7s

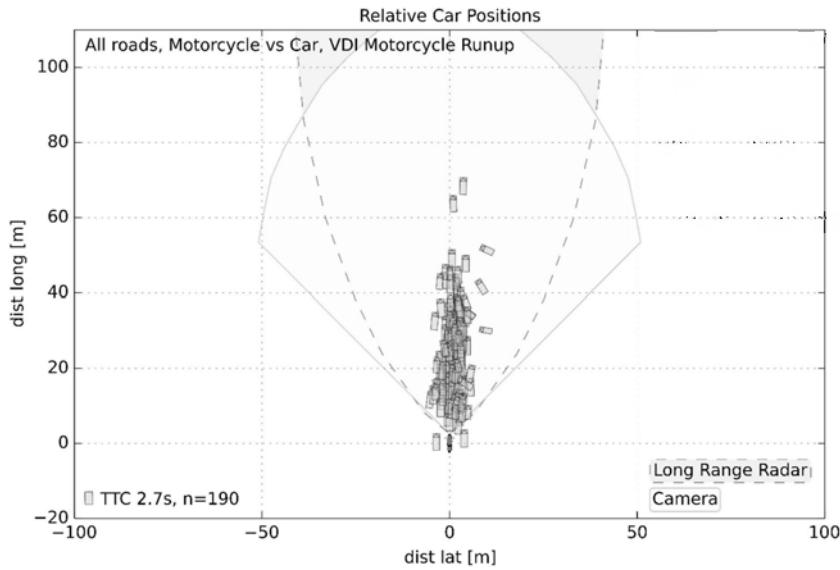


Bild 12: MZR-Auffahr-Szenarien, PKW relativ zu MZR, Zeit TTC 2,7s

Tabelle 7: Bundle mit relevanten PKW-Auffahr-Szenarien

Car is Ego		
L1 	L2 	L3 
4.4%	2.2%	1.2%
Motorcycle is Ego		
L4 	L5 	L6 
4.3%	1.1%	0.8%

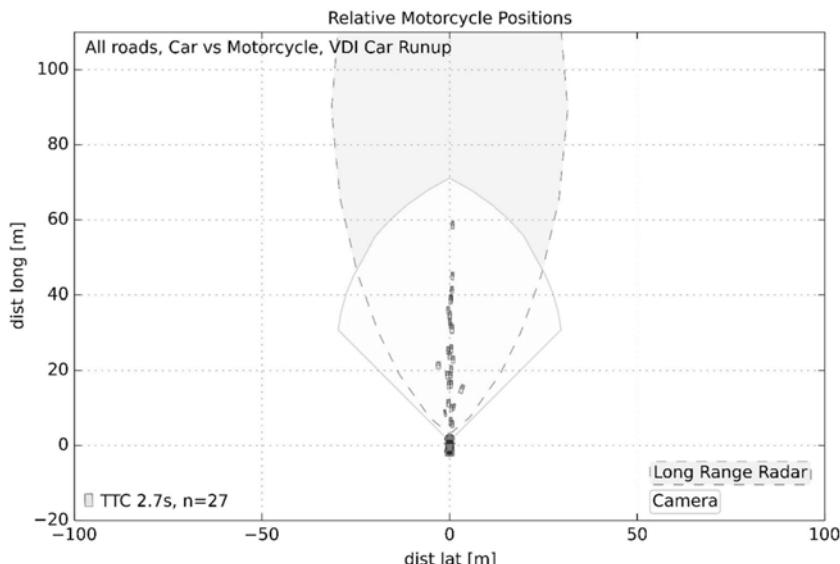


Bild 13: PKW-Auffahr-Szenarien, MZR relativ zu PKW, Zeit TTC 2,7s

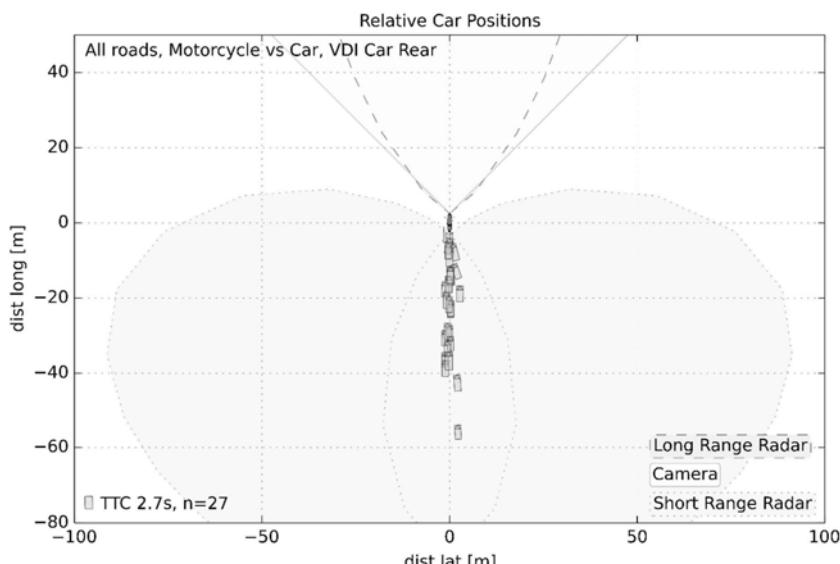


Bild 14: PKW-Auffahr-Szenarien, PKW relativ zu MZR, Zeit TTC 2,7s

Tabelle 8: Bundle mit relevanten Entgegenkommen-Szenarien

Car is Ego		
	On1	On2
	13.8%	4.0%
Motorcycle is Ego		
	On1	On2
	1.9%	15.5%
		1.9%

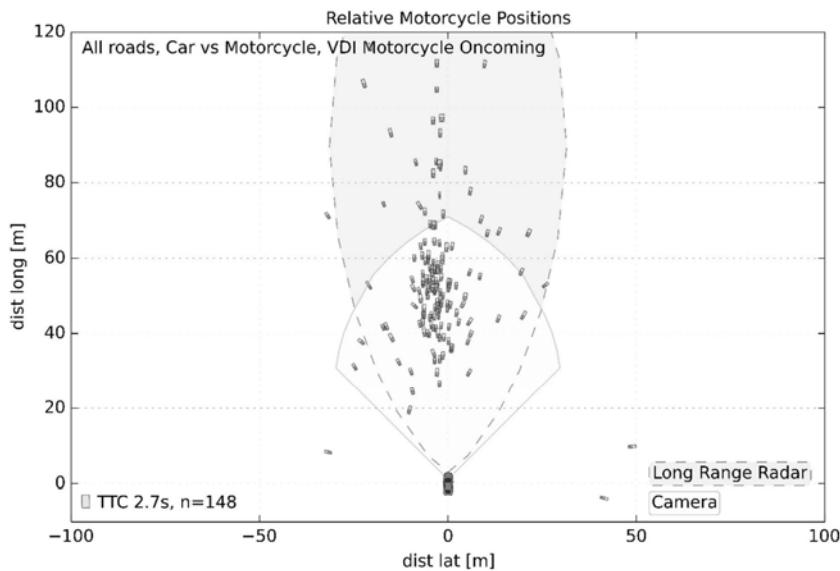


Bild 15: Entgegenkommen-Szenarien, MZR relativ zu PKW, Zeit TTC 2,7s

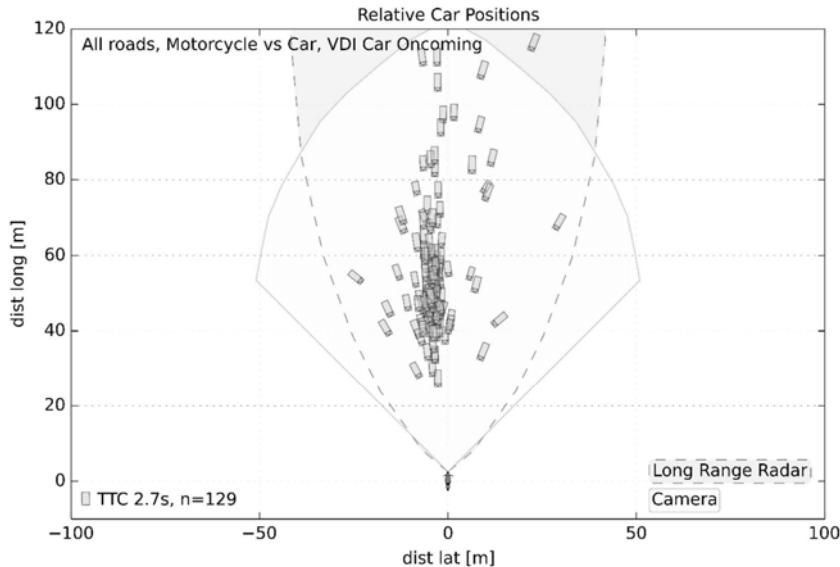


Bild 16: Entgegenkommen-Szenarien, PKW relativ zu MZR, Zeit TTC 2,7s

Anhang 2: Szenarienkatalog und Zusammensetzung aus Unfalltypen

Tabelle 9: Abbiege-Szenarien

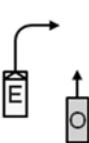
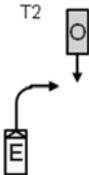
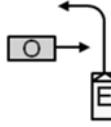
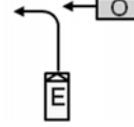
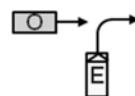
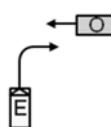
Turning		
T1	T2	T3
		
T4	T5	T9
		
T10	T14	
		

Tabelle 10: Kreuzen-Szenarien

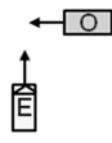
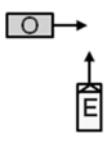
Crossing	
C1	C2
	

Tabelle 11: Längs-Szenarien

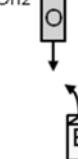
Longitudinal		
L1 	L2 	L3 
L4 	L5 	L6 
On1 	On2 	

Tabelle 12: Andere Szenarien

Other		
B 	S1 	S2 

Tabelle 13: Szenarien aus Sicht von UTYPA und UTYPB

UTYP	UTYPA	UTYPB	UTYP	UTYPA	UTYPB	UTYP	UTYPA	UTYP	UTYPA
201	L1	L4	301	C2	C1	401	C2	489	n/a
202	T5	L2	302	T4	C1	402	C2	491	C2
203	L2	n/a	303	T10	C1	403	C2	492	C1
204	T5	L2	304	n/a	n/a	404	C2	493	C1
209	n/a	n/a	305	T5	L2	405	C2	494	C2
211	T3	On1	306	T4	T14	409	C2	499	n/a
212	T3	n/a	309	n/a	n/a	411	C2		
213	n/a	n/a	311	C2	C1	412	C2		
214	n/a	n/a	312	T4	C1	413	C2		
215	T3	T3	313	T10	C1	414	C2		
219	n/a	n/a	314	n/a	n/a	419	C2		
221	T5	n/a	315	T5	L2	421	C1		
222	T3	n/a	319	n/a	n/a	422	C1		
223	T5	n/a	321	C1	C2	423	C1		
224	T3	n/a	322	T9	C2	424	C1		
225	n/a	n/a	323	T14	C2	429	C1		
229	n/a	n/a	324	n/a	n/a	431	C2		
231	L1	L4	325	On2	On1	432	C2		
232	T1	L3	326	T14	T4	433	C2		
233	T1	L3	329	n/a	n/a	434	C2		
239	n/a	n/a	331	C1	C2	435	C2		
241	T1	n/a	332	T9	C2	436	C2		
242	T2	n/a	333	T14	C2	439	C2		
243	T1	n/a	334	n/a	n/a	441	C2		
244	T2	n/a	335	On2	On1	442	C2		
245	n/a	n/a	339	n/a	n/a	443	C2		
249	n/a	n/a	341	C2	n/a	444	C2		
251	L5	L3	342	C1	n/a	449	C2		
252	L6	L2	343	C2	n/a	451	C1		
259	n/a	n/a	344	C1	n/a	452	C1		
261	C1	T4	349	n/a	n/a	453	C1		
262	C2	T14	351	On1	T3	454	C1		
269	n/a	n/a	352	C2	T9	455	C1		
271	C1	C2	353	C1	C2	459	C1		
272	n/a	n/a	354	T3	On1	461	C2		
273	n/a	n/a	355	C1	C2	462	C2		
274	n/a	n/a	359	n/a	n/a	463	C2		
275	n/a	n/a	361	n/a	n/a	464	C2		
279	n/a	n/a	362	n/a	n/a	465	C2		
281	T3	On1	363	n/a	n/a	469	C2		
282	n/a	n/a	364	n/a	n/a	471	C1		
283	n/a	n/a	369	n/a	n/a	472	C1		
284	n/a	n/a	371	C1	n/a	473	C1		
285	n/a	n/a	372	C2	n/a	479	C1		
286	T14	T4	373	L2	n/a	481	T5		
289	n/a	n/a	374	L2	n/a	482	T3		
299	n/a	n/a	379	n/a	n/a	483	T2		
			399	n/a	n/a	484	T1		

Tabelle 14: Szenarien aus Sicht von UTYPA und UTYPB

UTYP	UTYP A	UTYP B	UTYP	UTYP A	UTYP B	UTYP	UTYP A	UTYP B
501	L1	L4	601	L1	L4	701	n/a	n/a
502	L1	L4	602	L1	L4	702	n/a	n/a
509	n/a	n/a	603	L1	L4	703	n/a	n/a
511	L6	L2	604	L1	L4	709	n/a	n/a
512	L5	L3	609	L1	L4	711	B	L1
519	n/a	n/a	611	L1	L4	712	B	L1
521	On2	On1	612	L1	L4	713	B	n/a
531	L1	n/a	613	L1	L4	714	B	C1
532	L1	n/a	614	L1	L4	715	B	C2
533	L1	n/a	619	L1	L4	719	B	n/a
534	L1	n/a	621	L1	L4	721	T5	L2
539	n/a	n/a	622	L1	L4	722	T3	On1
541	L1	L4	623	L1	L4	723	T3	On1
542	L1	L4	624	L1	L4	724	n/a	n/a
543	On2	On1	629	L1	L4	729	n/a	n/a
549	n/a	n/a	631	L6	L2	731	O2	n/a
551	L6	L2	632	L6	L2	732	O2	n/a
552	L5	L3	633	L6	L2	741	O2	n/a
553	On2	On1	634	L6	L2	742	O2	n/a
554	On2	On1	635	L6	L2	749	O2	n/a
559	n/a	n/a	639	L6	L2	751	O2	n/a
561	C2	C1	641	L5	L3	752	O2	n/a
562	C1	C2	642	L5	L3	753	O2	n/a
569	n/a	n/a	643	L5	L3	759	O2	n/a
571	B	C1	644	L5	L3	761	O1	n/a
572	B	C2	645	L5	L3	762	O1	n/a
579	B	n/a	646	L5	L3	763	O1	n/a
581	S2	n/a	649	L5	L3	771	n/a	n/a
582	S1	n/a	651	L5	L3	772	n/a	n/a
583	L1	L4	652	L5	L3	773	n/a	n/a
584	L1	L4	661	On2	On1	774	n/a	n/a
589	n/a	n/a	662	L1	n/a	775	n/a	n/a
591	n/a	L4	663	L1	n/a	779	n/a	n/a
592	n/a	L4	664	L1	n/a	799	n/a	n/a
593	n/a	n/a	669	n/a	n/a			
594	n/a	n/a	671	L1	n/a			
599	n/a	n/a	672	L1	n/a			
			673	L1	n/a			
			674	L1	n/a			
			679	n/a	n/a			
			681	On2	On1			
			682	On2	On1			
			683	T14	T4			
			689	n/a	n/a			
			699	n/a	n/a			

Vergleich hybrider und virtueller Model-in-the Loop Methoden für die frühe menschzentrierten Verifikation und Validierung fortschrittlicher Fahrerassistenzsysteme

Christian Buchholz, Prof. Rainer Stark, Fachgebiet Industrielle Informationstechnik, Technische Universität Berlin

Zusammenfassung

Die optimale Integration in das Fahrzeug und eine hohe Kundenakzeptanz durch die richtige Ausgestaltung der Mensch-Maschine Schnittstelle entscheiden über den wirtschaftlichen Erfolg von Fahrerassistenzsystemen. Der Ansatz des Smart-Hybrid-Prototyping-in-the-Loop soll helfen, zukünftige Fahrerassistenzsysteme früher als bisher im Regelkreis von Fahrzeug, Umgebung und Fahrer zu testen und abzusichern. Im Rahmen einer Studie wird der Ansatz untersucht und bewertet.

Abstract

The optimal integration into the vehicle and a high customer acceptance by adequate design of the human-machine Interface both determine the economic success of driver assistance systems. The approach of Smart-Hybrid-Prototyping-in-the-Loop will help to test and validate future driver assistance systems earlier in the loop with the vehicle, environment and the driver. A user study is processed to evaluate this approach.

1. Einleitung und Motivation

Rund 88% aller Unfälle im Straßenverkehr waren im Jahr 2015 auf menschliche Fehler des Kraftfahrzeugfahrers zurückzuführen [1]. Durch die Unterstützung des Kraftfahrzeugfahrers in seinen Fahrzeugführungsaufgaben zielt der Einsatz von Fahrerassistenzsystemen (FAS) darauf ab, diese Unfallzahlen zu reduzieren [2, 3]. Die optimale Integration der Funktionalitäten des Systems in das Fahrzeug und eine weitreichende Kundenakzeptanz durch die richtige Ausgestaltung der Mensch-Maschine Schnittstelle entscheiden über den Erfolg aktueller und zukünftiger FAS [4]. In besonderem Maße gilt dies für **fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme** (fFAS, im englischen Advanced Driver Assistant System, ADAS) eine Unterkategorie der FAS. Das fFAS ist dadurch gekennzeichnet, dass es alle der möglichen Charakteristika eines FAS beinhaltet [5]:

- Erfassung und Interpretation des Fahrumfeldes,
- Bereitstellung komplexer Signalverarbeitung,

- aktive Unterstützung des Fahrers in der lateralen oder longitudinalen Fahrzeugkontrolle mit und ohne Warnungen
- Bereitstellung der direkten Interaktion zwischen Fahrer und System fFAS

Bei diesen Systemen müssen im Entwicklungsprozess entsprechend nicht nur mögliche Fehler bei der Spezifikation, der Herstellung und Integration betrachtet werden, sondern auch vorhersehbare Fehler beim Gebrauch oder Missbrauch der Systeme durch den Nutzer [5].

Die Entwicklung von fFAS steht damit vor der Herausforderung, die Entwicklung des fFAS im Kontext aller seiner relevanten Interaktionen mit Mensch und Fahrumgebung abzusichern. Dabei muss einerseits abgesichert werden, dass die Entwicklungsprototypen des fFAS die an Sie gestellten Anforderungen erfüllen – Sie müssen demnach verifiziert werden. Anderseits muss sichergestellt werden, dass die gestellten Anforderungen den tatsächlichen Bedürfnissen des Kunden entsprechen – eine Validierung des Entwicklungsprototypen ist erforderlich. Da die Reife und die Komplexität des fFAS über dessen Entwicklungsprozess zunimmt, sollte eine Absicherung frühzeitig durchgeführt werden, um Fehlentwicklungen an möglichst einfach und kostengünstig veränderbaren Entwicklungsprototypen feststellen zu können [4].

In heutigen Entwicklungsprozessen wird das vollständige fFAS verhältnismäßig spät im Kontext aller seiner relevanten Interaktionen mit Mensch und Fahrumgebung getestet. Mit dem Ziel, frühere und damit weniger reife Entwicklungsprototypen zur fFAS-Absicherung im Regelkreis von Fahrer und Fahrumgebung nutzen zu können, wurde an der TU Berlin der Ansatz des Smart Hybrid Prototyping auf den Regelkreis-basierten Test übertragen [6].

In dieser Veröffentlichung soll dieser Ansatz des **Smart-Hybrid-Prototyping-in-the-Loop (SHPiL)** vorgestellt und durch Vergleich mit heutigen Absicherungs-Ansätzen der fFAS-Entwicklung in einem Anwendungsfall erstmalig evaluiert werden.

2. Ansätze der Absicherung von fFAS im Regelkreis von Fahrer & Umgebung

Die Entwicklung von fortschrittlichen Fahrerassistenzsystemen basiert mehrheitlich auf dem V-Modell [7, 8]. Dabei wird das fFAS auf dem absteigenden Ast des „Vs“ zunächst Schritt für Schritt bis auf Modulebene dekomponiert und dabei immer feiner spezifiziert (siehe Bild 1). Dabei lässt sich eine zweiteilige Dekomponierung des Systems fFAS (in grau dargestellt) in die Elemente der Steuerung, Sensorik und Aktorik (in blau dargestellt) sowie der Mensch-Maschine Schnittstelle (MMS) beobachten (in gelb dargestellt) [8]. Nach der Konzeption werden die Teil-Systeme in dem aufsteigenden Teil des „Vs“ iterativ vom Konzept zu verschiedenen Entwicklungsprototypen weiterentwickelt und anschließend zum System fFAS integriert (wieder in grau dargestellt) [7].

Auf jeder horizontalen Abstraktionsstufe finden Prüfschritte zur Verifikation und Validierung statt. Hier wird überprüft, ob die Entwicklungsprototypen ihren Spezifikationen entsprechen und ob Sie das benötigte Verhalten zeigen. Die Spezifikationen (absteigender Ast) leiten sich aus den fFAS Anforderungen und den fFAS Spezifikationen ab [7].

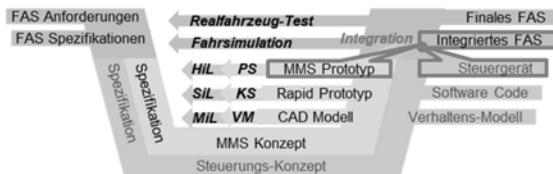


Bild 1: V-Modell der heutigen Entwicklung und Absicherung fortschrittlicher Fahrerassistenzsystemen (nach [3, 5])

Die erstmalige Integration des fFAS findet üblicherweise durch eine Kopplung des Steuergesätes, auf dem der Software-Code der Steuerung implementiert ist, mit dem MMS Prototypen, bestehend aus physischer Bedien- und Anzeige-Hardware mit darauf implementiertem Software-Code des MMS, statt (nach [9]). Dieses integrierte fFAS wird dann in einen Fahrersimulator oder ein Testfahrzeug eingebunden und mit diesem im Regelkreis des Fahrers und der Fahrumgebung getestet und abgesichert.

In früheren Phasen des Entwicklungsprozesses, werden die einzelnen Entwicklungsprototypen hingegen getrennt abgesichert (nach [3, 5]). Eine Absicherung von Entwicklungsprototypen der Steuerungs- (und Sensorik/Aktorik-) Entwicklung wird mit X-in-the-loop (XiL) Tests durchgeführt. Je nach Reife des Entwicklungsprototypen mit Verhaltensmodellen (Model-in-the-Loop, MiL), mit Software-Code (Software-in-the-Loop, SiL) oder dem Steuengerät mit dort implementierter Software (Hardware-in-the-Loop, HiL). Der XiL-Test testet dabei die Entwicklungsprototypen der Steuerung im Regelkreis einer virtuellen Fahrumgebung und eines virtuellen Fahrers [9]. Der Prozess des XiL-Tests kann dabei grundsätzlich in die fünf Prozessphasen Anforderungsfestlegung, Test Design, Test Durchführung, Test Evaluation und Test Dokumentation eingeteilt werden [10].

Eine Absicherung der Mensch-Maschine Schnittstelle wird mit Tests, die die Interaktion mit dem Fahrer untersuchen, durchgeführt. Zunächst werden virtuelle Mensch-Modelle (VM) für den Test von geometrischen Kriterien in CAD-Modellen verwendet. Mit MMS Konzept-Simulationen (KS) können anschließend mit Rapid Control Prototyping (RCP) erzeugten virtuellen Anzeigen und Bedienelementen, die auf einfacher Rapid Prototyping (RP) Hardware aufgespielt sind, Absicherungstests im Regelkreis des realen Fahrers durchgeführt werden [5].

Durch Umsetzung der virtuellen MMS in Software sowie höherer Reife der Elektronik-Hardware werden anschließend die MMS Prototypen erstellt und mit MMS-Prototypensimulationen (PS) abgesichert. Nach Zander [11] können die KS- sowie der PS-Absicherungstest dem allgemeinen Testprozess mit seinen Stufen Planung, Spezifikation, Ausführung, Aufnahme und Prüfung abgebildet werden. Da dieser im Wesentlichen dem XIL-Prozess gleicht, können sowohl die XIL als auch die KS/PS-Absicherungstests mit demselben generischen fünfstufigen Prozess abgebildet werden.

3. Ansatz des Smart-Hybrid- Prototyping-in-the-Loop

Der neue Ansatz des **Smart-Hybrid-Prototyping-in-the-Loop (SHPiL)** kombiniert den Ansatz Model-in-the-Loop (MIL) mit dem der RCP/RP-basierten MMS Konzept-Simulationen (KS). Dazu werden die Verhaltensmodelle der Steuerung mit den Rapid-Control-Prototypen der virtuellen Anzeigen und den Rapid-Prototypen der Anzeige- und Bedienhardware zum hybriden Prototypen des fFAS gekoppelt [6]. Durch Integration in einen Fahrsimulator ermöglicht der SHPiL Ansatz dem Fahrer, ein virtuelles Fahrzeug durch eine virtuelle Fahrumgebung zu führen und das fFAS im Kontext dieser ganzheitlich zu erproben und Absicherungstests durchzuführen. Diese Fahrsimulationstests des integrierten fFAS können im Entwicklungsprozess früher als heute durchgeführt werden (siehe Bild 2).



Bild 2: V-Modell der Entwicklung und Absicherung mit dem SHPiL Ansatz

Neben für den Test und Aufbau der Entwicklungsprototypen erforderlichen Werkzeugen, beschrieben durch Buchholz [6], müssen ebenfalls die in diesem neuen in-the-Loop Prozess durchzuführenden methodischen Schritte beschrieben werden. Basierend auf verschiedenen Arbeiten wurden die methodischen Schritte des MiL-Prozesses [8,9,10,11] sowie des KS-Prozesses [5, 12] erfasst, modifiziert und in einen neuen **Smart-Hybrid-Prototyping-in-the-Loop-Prozess** überführt.

Bild 3 zeigt die methodischen Schritte innerhalb der zwei Prozesse des Standes der Technik (Bild 3, links sowie Bild 3, Mitte) sowie die daraus abgeleiteten methodischen Schritte innerhalb des SHPiL Prozesses (Bild 3, rechts). Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit wurden methodischen Schritte in den Prozessschritten 1 und 5 jeweils zusammengefasst.

	MiL	KS	SHPiL
1		Festlegen der jeweiligen Anforderungen & Abnahmekriterien Festlegung der jeweiligen Testmethoden	
2	<ul style="list-style-type: none"> Definition des MiL Testaufbaus Aufbau der Umgebung & der Verkehrsszene Parametrierung des virtuellen Fahrers Einbindung der Verhaltensmodelle 	<ul style="list-style-type: none"> Definition des KS Testaufbaus Aufbau RP Hardware Implementierung des MMS Designs in RCP Tool Vorbereitung Fragebögen/ Interviews 	<ul style="list-style-type: none"> Definition des SHPiL Testaufbaus Aufbau der Umgebung & der Verkehrsszene Aufbau RP Hardware Implementierung des Interface Designs in RCP Tool Einbindung der Verhaltensmodelle Vorbereitung Fragebögen/ Interviews
3	<ul style="list-style-type: none"> Simulation verschiedener Fahrszenarien Aufnahme von Fahrdaten & Modellverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> Durchschalten verschiedener MMS Alternativen (SW/HW) Live Interviews oder Fragebögen zur Bewertung 	<ul style="list-style-type: none"> Simulation verschiedener Fahrszenarien Durchschalten verschiedener MMS Alternativen (SW/HW) Aufnahme von Fahrdaten & Modellverhalten Live Interviews oder Fragebögen zur Bewertung
4	<ul style="list-style-type: none"> Auswertung der Fahrdaten 	<ul style="list-style-type: none"> Auswertung Fragebögen und Interviews 	<ul style="list-style-type: none"> Auswertung der Tests Auswertung Fragebögen und Interviews
5		Dokumentation der jeweiligen Testergebnisse	

Bild 3: Methodische Schritte im MiL-Prozess (links), im KS-Prozess (Mitte) sowie im neuen SHPiL-Prozess (rechts)

4. Evaluation des SHPiL-Ansatzes im Vergleich zu heutigen Ansätzen der Regelkreis-basierten Verifikation

Für die Evaluation wurde ein fünfmonatiges Projekt durchgeführt. In diesem entwickelten drei studentische Entwicklungsteams, jeweils bestehend aus zwei Steuerungs- und zwei MMS-Entwicklern, ein fFAS und sicherten dieses mit Hilfe verschiedener Absicherungstests ab. Das fFAS sollte dabei der Vermeidung von Kollisionen mit Radfahrern in Abbiegesituationen dienen. Motivation dieses Anwendungsfalles sind die hohen Unfallzahlen unter Beteiligung von Radfahrern im innerörtlichen Bereich [1]. So resultierte 2016 jeder dritte Verkehrstote im Raum Berlin aus einem Verkehrsunfall mit Radfahrerbeteiligung; und auch der relative Anteil der Unfälle mit Radfahrern am Gesamtunfall-Aufkommen war mit etwa 33% hoch [13]. Die drei Entwicklungsteams entwickelten jeweils fFAS-Konzepte zur Lösung der Aufgabenstellung, modellierten Entwicklungsprototypen und unterzogen diese verschiedenen Absicherungstests.

In einer **Evaluationsstudie** wurde der neue Ansatz des Smart-Hybrid-Prototyping-in-the-Loop (SHPiL) erstmals explorativ evaluiert. Dazu wurde der Absicherungsansatz mit den Ansätzen

MiL- sowie der KS-Absicherungstests verglichen. Dabei wurden Entwicklungsprototypen der selben Reife verwendet. Die Entwicklungsprototypen, die für die Tests verwendet wurden teilen sich dabei in die folgenden Elemente auf:

- Virtuelle Sensoren am virtuellen Fahrzeug in der Fahrsimulationsumgebung zur Erfassung des Fahrumfeldes
- Sensor-Verhaltensmodell zur Interpretation der Sensorsignale und Differenzierung zwischen Fahrrädern und anderen Objekten
- Steuerungs-Verhaltensmodell, das auf Basis eines dreistufigen Warnkonzepts den Fahrer mit abnehmender Time To Collision (Zeit bis zur Kollision) mit zunehmender Warnintensität warnt und final einen Aktor zur Fahrzeugbremsung auslöst.
- Aktor-Verhaltensmodell, das ein Bremsmoment berechnet und an das virtuelle Fahrzeug weitergibt
- Multimodale Anzeigen, bestehend aus Hard- und Software der visuellen, akustischen und haptischen Ausgabe zur Anzeige des dreistufigen Warnkonzepts an den Fahrer
- Haptische Bedienelemente zum Umschalten zwischen verschiedenen Modi sowie zum Ein-/Ausschalten des fFAS durch den Fahrer

In Bild 3 sind die Entwicklungsprototypen beispielhaft für eines der drei entwickelten Konzepte gezeigt. Der MiL-Absicherungstest testet dabei nur die Verhaltensmodelle in Interaktion mit der virtuellen Fahrumgebung (blau markierte Elemente), der KS-Absicherungstest nur die MMS-Elemente in Interaktion mit dem Fahrer (gelb markierte Elemente). Erst der SHPiL-Absicherungstest testet das gekoppelte, integrierte fFAS.

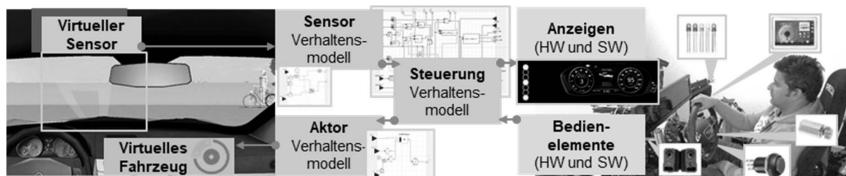


Bild 3: Entwicklungsprototypen des fFAS als Basis der MiL-Absicherungstests (links), der KS-Absicherungstests (rechts) sowie des SHPiL-Absicherungstests (gekoppelt)

Um eine optimale Vergleichbarkeit der Absicherungstests untereinander, aber auch mit dem Stand der Technik zu gewährleisten, wurde auf Basis der Checkliste für fFAS-Spezifikationen des Response 3 Forschungsprojektes [5] eine Anforderungsliste generiert (siehe Tabelle 1). Die Checkliste stellt dabei Fragen zur Bewertung des fFAS bereit und zielt auf eine ganzheitliche Evaluation des fFAS. Dabei war das Forschungsprojekt Response 3 Teil einer Initiative

der Europäischen Automobilindustrie zur Entwicklung und Demonstration von Anwendungen und Technologien zur Verbesserung der Verkehrssicherheit [5].

In der Evaluationsstudie sollten die **generierten Anforderungen** durch die Entwickler mit Hilfe der drei Ansätze des MiL, KS und SHPiL **verifiziert** als auch **validiert** werden.

Die Anforderungen 1-4 betreffen dabei das Verhalten des fFAS und können mit MiL-Tests abgesichert werden. Die Anforderungen 5-11 betreffen die Interaktion zwischen Fahrer und fFAS und können mit KS-Tests abgesichert werden. Diese 11 Anforderungen werden folgend als Stand-der-Technik (SDT) Anforderungen bezeichnet. Die rot gekennzeichneten „neuen“ Anforderungen 12-14 benötigen zu Absicherung sowohl die Interaktion mit der Fahrumgebung als auch mit dem Fahrer, ergo den SHPiL-Test.

Tabelle 1: Durch die Tests zu abzusichernde Anforderungen an das fFAS

Nr.	Anforderung	Nr.	Anforderung
1	Die Warnungen werden rechtzeitig entsprechend der Kritikalität der Verkehrssituation angezeigt	8	Die Position der Anzeigen und Bedienelemente passen in den Kontext bestehender MMS
2	Das System kann ein- und ausgeschaltet werden	9	Es ist dem Fahrer möglich, das System jederzeit ein- und auszuschalten
3	Das System kann verschiedene Betriebsmodi einnehmen	10	Das Bedienelement zum ein/Ausschalten ist für den Fahrer nutzbar
4	Das System stoppt das Fahrzeug vor dem Crash	11	Es ist dem Fahrer möglich, die verschiedenen Betriebsmodi des Systems zu unterscheiden
5	Die Warnungen des Systems sind für den Fahrer verständlich und eindeutig	12	Die Warnungen sind in typischen relevanten Verkehrssituationen wahrnehmbar
6	Die Warnungen sind mit anderen Warnungen/Informationen im Cockpit vereinbar	13	Die Warnungen sind der Kritikalität der Verkehrssituation angemessen
7	Der Fahrer ist ausreichend über Status und Funktion des System informiert	14	Es ist möglich, das System jederzeit zu übersteuern

Die Bearbeitung der Entwicklungsaufgabe über den gesamten Entwicklungsprozess sowie die Nutzung einer Palette an komplexen Ansätzen zur Absicherung der Entwicklungsprototypen ermöglichen die Evaluation eines Entwicklungsprojektes hoher Komplexität. Die vergleichbaren Ausgangskenntnisse und -fähigkeiten der studentischen Entwickler sorgen für eine hohe Aussagekraft der Tests und ermöglichen in Kombination mit den standardisierten Anforderungen die wissenschaftliche Bewertung der Ergebnisse..

4.1. Testfragen und -hypothesen der Evaluationsstudie

Die folgende Testfrage soll im Rahmen der Evaluationsstudie untersucht werden:

- Können Entwickler von fFAS mit Hilfe des SHPiL-Ansatzes mit denselben Entwicklungsprototypen und mit vergleichbarem Aufwand bessere Absicherungsergebnisse erzielen oder größere Umfänge absichern als mit den Ansätzen des Stands der Technik MiL und KS?

Zur Beantwortung der Testfrage werden die folgenden vier Testhypothesen erstellt und im Folgenden evaluiert:

1. Der SHPiL-Absicherungstest ist für Entwickler von **mindestens gleicher Nützlichkeit** für die Absicherung derselben Anforderungen als mit MiL- und KS-Absicherungstest.
2. Der SHPiL-Absicherungstest ist für Entwickler **mindestens ebenso gut nutzbar** und **maximal vergleichbar beanspruchend** wie MiL und KS-Absicherungstest für die Absicherung derselben Anforderungen
3. Mit SHPiL-Absicherungstests können dieselben Anforderungen **besser verifiziert und validiert werden** als durch MiL- und KS-Absicherungstests.
4. Mit dem SHPiL-Absicherungstest können **mehr Anforderungen verifiziert und validiert** werden als mit MiL und KS-Absicherungstests.

4.2. Durchführung der Evaluationsstudie

Die Evaluationsstudie wurde dreiteilig ausgeführt. Im ersten Teil wurden parallel die **MiL- und KS-Absicherungstests** zur Absicherung der Anforderungen 1 bis 4 beziehungsweise 5 bis 11 durch jeweils zwei Mitglieder der Entwicklungsteams durchgeführt. Im zweiten Teil wurden dieselben Anforderungen 1 bis 11 durch das gesamte Entwicklungsteam mittels des **SHPiL-Absicherungstests** abgesichert. Im dritten Teil wurden die Anforderungen 12 bis 14 mittels des **SHPiL-Absicherungstests** abgesichert. Die Test-Setups sind in Bild 4 zu sehen.

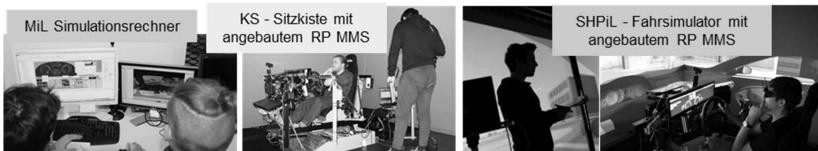


Bild 4: Aufbau für MiL- (links), KS- (Mitte) und SHPiL-Absicherungstest (rechts)

Zur Evaluation der Arbeit der Entwicklungsteams wurden die für die Tests aufgewandte Zeit gemessen und die Testdurchführung mittels Screen Capture und verschiedenen Kameras aufgezeichnet. Mit dem standardisierten NASA TLX Fragebogen (nach [14]) wurden die Probanden zu Ihrer Einschätzung der geistigen, körperlichen und zeitlichen Anforderungen sowie der Ausführungsqualität, dem Aufwand und der Frustration bei der Erfüllung der jeweiligen Testaufgabe befragt. Mit Hilfe des standardisierten Fragebogens „wahrgenommenen Nützlichkeit und die wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit“ wurden die Probanden zu Ihrer Einschätzung der Nützlichkeit und Nutzbarkeit der Ansätze befragt. Nach Davis korrelieren diese mit der Einstellung eines Nutzers gegenüber einem System (beziehungsweise dem damit durchgeführten Prozess) sowie der Verhaltensintention des Nutzers zu dessen Nutzung [15].

4.3. Evaluation der Testergebnisse

Nach Durchführung der Absicherungstests gaben die Entwicklungsteams eine Beurteilung zum **Verifikationserfolg** der jeweiligen Anforderungen. Bild 5 zeigt diese Ergebnisse, unterteilt in partiell als verifizierte angegebene (gelb markierte) sowie vollständig durch den Absicherungstest verifizierte angegebene Anforderungen (grün markiert).

Nach Durchführung des MiL-Absicherungstests gaben die Steuerungs-Entwickler eine vollständig durchgeführt Verifikation der Anforderungen 1 bis 4 an. Aus dem KS-Absicherungstest gaben die MMS-Entwickler die Anforderungen 5, 7, 9, 10 und 11 als vollständig verifiziert zurück. Die Anforderungen 6 und 8 wurden jeweils nur als partiell verifiziert angegeben, da der Kontext des „echten“ Cockpits bei dem verwendeten RP / PCP Setup nur teilweise vorhanden und damit nur teilweise beurteilbar ist.

Nach Durchführung des SHPiL- Absicherungstests gaben die Entwickler für die Anforderungen 1 bis 3 sowie 5, 7, 9, 10 und 11 eine vollständig durchgeführt Verifikation an. Anforderung 4, der Stopp des Fahrzeugs vor dem Crash, konnte dagegen nur partiell verifiziert werden. Es zeigte sich dabei für die Fahrszenarien des Links-Abbiegens ein zu später Stopp des Fahrzeugs bei allen drei Entwicklungsteams. Auch die Anforderungen 6 und 8 konnten wegen dem verwendeten RP / PCP Setup wiederrum nur partiell verifiziert werden.

Dazu konnten durch den SHPiL-Absicherungstests auch die neuen Anforderungen 12 bis 14 getestet und durch die Entwicklungsteams als erfolgreich verifiziert angegeben werden.

Legende	MiL					KS					SHPiL									
	Anforderung konnte partiell verifiziert werden					Anforderung konnte vollständig verifiziert werden					Anforderung konnte partiell verifiziert werden									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
Anforderung konnte partiell verifiziert werden	6	7	8	9	10						6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
Anforderung konnte vollständig verifiziert werden	11	12	13	14		11	12	13	14		11	12	13	14		11	12	13	14	

Bild 5: Als vollständig und partiell verifiziert durch den jeweiligen Absicherungstest angegebene Anforderungen

Neben dem Verifikations- gaben die Entwicklungsteams auch Beurteilungen zum **Validierungserfolg** ab. Da die Validierung die Frage der Anforderungskonformität mit den tatsächlichen Bedürfnissen des Kunden stellt, konnte nur die den Mensch in der Regelschleife berücksichtigenden KS- und SHPiL-Absicherungstests verwendet werden. Die jeweiligen Probanden schätzten dabei die aus Ihrer Sicht für den Kunden relevanten Anforderungen ein. Hierbei ergaben sich aber keine beziehungsweise nur unklare Aussagen der Entwickler. Die Validierung konnte daher im Rahmen der Tests nicht erfolgreich durchgeführt werden.

Die **Zeit** für die Durchführung der Absicherungstests wurde gemessen. Im Mittelwert benötigt dabei der MiL-Absicherungstest mit etwa 45min die meiste Zeit, KS- und SHPiL-Absicherungstest eine 33-34min vergleichbare Zeit. Für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,1$ ist der geringere Zeitbedarf des SHPiL gegenüber dem MiL-Absicherungstest signifikant.

Im Vergleich zwischen MiL und SHPiL-Absicherungstests wurden die **Subjektive Beanspruchungshöhe** des SHPiL-Absicherungstests in den Aspekten geistige und zeitliche Anforderungen sowie Frustration für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,1$ im t-Test für abhängige Stichproben signifikant geringer bewertet. Für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,9$ (eine 5% Streuung um den Mittelwert) kann eine signifikante Gleichheit der Ausführungsqualität gezeigt werden. Im Vergleich mit dem KS-Absicherungstest wurde die Frustration beim SHPiL-Absicherungstest dagegen für ein Signifikanzniveau für $\alpha = 0,1$ signifikant höher bewertet.

Für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,9$ kann dazu eine signifikante Gleichheit der körperlichen und zeitlichen Anforderungen gezeigt werden.

Tabelle 2: Ergebnisse des NASA TLX Fragebögen für den Vergleich MiL vs. SHPiL

(links, Anforderung 1-4) und KS vs. SHPiL (Rechts, Anforderungen 5-11)

	MiL			SHPiL			KS	SHPiL			SHPiL	
	Mittel- Wert	Varianz s	Mittel- Wert	Varianz s	t-Faktor für $\alpha=0,1$	Signifikanz für $\alpha=0,9$		Mittel- Wert	Varianz s	Mittel- Wert	Varianz s	
1. Geistige Anforderungen	75,83	10,96	53,33	17,22	0,06		60,83	29,67	67,92	18,06	0,67	
2. Körperliche Anforderungen	17,92	15,17	14,17	5,83	0,62		30,83	24,35	32,08	20,28	0,94	
3. Zeitliche Anforderungen	77,50	8,54	47,50	7,50	0,00		38,75	27,45	37,92	19,58	0,96	
4. Ausführung der Aufgaben	83,33	9,86	84,17	9,17	0,90		83,75	8,63	70,42	18,61	0,26	
5. Aufwand	75,00	21,21	66,25	12,50	0,49		50,83	27,90	54,17	22,22	0,85	
6. Frustration	64,58	21,81	18,33	12,78	0,00		14,17	7,86	28,75	12,08	0,09	

Im Vergleich der Erhebungen der fünfstufigen Skala zur wahrgenommenen Nützlichkeit und Nutzbarkeit zeigen sich sowohl zwischen MiL und SHPiL als auch zwischen KS und SHPiL keine signifikanten Unterschiede für ein Signifikanzniveau für $\alpha = 0,1$. Eine Gleichheit für ein Signifikanzniveau für $\alpha = 0,9$ kann für den Vergleich zwischen MiL und SHPiL in den Nützlichkeits-Aspekten der Geschwindigkeit und Nützlichkeit für die Durchführung der jeweiligen Tests festgestellt werden. Im Vergleich KS und SHPiL zeigt sich die signifikante Gleichheit im Nutzbarkeits-Aspekt der Flexibilität der Absicherungstests.

4.4. Diskussion der Testergebnisse

Die **Nützlichkeit des SHPiL-Absicherungstests** für den Entwickler wurde von den Entwicklern in 2 von 10 Aspekten als vergleichbar mit den Ansätzen des Stands der Technik angegeben. Diese Ergebnisse zeigen eine vorhandene partielle Vergleichbarkeit, sind aber in Summe für die Bestätigung der These nicht ausreichend. Gleichermaßen gilt für die **wahrgenommene Nutzbarkeit**, in der auch lediglich 1 von 10 Vergleichstests ein signifikantes Ergebnis liefert. Bei

der Bewertung der **Beanspruchungshöhe** zeigten sogar 4 der 6 Kriterien des Vergleichs zwischen MiL und SHPiL entweder gleiche oder signifikant bessere Ergebnisse für den SHPiL-Absicherungstest. Der Vergleich zwischen KS und SHPiL zeigt dagegen zwei gleiche und ein signifikant schlechteres Ergebnis. Wo der Vergleich zwischen MiL und SHPiL auf eine Bestätigung der These hinweist, für eine solche aber noch nicht genügt, falsifiziert das signifikant schlechtere Ergebnis diese für den Vergleich zwischen KS und SHPiL.

Eine **Verbesserung der Verifikation** kann exemplarisch am Beispiel der Anforderung 4 gezeigt werden: Durch die Integration des Fahrers und seines stochastischen Verhaltens konnte eine unzureichende Parametrierung des fFAS entdeckt werden, welches sich mit dem virtuellen Fahrer des MiL-Absicherungstests als nicht problematisch zeigte. Auch berichteten die Entwickler von einer veränderten Wahrnehmung der Mensch-Maschine Schnittstelle gegenüber dem KS-Absicherungstest, sobald der „Kontext“ der Fahrumgebung im SHPiL-Absicherungstest zugeschaltet wurde. Zudem schaffte die Integration ein gemeinsames Verständnis beider Entwicklergruppen - die Möglichkeit des gemeinsamen Erlebens der Prototypen war laut Entwicklern wichtig für ein tiefes Verständnis des Gesamtsystems. Durch die höhere Komplexität des Absicherungstest kann die Verifikationsqualität jedoch auch sinken: So führte während eines Tests eine fehlerhafte Wiedergabe des Lenksystems zu unrealistischen Abbiege-Situationen und sorgte für eine Verfälschung der Testergebnisse. In Summe kann aus den Erfahrungen der Evaluation festgehalten werden, dass der Einsatz des SHPiL-Absicherungstest die Qualität der Verifikation steigert. Die erfolgreiche Verifikation der „neuen“ Anforderungen 12-14 im dritten Teil der Evaluationsstudie bestätigt dazu die vierte These, **das mit dem SHPiL-Ansatz mehr Anforderungen verifizieren** werden können als mit den Ansätzen des Stand der Technik. Eine Untersuchung zur Verbesserung der verbesserten oder umfangreicheren Validierung steht hingegen noch aus.

5. Fazit & Ausblick

Es wurde der neuartige Ansatz des Smart-Hybrid Prototyping-in-the-Loop zur frühzeitigen Durchführung von Absicherungstest des fortschrittlichen Fahrerassistenzsystems im Regelkreis von Fahrer und Fahrumgebung vorgestellt. Im Rahmen einer Evaluationsstudie wurde gezeigt, dass mit Diesem gegenüber heutigen Ansätzen des Absicherungstests die Qualität und der Umfang von Verifikation bei Verwendung derselben Entwicklungsprototypen gesteigert werden kann. Dazu konnte mit frühzeitiger Integration ein gemeinsames Verständnis verschiedener Entwicklergruppen geschaffen werden sowie Testzeit gespart werden. Die kleine Stichprobengröße innerhalb des Evaluationstest führte jedoch dazu, dass viele Tests keine signifikanten Ergebnisse brachten. So sollten zukünftig auf Basis der Evaluationsergebnisse

weitere, spezifischere Absicherungstests mit größeren Stichproben durchgeführt werden. Dazu sollten Absicherungstests zur Evaluation der Nutzbarkeit des Ansatzes für die Validierung durchgeführt und eine Übertragung des SHPiL-Ansatzes auf echte industrielle Anwendungsfälle angestrebt werden.

- [1] Statistisches Bundesamt: Unfallentwicklung auf deutschen Straßen 2015. Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 12. Juli 2016 in Berlin. Berlin 2016
- [2] Borgeest, K: Elektronik in der Fahrzeugtechnik. Springer Verlag, Wiesbaden 2010
- [3] Winner, H. et. al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2., korrigierte Auflage. Wiesbaden Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2016
- [4] Bernhard S. et. al.: Simulationsmethoden zur Evaluierung und Verifizierung von Funktion, Güte und Sicherheit von Fahrerassistenzsystemen im durchgängigen MIL-, SIL- und HIL- Prozess. Karlsruhe 2008
- [5] Response Consortium: Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS, Wolfsburg 2009
- [6] Buchholz, C. et. al.: SHPbench – A Smart Hybrid Prototyping Based Environment for Early Testing, Verification and (user based) Validation of Advanced Driver Assistant Systems of Cars. Cranfield 2017
- [7] Bartelt, C. et. al.: V-Modell XT. Das deutsche Referenzmodell für Systementwicklungsprojekte. Version 2.1. München 2017.
- [8] Schäuffele, J. et. al.: Automotive Software Engineering. Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen. Wiesbaden 2013.
- [9] Reif, K.: Bosch Autoelektrik und Autoelektronik. Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme; Wiesbaden 2011
- [10] Gühmann, C.: Model-based testing of automotive electronic control units. Berlin 2005.
- [11] Zander-Nowicka, J.: Model-based testing of real-time embedded systems in the automotive domain. Berlin 2008
- [12] AIDE: Review of existing Tools and Methods. Deliverable 2.1.1, AIDE Integrated Project, Sub-project 2. Göteborg 2004
- [13] Polizei Berlin: Verkehrsunfälle mit Radfahrern 2016. Berlin 2016
- [14] Hart, S. et. al.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, San Jose 1988
- [15] Davis, F.: Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology, Minnesota 1989

Wirksamkeitsbewertung aktiver Sicherheitssysteme anhand des Verletzungsrisikos als Basis für Systemoptimierung

Peter Wimmer, Christoph Klein, Virtual Vehicle, Graz, Österreich

1. Kurzfassung

In diesem Artikel wird eine durchgängige Methode zur Verletzungskriterien-basierten Wirksamkeitsbewertung aktiver Sicherheitssysteme unter realitätsnahen Einsatzbedingungen vorgestellt. Die Methode beinhaltet die Erzeugung kritischer Szenarien zur Darstellung realitätsnaher Testbedingungen für das Sicherheitssystem, eine durchgängige Simulationsmethode vom normalen Fahrzustand bis in den Crash und eine Verletzungskriterien-basierte Wirksamkeitsbewertung. Zur Darstellung der Möglichkeiten der vorgestellten Methode wurde eine Variantenstudie eines Frontalkollisions-Schutzsystems durchgeführt. Anhand dieses Beispiels wird der quantitative Einfluss verschiedener Systemvarianten auf das Verletzungsrisiko dargestellt.

2. Abstract

This article presents a continuous simulation method for the injury-criteria based effectiveness assessment of active safety systems under close-to-real-world conditions. The method consists of a) stochastic generation of critical, close-to-real world scenarios, b) continuous simulation covering pre-crash and in-crash phase and c) injury criteria based effectiveness assessment. To show the potential of the proposed method, a study for an autonomous emergency brake system was carried out. With this study the quantitative influences of system parameter variations on injury risk can be shown.

3. Einleitung

Aktive Sicherheitssysteme werden in den nächsten Jahren wesentlich zur Verringerung der Unfallzahlen beitragen. Sie werden die Anzahl der Unfälle, aber auch das Unfallgeschehen und die auftretende Verletzungsschwere beeinflussen. Infolge der steigenden Anzahl, Komplexität und Kombination dieser Systeme stellt die Bewertung ihrer Wirksamkeit eine immer größere Herausforderung dar: einerseits müssen geeignete Szenarien in relevanter Anzahl gefunden werden, andererseits müssen auch die zu untersuchenden Systeme und deren

Kombination adäquat abgebildet sein, um sinnvolle Aussagen treffen zu können. Schließlich muss zur umfassenden Untersuchung auch der Crashfall zur Abschätzung der Unfallschwere reduktion ausreichend genau dargestellt sein. Die Berücksichtigung all dieser Faktoren führt letztendlich zu einer Vielzahl notwendiger Lastfälle, die eine rein versuchsbasierte Bewertung der Wirksamkeit praktisch unmöglich macht. Als Lösung wird die Verwendung einer Simulationstoolkette vorgestellt. Dabei werden verschiedenste disziplinspezifische (Fahrdynamik, Sensoren, Regelalgorithmen, Umwelt, Fahrer,...) Simulationswerkzeuge zu einer umfassenden Toolkette gekoppelt. Dies ermöglicht die durchgängige Betrachtung einer Vielzahl von Szenarien unter Verwendung hochgenauer Simulationswerkzeuge von der Fahrdynamik bis in den Crash, wodurch ein einheitlicher Vergleich aktiver, passiver und integraler Sicherheitssysteme anhand der Verletzungsschwere realisiert werden kann.

4. Methode

Die Methode besteht aus 3 Teilelementen: Szenarienerzeugung, Simulationsmodell und Wirksamkeitsbewertung. Diese werden in den folgenden 3 Abschnitten jeweils genauer beschrieben.

Erzeugung generischer, kritischer Szenarien

Die Wirksamkeit der zu untersuchenden Sicherheitssysteme soll in einem möglichst breiten, realitätsnahen Einsatzfeld untersucht werden. Eine Möglichkeit dazu wäre, rekonstruierte Realunfälle heranzuziehen, dies hat allerdings den Nachteil, dass die Anzahl verfügbarer Unfälle limitiert ist. Es wurde daher eine Methode entwickelt [1], um eine beliebige Anzahl generischer kritischer Szenarien zu erzeugen, die in Summe das reale Unfallgeschehen approximieren. Die Funktionsweise der Methode wird hier am Beispiel „Auffahrunfall“ beschrieben.

Der erste Baustein der Methode besteht aus der Definition sogenannter Grundszenarien. Diese bestehen aus verschiedenen Kombinationen von Parametern, die die Umweltbedingungen des zu erzeugenden Szenarios festlegen. Dazu gehören Sichtverhältnisse (klar/wolkig/ regnerisch), Lichtbedingungen (Tag/Nacht), Fahrbahnzustand (nass/trocken) und Ort des Szenarios (innerstädtisch/außerstädtisch).

Der zweite Baustein der Methode besteht aus den Häufigkeitsverteilungen der Fahrzeugparameter für die verschiedenen Grundszenarien. Unter Fahrzeugparametern werden hier die jene Größen verstanden, die das Fahrzeugverhalten vor und während des Unfallgeschehens beschreiben, also zum Beispiel Ausgangsgeschwindigkeiten, Kollisionsgeschwindigkeiten etc. Diese Verteilungen werden durch eine Abfrage der GIDAS-Datenbank ermittelt.

Aus diesen beiden Bausteinen werden nun mithilfe eines sogenannten Mischverteilungsansatzes Gesamtverteilungen ermittelt und daraus die generischen kritischen Szenarien abgeleitet. Die Szenarienbeschreibungen beinhalten die Startpositionen und -geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge, die jeweiligen Geschwindigkeitsverläufe (ohne Eingriff der zu untersuchenden Sicherheitssysteme) und die dazugehörigen Umweltparameter. Diese werden verwendet, um z.B. die maximal mögliche Verzögerung der Fahrzeuge aufgrund nasser Straße zu berücksichtigen. Ein Überblick über die einzelnen Schritte der Szenarienerzeugung sind in Bild 1 zu finden.

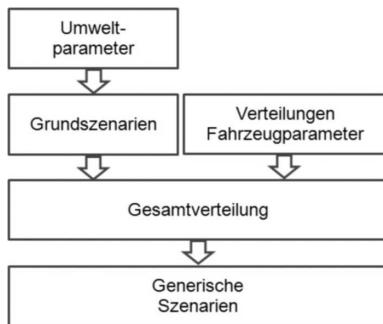


Bild 1: Die Schritte zur Szenarienerzeugung im Überblick

Die Vorteile dieser Methode sind, dass damit beliebig viele Szenarien erzeugt werden können, die auch seltene Konfigurationen beinhalten und in ihrer Summe statistisch repräsentativ für das reale Unfallgeschehen sind. Speziell die Tatsache der inkludierten seltenen Konfigurationen macht diese Methode interessant, da damit das Verhalten des Fahrzeugsicherheitssystems auch in ungewöhnlichen Situationen mit beurteilt werden kann.

Die so erzeugten Szenarien enthalten die Start- und Randbedingungen für die durchgängige Simulation. Diese wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

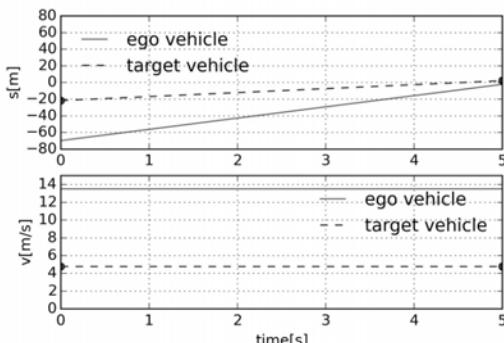


Bild 2: Beispieldaten der generischen Szenarienerzeugung: Positionen und Geschwindigkeiten von Ego- und Targetfahrzeug

Durchgängige Simulation

Nach der Definition der zu simulierenden kritischen Szenarien können die Simulationen gestartet werden. Dazu wird ein Gesamtsimulationsmodell zur durchgängigen Darstellung aller Phasen während des Unfalls verwendet. Die Basis hierfür ist bereits in [2] beschrieben und wurde seither stark weiterentwickelt.

Die Besonderheit dieses Gesamtmodells besteht darin, dass damit die sonst zum Kollisionszeitpunkt vorhandene Grenze des Gültigkeitsbereichs von Simulationsmodellen überwunden und ein nahtloser Übergang von der Simulation der Vorkollisionsphase zur Kollision erreicht werden kann.

Dieses Gesamtmodell besteht aus mehreren Teilmodellen, die alle beteiligten relevanten Komponenten abbilden. Diese sind:

- Sensorik und Algorithmen der zu betrachtenden aktiven Sicherheitssysteme.
- Fahrzeugdynamik der beiden Fahrzeuge in der Vorkollisionsphase.
- Finite-Elemente (FE) Crashsimulation der beiden Fahrzeuge für die Kollisionsphase. Hier erfolgt der Übergang von Fahrdynamik- zu Crashsimulation völlig automatisiert, indem die Zustände der beiden Fahrzeuge (Einfederung, Nickwinkel etc.) zum Zeitpunkt der Kollision aus der Fahrdynamik übernommen und auf FE-Modelle als Startbedingungen aufgebracht werden.
- Innenraum des auffahrenden Fahrzeugs inklusive Rückhaltesystemen und Fahrer werden in der Kollisionsphase durch ein FE-Modell abgebildet. Für den Fahrer wird hierbei ein Hybrid III Dummy-Modell verwendet. Im Falle einer bereits bekannten oder in hinreichender Nähe zum aktuellen Zustand liegenden Kollisionskonstellation wird statt der voll-

ständigen FE- Simulation auf das entsprechende Ergebnis zurückgegriffen bzw. interpoliert.

Diese Teilmodelle werden mithilfe der Co-Simulationsplattform Model.Connect zum Gesamtsimulationsmodell verbunden.

Die durchgängige Simulation liefert als Ergebnis für jede Simulation neben der zeitlichen Veränderung der Modellzustände die entsprechenden Verletzungswerte, die für die Wirksamkeitsbewertung herangezogen werden. Diese wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

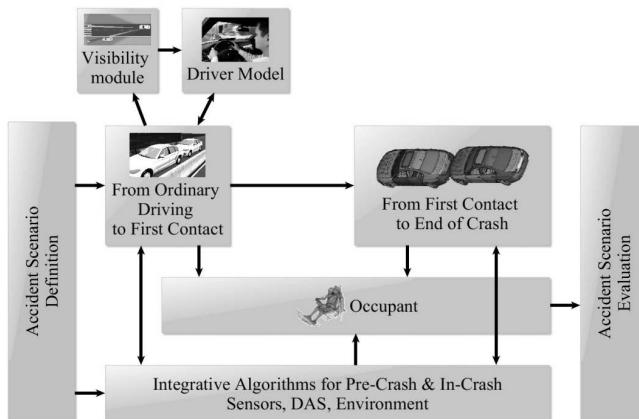


Bild 3: Durchgängiges Simulationsmodell für Vorkollisions- und - und Kollisionsphase

Verletzungsrisiko-basierte Wirksamkeitsbewertung

Die hier vorgestellte Wirksamkeitsbewertung eines Sicherheitssystems beruht auf einem Vergleich der Simulationsergebnisse mit Sicherheitssystem und einer sogenannten „Baseline“. Diese Baseline ist definiert als eine Fahrzeugvariante ohne das zu untersuchende Sicherheitssystem. Die Wirksamkeit E kann sodann allgemein so ermittelt werden:

$$E = 1 - \frac{\bar{M}_S}{\bar{M}_B}$$

M_S ist der arithmetische Mittelwert der gewählten Metrik (s. dazu unten) aller Simulationen mit Sicherheitssystem, M_B jener aller Baseline-Simulationen.

Die durchgängige Simulation liefert für jeden Simulationslauf detaillierte Ergebnisse für das Insassenmodell in Abhängigkeit von der Kollisionskonstellation. Diese Ergebnisse werden für die vorgestellte Studie herangezogen, um zwei Verletzungskriterien zu berechnen: HIC36 [3]

(Head Injury Criterion) und maximale Brusteindrückung Dmax. Für jede dieser beiden Metriken kann bereits eine Wirksamkeit berechnet werden, dies hat allerdings zwei Nachteile:

- Da die Wirksamkeit eine relative Änderung misst, wird keine Aussage über die absolute Höhe getroffen. Ein hoher Wert für die Wirksamkeit sagt noch nichts über Reduktion der Verletzungsschwere aus.
- Mit den einzelnen Werten kann noch keine Gesamtaussage zur Wirksamkeit des Systems getätigt werden.

Der erste Nachteil kann durch die Verwendung entsprechender Verletzungsrisikofunktionen behoben werden. Verletzungsrisikofunktionen stellen einen Zusammenhang zwischen einem Kriterium zur Messung der Verletzungsschwere und einem Verletzungsrisiko her. Im konkreten Fall wurden für ein AIS2+ (AIS, abbreviated injury scale) Kopfverletzungsrisiko und für das AIS2+ Thoraxverletzungsrisiko die jeweiligen Funktionen aus [4] verwendet. Die resultierenden Kurven sind in Bild 2 bzw. Bild 3 zu finden, die zugrundeliegenden Formeln lauten für das Kopfverletzungsrisiko

$$P_{KOPFAIS2+} = N \left(\frac{\ln(HIC36) - 6.96352}{0.84664} \right)$$

wobei N die kumulative Normalverteilungsfunktion ist.

Für das Thoraxverletzungsrisiko lautet die Formel:

$$P_{ThoraxAIS2+} = \frac{1}{1 + e^{(1.8706 - 0.04439 \cdot Dmax)}}$$

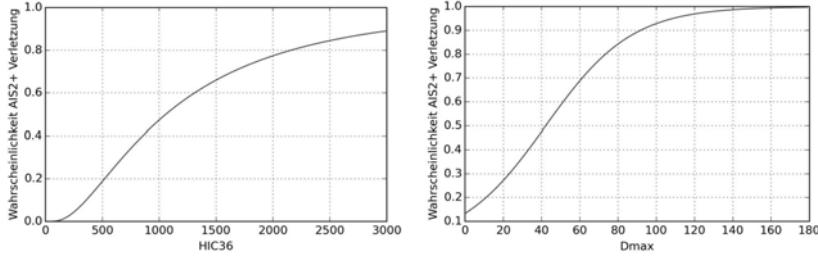


Bild 4: Links: Risiko für eine AIS2+ Kopfverletzung in Abhängigkeit vom HIC-Kriterium nach [4], Rechts: Risiko für eine AIS2+ Thoraxverletzung in Abhängigkeit von der maximalen Brusteindrückung nach [4]

Der zweite Nachteil kann, basierend auf den nun zur Verfügung stehenden Kopf- und Thorax-Verletzungsrisiken, durch die Berechnung eines Gesamtrisikos ebenso behoben werden.

Als Methode dafür wird hier, wie auch von NHTSA [5] vorgeschlagen, die additive Wahrscheinlichkeit nach [6] verwendet:

$$P_{gesamt} = P_{KopfAIS2+} + P_{ThoraxAIS2+} - (P_{KopfAIS2+} * P_{ThoraxAIS2+})$$

wobei $P_{KopfAIS2+}$ die Wahrscheinlichkeit für eine AIS2+ Kopfverletzung, $P_{ThoraxAIS2+}$ jene für eine AIS2+ Thoraxverletzung darstellt.

5. Anwendungsbeispiel

Als Anwendungsbeispiel wurde eine Untersuchung der Wirksamkeit verschiedener Konfigurationen eines Frontalkollisionsschutzsystems durchgeführt. Dieses System besteht aus einem Abstandssensor und einem Algorithmus, der Time-To-Collision(TTC)-basiert eine autonome Bremsung auslöst.

Dazu wurden zuerst mit der oben beschriebenen Methode 10.000 krische Szenarien für den Stadtbereich generiert und diese ohne Frontalkollisionsschutzsystem mit der ebenfalls oben beschriebenen durchgängigen Simulationsmethode simuliert, um die Baseline für diese Untersuchung zu erhalten.

Anschließend wurden die 10.000 Szenarien ebenso mit verschiedenen Konfigurationen des Schutzsystems simuliert. Dabei wurde immer dasselbe Sensormodell mit einem Öffnungswinkel von 10° und einer Reichweite von 150 Metern verwendet. Dieses Modell liefert zu jedem Zeitschritt Relativabstand und -geschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug. Der Auslösealgorithmus berechnet in jedem Zeitschritt aus Relativabstand und -geschwindigkeit die aktuelle TTC und startet bei Unterschreiten einer definierten Auslöse-TTC die autonome Bremsung mit einer definierten Verzögerung.

Es wurde für 3 Varianten eine Sollverzögerung von 4 m/s² gewählt, die Auslöse-TTC zum Starten der Bremsung wurde mit 0.6 s, 0.9 s und 1.2 s gewählt. Des Weiteren wurden zwei Varianten mit unterschiedlicher Sollverzögerung gewählt, einmal mit 6 m/s² bei einer Auslöse-TTC von 0.9 s und einmal mit 10 m/s² bei einer Auslöse-TTC von 0.6 s. Mit diesen Varianten soll untersucht werden, ob sich die relativ frühe Auslösezeit von 1.2 s bei der Standardverzögerung von 4 m/s² (und dem damit erhöhten Risiko von Fehlauslösungen) durch Erhöhen der Sollverzögerung kompensieren lässt.

Nach der Durchführung der Simulationsläufe kann dann die Wirksamkeitsberechnung erfolgen. Aus den durchgeführten Simulationen wurden als Zwischenergebnis die Fahrzeugzustände zum Kollisionszeitpunkt ausgewertet, um eine Aussage über den Einfluss der verschiedenen Varianten auf die Kollisionsrelativgeschwindigkeit der beiden Fahrzeuge treffen zu können. Diese Größe ist entscheidend für den resultierenden Crashpuls.

Die Anteil der vermiedenen Unfälle, die Mittelwerte und die Reduktion der Kollisionsrelativgeschwindigkeit im Vergleich zur Baseline sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Relativgeschwindigkeiten zum Kollisionszeitpunkt

	TTC 0.6s a 4m/s ² (V1)	TTC 0.9s a 4m/s ² (V2)	TTC 1.2s a 4m/s ² (V3)	TTC 0.9s a 6m/s ² (V4)	TTC 0.6s a 10m/s ² (V5)
Vermeidung [%]	1	4	14	19	8
Mittelwert [km/h]	33	28	24	23	26
Reduktion zur Baseline [km/h]	-6	-10	-14	-15	-12

Es lassen sich aber auch detailliertere Aussagen aus den Daten gewinnen. So können zum Beispiel auch Aussagen über die Verteilungen der Kollisionsrelativgeschwindigkeit gemacht werden. Bild 5 enthält dazu Histogramme für alle Varianten, Tabelle 2 die relativen Anteile verschiedener Geschwindigkeitsbereiche.

Tabelle 2: Anteile der Kollisionsrelativgeschwindigkeiten für drei Geschwindigkeitsbereiche

	TTC 0.6s a 4m/s ² (V1)	TTC 0.9s a 4m/s ² (V2)	TTC 1.2s a 4m/s ² (V3)	TTC 0.9s a 6m/s ² (V4)	TTC 0.6s a 10m/s ² (V5)
$\Delta v_{rel} > 50\text{km/h}$	3%	0%	0%	0%	0%
$50 > \Delta v_{rel} > 10\text{km/h}$	93%	91%	78%	74%	85%
$\Delta v_{rel} < 10\text{km/h}$	4%	9%	22%	26%	15%

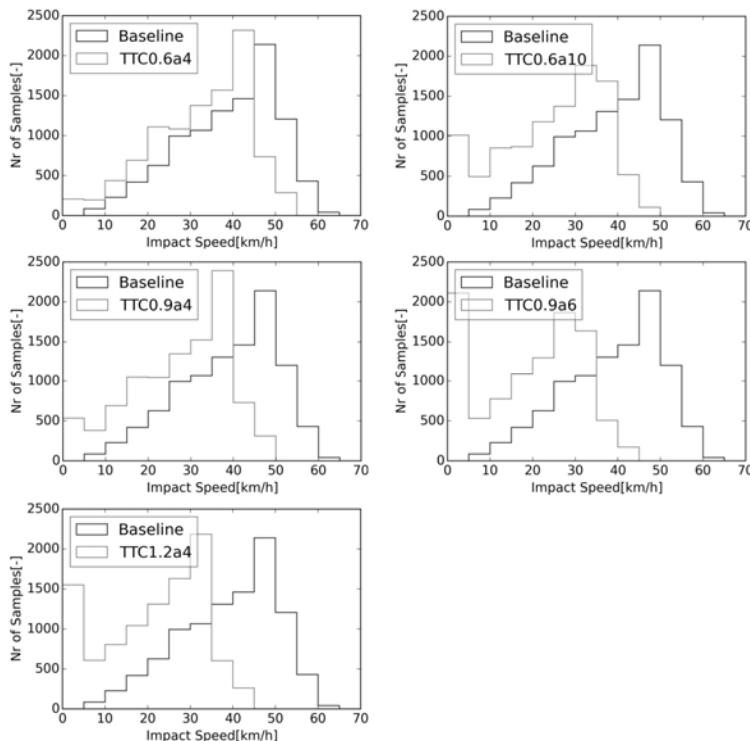


Bild 5: Verteilungen der Kollisionsrelativgeschwindigkeiten

Die eigentliche Wirksamkeitsbewertung erfolgt, wie beschrieben, anhand der Reduktion des Verletzungsrisikos. Die Werte hierfür und die Zwischenergebnisse (Reduktion HIC36, Reduktion Brusteindrückung, Kopf- und Thorax-Verletzungsrisikoreduktion) sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Hiermit lässt sich nicht nur eine qualitative Reihung der Varianten, sondern auch eine Quantifizierung der Unterschiede vornehmen. Eine graphische Darstellung der Ergebnisse in Form von Box-Whisker Plots ist in Bild 6 (Verletzungskriterien) bzw. Bild 7 (Verletzungsrisiken) zu finden.

Aus den Ergebnissen ist zu sehen, dass sich die frühe Auslösezeit von 1.2s (Ergebnis V3) durch Erhöhen der Sollverzögerung kompensieren lässt (siehe Ergebnis V4). Allerdings sind dem Grenzen gesetzt, da bei V5 die ursprüngliche Reduktion des Gesamtverletzungsrisikos trotz Maximalverzögerung nicht erreicht werden kann.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wirksamkeitsbewertung der 3 Varianten

	TTC 0.6s a 4m/s ² (V1)	TTC 0.9s a 4m/s ² (V2)	TTC 1.2s a 4m/s ² (V3)	TTC 0.9s a 6m/s ² (V4)	TTC 0.6s a 10m/s ² (V5)
Reduktion HIC 36	-46%	-64%	-77%	-80%	-70%
Reduktion Brusteindrückung	-20%	-33%	-48%	-53%	-40%
Reduktion AIS2+ Kopf-Verletzungsrisiko	-83%	-97%	-100%	-100%	-98%
Reduktion AIS2+ Thorax-Verletzungsrisiko	-12%	-19%	-27%	-30%	-23%
Reduktion AIS2+ Gesamtrisiko	-13%	-21%	-29%	-31%	-25%

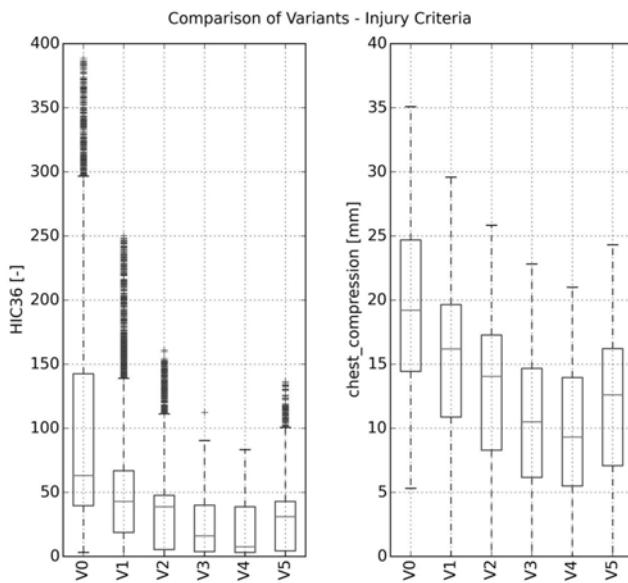


Bild 6: Box-Whisker Plots der beiden herangezogenen Verletzungskriterien für alle Varianten

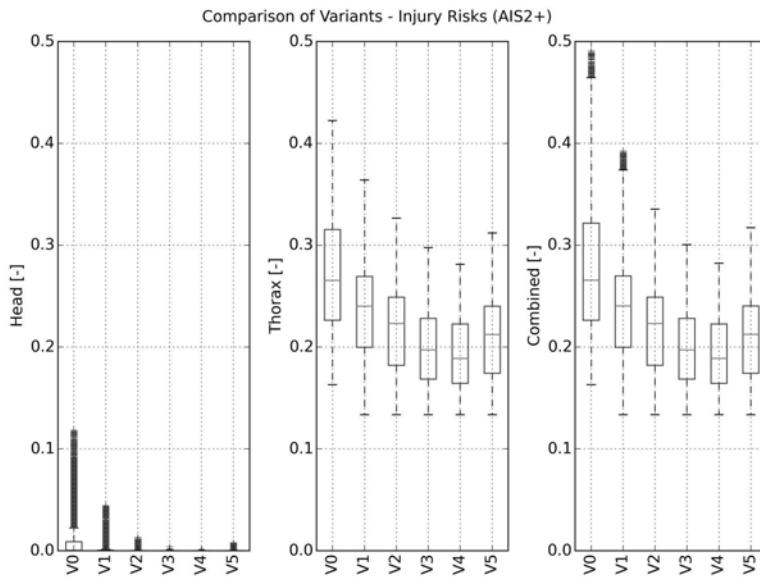


Bild 7: Box-Whisker Plots der AIS2+ Verletzungsrisiken für alle Varianten

6. Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde eine durchgängige Methode zur Verletzungskriterien-basierten Wirksamkeitsbewertung aktiver Sicherheitssysteme unter realitätsnahen Einsatzbedingungen vorgestellt. Die Methode beinhaltet die Erzeugung kritischer Szenarien zur Darstellung realitätsnaher Testbedingungen für das System, eine durchgängige Simulationsmethode vom normalen Fahrzustand bis in den Crash und eine Verletzungskriterien-basierte Wirksamkeitsbewertung.

Durch die große Anzahl an Testszenarien und deren Repräsentativität für das reale Unfallgeschehen wird das Verhalten des Sicherheitssystems nicht nur in typischen, sondern auch in selten vorkommenden kritischen Situationen untersucht.

Die durchgängige Simulation ermöglicht die Kombination der beiden üblicherweise getrennten Simulationsbereiche Pre-Crash und In-Crash und damit die gesamtheitliche Betrachtung verschiedenster Sicherheitssysteme (aktiv, passiv, integral). Des Weiteren erlaubt der modulare Ansatz der Methode durch Kopplung von Teilmodellen zur Gesamtsimulation den einfachen Austausch einzelner Module, z.B. Radarsensormodell gegen Kamerasensormodell o-

der „einfaches“ gegen „komplexes“ FE-Crashmodell. Damit lässt sich die Simulation einfach an den Entwicklungsprozess anpassen.

Die Verletzungskriterien-basierte Wirksamkeitsbewertung wiederum ermöglicht den einfachen quantitativen Vergleich verschiedenster Sicherheitssysteme, da für alle Typen von Systemen immer die gleichen, bereits anerkannten Verletzungskriterien herangezogen werden. Die gewählten Verletzungskriterien spiegeln auch die passiven Eigenschaften des Fahrzeugs wider und erlauben damit fahrzeugspezifische Aussagen. Methoden, die das Verletzungsrisiko nur auf Basis von Kollisionsparametern ermitteln, erlauben dies hingegen nicht. Mit der vorgestellten Methode lassen sich, wie im Anwendungsbeispiel dargestellt, nicht nur verschiedene Systeme oder Systemvarianten unmittelbar hinsichtlich Wirksamkeit bzw. Verletzungsrisiko vergleichen sondern auch Abschätzungen für optimale Parameter durchführen.

- [1] Eichberger, A., Zukancic, A. & Wimmer, P.: Erstellung generischer Unfallszenarien für die Effektivitätsbewertung aktiver Sicherheitssysteme am Beispiel Notbremsassistent, 2015, 5. Jahrestagung der GMTTB (Gesellschaft für Medizinisch Technische Traumabio-mechanik)
- [2] Wimmer, P., Rieser, A., Eichberger, A., Domsch, C. & Gruber, C-M.: Entwicklung einer Simulationstoolkette zur Effektivitätsbewertung integraler Sicherheitssysteme, 2011, Fahrzeugsicherheit - Fokus Elektromobilität. Düsseldorf: VDI-Verl., Vol. 2144, p. 389-396 (VDI-Berichte)
- [3] Arbeitskreis Messdatenverarbeitung Fahrzeugsicherheit: Crash- Analyse- Beschreibung der Kriterien Version 2.1.1. Bergisch Gladbach, Mai 2008
- [4] Eppinger R., Sun E., Bandak F., Haffner M., Khaewpong N., Maltese M., Kuppa S., Nguyen T., Takhounts E., Tannous R., Zhang A., Saul R.: Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems-II. NHTSA, November 1999
- [5] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION, et al.: Consumer Information: New Car Assessment Program: Notice, *Federal Register*, 2008, 73. Jg., Nr. 134, S. 40015-40050
- [6] Wackerly DD., Mendenhall W., Scheaffer RL.: Mathematical statistics with applications, 6.th ed. Pacific Grove, Calif. [u.a.]: Duxbury 2002

Vision Zero: Crash tests no obsolescent model, but indispensable grounding of vehicle safety moon

Dipl.-Ing. **Bernhard Maier**, IAV Fahrzeugsicherheit GmbH & Co. KG

Zusammenfassung

Im automobilen Umfeld sind die Elektromobilität und das Autonome Fahren in der Öffentlichkeit derzeit die beherrschenden Themen. Gerade letzteres wird teilweise als Allheilmittel auf dem Weg zur Vision Zero, dem Straßenverkehr ohne Unfalltote oder Schwerverletzte, dargestellt. Natürlich ist die Reduzierung des Einflusses menschlicher Unzulänglichkeiten durch Fahrzeugsensorik und externe Informationsquellen zur Unfallvermeidung in kritischen Situationen ein vielversprechendes Szenario. Hierbei wird aber oft übersehen, aus welchen Verkehrsteilnehmern (knapp die Hälfte der Verkehrstoten sind ungeschützte Verkehrsteilnehmer) sich der reale Straßenverkehr zusammensetzt und wie lange die flächendeckende Übernahme von Neuerungen in diesem Konglomerat benötigt. Selbst bei 100%-Ausstattungsgrad der Fahrzeuge existieren weiterhin die Restriktionen der Infrastruktur und unvermeidbare Konflikte mit unvernetzten bzw. unvernetzbaren Personen oder Objekten in der Verkehrsumgebung.

Deshalb ist es wenig verwunderlich, dass sowohl die Legislative als auch die Verbraucherschutzorganisationen die Vorgaben an die klassische passive Sicherheit aktuell und zukünftig an das sich wandelnde Unfallgeschehen anpassen und weiter verschärfen. Als Beispiel seien hier die zusätzlichen Anforderungen an die Rückhaltesysteme für die Rücksitzplätze und die Crashkonfigurationen mit zwei bewegten Kontrahenten sowie mit geringer Überdeckung zu nennen. Zur Verbesserung und Ausweitung der aufzeichbaren Messgrößen im Crash werden neue Dummy-Modelle wie der THOR eingesetzt und Vorauslegungen von Systemen auch mit Simulationsmodellen des menschlichen Körpers durchgeführt. Als letzter Schritt in der Unfallwirkkette kann der Zeitraum vom Eintreten des Unfalls bis zu einer personalisierten medizinischen Versorgung vor Ort über weiterentwickelte Notrufsysteme verkürzt und optimiert werden.

Um diesen aktuellen Entwicklungen Rechnung tragen zu können, hat IAV Fahrzeugsicherheit mit ihrer zweiten Crashanlage in Großmehring bei Ingolstadt die Möglichkeit geschaffen, durch die neuartige Konfiguration und Integration aller Systeme flexibel auch auf zukünftige Anforderungen reagieren zu können. Hierzu gehören die 40 x 30 m stützenfreie Crashhalle, in der

neben den Standardversuchen auch Car-to-Car- und Rollover-Konfigurationen abgetestet werden können. Ein spezielles Sicherheitskonzept ermöglicht nach der Prüfung von Hochvolt-Elektro- oder Hybrid-Fahrzeugen eine Erfassung von kritischen Schadstoff- und Temperaturanstiegen, um eine Gefährdung des Bedienpersonals und der Infrastruktur auszuschließen. Das Konzept soll zukünftig auch für den Test von Wasserstoff- und Brennstoffzellenfahrzeugen erweitert werden.

Ein zentrales benutzeroptimiertes Bedienkonzept, eine automatisierte Lichttechnik sowie ein optimales Raumkonzept reduzieren den notwendigen Zeit-, Personal- und Energieaufwand.

Bedarfsermittlung

Aufgrund einer stark wachsenden Modellvielfalt und der Erschließung neuer Märkte mit zusätzlichen Fahrzeugvarianten wächst die Anzahl der Fahrzeugentwicklungen und Derivate. Allein dadurch erhöht sich die Anzahl der durchzuführenden Crashversuche bei den OEM's deutlich. Verstärkt wird dies noch durch neue gesetzliche Anforderungen und zusätzlich durch gestiegene Vorgaben der Verbraucherschutzorganisationen weltweit, wie z.B. Euro-NCAP, IIHS in USA und erhöhte Sicherheitsstandards bei den OEM's.

Hinzu kommt die Entwicklung von Electric Vehicle (EV), Hybrid Electric Vehicle und alternativen Antrieben, was zu einer weiteren deutlichen Steigerung von Serienstarts von Hybridfahrzeugen und gleichzeitig Erstanläufen von EV derzeit und in den nächsten Jahren führt.

Grundlegende strukturelle Unterschiede verursachen in Hinsicht auf die Fahrzeugsicherheit erhöhte Anstrengungen bei der Abstimmung von E-Fahrzeuge. Für eine ausreichende Reichweite ergibt sich ein im Vergleich zum Kraftstofftank nicht unerhebliches Zusatzgewicht, das über die abgestimmten Deformationsbereiche mit verzögert werden muss. Ein deutlich vergrößertes Volumen der elektrischen Energiespeicher, die aufgrund ihres Aufbaus aus Einzelzellen nicht so beliebig geometrisch angeordnet werden können wie ein flüssigkeitsgefüllter Hohlkörper, erschweren bei vorgegebenen Reichweiten der Fahrzeuge die crashoptimierte Positionierung außerhalb der Deformationszonen.

Eine Beschädigung einzelner Batteriezellen im Unfall muss für die Auslegungslastfälle vermieden werden. Deshalb ist es im Gegensatz zu der rein mechanischen Überprüfung der Tankdichtigkeit nach einem Crashversuch gut vorstellbar, dass es zukünftig ebenfalls einzuhaltende batterie-spezifische Belastungsgrenzen für verschiedene verwendete Batterietypen geben könnte.

Heutige Lithium-Ionen-Batterien werden zum Schutz üblicherweise mit einem sehr steifen Rahmen umgeben, der Verformungen der Batteriestruktur ausschließen soll, damit aber ebenfalls das Deformationsverhalten des Gesamtfahrzeugs beeinflussen. So könnte eine im Fahrzeugboden eingebaute Batterie, durch eine schlecht abgestimmte Steifigkeitszunahme in diesem Bereich bei einem seitlichen Pfahlaufprall zu einem verstärkten Ankippen des Fahrzeugs führen, das sich negativ auf die Intrusionen in Dach- und damit im Kopfbereich des Insassen auswirken könnten.

Weiter erhöhen werden sich die zukünftigen Prüfumfänge durch den zunehmenden Einzug von Teilsystemen auf dem Weg zum Autonomen Fahren. Vorgelagerte Eingriffe von Sicherheitssystemen können zum einen zu Abweichungen der Insassenposition von der derzeitigen genormten Sitzposition in Crashversuchen führen, was bei der Abstimmung der Systeme mitberücksichtigt werden muss. Gleichermaßen gilt durch die zunehmende Entbindung des Fahrers von der Fahraufgabe, wodurch sich ihm, ähnlich wie jetzt schon bei den übrigen Fahrzeuginsassen möglich, größere Freiheiten bei der Sitzposition und den Nebentätigkeiten erschließen. Mit dem prognostizierten Einzug von Dreh- und Liegesitzen ins Fahrzeug wird sich zukünftig ein zusätzlicher Aufwand bei der Entwicklung und Abstimmung von geeigneten Rückhaltesystemen ergeben.

Auch ohne dieses Zusatzaufkommen an Sicherheitsversuchen sind die OEM-eigenen Crash-Anlagen bereits seit Jahren nicht immer in der Lage, sämtliche benötigte Versuche selbst durchführen zu können. Deshalb werden sehr viele Versuche extern an Dienstleister in Deutschland oder im europäischen Ausland vergeben. Dies erzeugt in diesem schnelllebigen Geschäft natürlich hohen Kosten- und Zeitaufwand für den Fahrzeugtransport und die Dienstreisen der involvierten Mitarbeiter. Probleme in der Kommunikation und langfristige Reaktionszeiten sind dadurch ebenfalls vorprogrammiert.

All diese Veränderungen führen gerade durch die Ballung von vielen Fahrzeugherstellern im Süden von Deutschland zu Problemen bei einem signifikanten Anstieg der benötigten Versuchskapazitäten für Crashversuche.

Aus diesen Umständen heraus besteht bei den Herstellern der Wunsch nach Fremdleistung vor Ort, d.h. zusätzlich zur eigenen Anlage noch eine zweite Crashanlage in der Nähe zu haben.

Selbst wenn die Crashkapazität ausreicht, ist eine externe Vergabe eines Anteils der Versuche aus Gründen der Vergleichbarkeit und Ermittlung der Streuung gängige Praxis.

Durch die Investition in den Bau ihrer zweiten Crashanlage kann IAV Fahrzeugsicherheit am Umfang der im Süden benötigten Versuche partizipieren und gleichzeitig durch eine flexible Verteilung der anstehenden Versuche mit der in Gifhorn seit 15 Jahren bestehenden Crashanlage die Bearbeitungszeiten reduzieren und Lastspitzen abfedern.

Nach einer Sondierung mit den im Süden ansässigen Herstellern und einer Bedarfsermittlung von ca. 400 Versuchen pro Jahr wurden zeitgleich als ersten beiden Schritte ein geeigneter Standort mit kurzen Wegen gesucht und die am neuen Standort benötigten Leistungsumfänge definiert. Nach erfolgter Abschätzung der benötigten Flächen fiel die Entscheidung letztendlich auf ein Grundstück im Interpark Großmehring, 10 km nordöstlich von Ingolstadt.

Benötigte Leistungsumfänge

Als verfügbare Leistungen sollen am neuen Standort neben allen in Gifhorn verfügbaren Crash-Leistungen auch zusätzliche Prüfumfänge wie der Rollover angeboten werden können.

Hierzu sind die notwendigen folgenden Arbeitsschritte in einem räumlich und zeitlich optimierten Ablauf mit minimalem Personaleinsatz zu bearbeiten. Alle Arbeiten müssen auch an Fahrzeuge mit alternativen Antrieben (Elektro, Brennstoffzelle etc.) durchgeführt werden können. Die notwendigen Teilumfänge sind:

Vorbereitung des Fahrzeugs

- Entsorgung von Betriebsflüssigkeiten (Motoröl, Getriebeöle, Servoöl, Kraftstoff, Kühlflüssigkeit, Klimaflüssigkeiten, Einfüllen Ersatzbenzin je nach Anforderung)
- Fahrzeug-Bordnetz prüfen, Steuergeräte auslesen und dokumentieren, Hardware- und Software-Stand ermitteln und dokumentieren
- Aufbereitung eines Fahrzeuges mit Vorschädigung durch Austausch der vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Teile oder Schweißarbeiten (separate Ausweisung notwendig)
- Fahrzeug-Unterboden und Anbauteile lackieren (Karosserie -Struktur, Fahrwerksteile, Antriebsstrang)
- Messraster und Crashnummer anbringen, Einstellen Reifendruck, Fahrwerk vermessen und einstellen
- Bestimmung der H-Punkte
- Batterietrennschalter verbauen
- Fahrzeug-Crashgewicht einstellen, Einbau der Gewichte, Halterungen Dichtigkeitsprüfung Kraftstoffsystem

Struktur und Innenraum

- Anbauteile wechseln bzw. umbauen: (z.B. Türen, Klappen, Kotflügel)
- Innenraum abrüsten und Neuaufbau

Sicherheitselektronik

- Airbagsensorik wechseln bzw. umbauen (ZAE, Upfront-Sensoren, Drucksensoren)
- Airbags, Gurtstraffer mit Timerverkabelung versorgen
- Airbagsensorik codieren
- Parametersatz aktualisieren, Komponentenschutz

Messtechnik

- Messaufnehmer (Beschleunigung, Weg, Druck etc.) und Kontaktmesstechnik verbauen und auf Funktion überprüfen
- Einbau Notbremse

Zusätzliche Umfänge HV-Fahrzeuge

- Außerbetriebnahme
- SW-Updates der einzelnen HV-Komponenten Einbau Messadapter/ Messtechnik Einbau Temperatur-Sensoren
- Fehlerbehebung bzw. entsprechender Umbau mit externer Leistungselektronik/ Komponenten
- Inbetriebnahme
- Batterieausbau nach Versuch

3D-Koordinatenmessung des Fahrzeuges

- Prototypenvermessung nach Messauftrag (taktile)
- Serienvermessung nach Messauftrag (taktile)
- 3D-Scan (optisch, berührungslos)

Versuchsdurchführung

- H-Punktvermessung mit 3D-Koordinaten (AICON DPS-System)
- Einsetzen der Dummys
- Vorbereiten der Barriere inkl. Defo-Barriere
- Aufbau der Filmgrube, Messtechnik und Kameras.
- Fahrzeugpositionierung auf der Crashbahn
- Erste Ergebnisse nach Checklisten/ Arbeitsanweisungen abarbeiten und dokumentieren
- Bilderdokumentation 50 Fotos digital vor/ 50 Fotos nach Durchführung
- Crash Dummy/ Sitz Koordinatenvermessung (3D-Messarm)
- Dummy - manuelle Vermessung/ Kontrolle (Maßband)
- Crashgewicht ermitteln (komplett inkl. Dummy)
- Anlagen und Messtechnik-Checks und Dokumentation erstellen

Analyse nach Crash

- Alle Messdaten und Bilddaten im ISO-MME-Format erfassen
- Türöffnungskräfte messen
- Test Tankdichtigkeit durchführen (statischer Roll-Over; nach Crash)
- Feststellen der Batterieintegrität
- Datenauswertung (auch mit auftragsgeberspezifischen Tools)
- Übergabe der notwendigen Daten direkt in die entsprechenden Systeme des Auftraggebers (Systemzugänge notwendig)

Abzubildende Lastfälle

Um die obenstehenden Arbeiten für alle Antriebskonzepte in den geforderten nachfolgenden Crashlastfällen durchführen zu können, wurden weiterhin die hierfür notwendigen Anlagen-, Antriebs- und Gebäudeparameter festgelegt.

Testübersicht

Abdeckung aller Gesetzes-Tests (EU, US und RdW)

- ECE-R94, ECE-R95
- Alle Umfänge FMVSS 208
- Alle Umfänge FMVSS 214
- Alle Umfänge FMVSS 201

Abdeckung aller Verbraucherschutztests (EU, US und RdW)

- Alle Umfänge NCAP
- IIHS Front/ Seite/ Small Overlap
- ATZ/ RCAR

Berücksichtigung zukünftiger Tendenzen

- Oblique Pole
- Car to Car
- Rollover
- Böschungsrampe (bis zu einer Fahrzeughöhe von 2,70 m)
- Sandbett
- Flying Floor
- Fahrzeuggroll
- Automatischer Notruf (eCall)

Firmenspezifische Vorgaben

- Front/Seite/Heck/Rollover
- Car to Car
- Car to Pole
- Sensortests

Antriebsparameter

Aus den abzubildenden Lastfällen ergeben sich die Antriebsparameter:

- Aufprallgeschwindigkeit 120 km/h bei maximalem Versuchsträgergewicht von 3,5 t
- Minimale Aufprallgeschwindigkeit 4 km/h
- Zulässige Geschwindigkeitstoleranz beim Aufprall: $\pm 0,2$ km/h
- Maximale Anfahrbeschleunigung Versuchsträger 0,3 g

Der ermittelten Randbedingungen wurden frühzeitig beim Hallenlayout und den Eigenschaften des zu beschaffenden Tests- und Messequipments berücksichtigt.

Anlagenparameter

Daraus resultieren die notwendigen Anlagen-Anforderungen:

- Anlaufbahnlänge 130 m
- Seitlich linear verschiebbarer Aufprallblock mit zweiter Ankerposition
- Reibwert der Crashbahn nach FMVSS 571.208 oder SRT-Wert (DIN EN 13036-4) von >15 bzw. <45
- Fahrzeuganlieferung auf Abstellplatz mit Vorhaltkapazität von ca. 30 – 40 Fahrzeugen
- Transport zu testende Fahrzeuge zur Vorbereitung in die Werkstattboxen über einen zentralen Transportgang
- 5 getrennte Werkstattboxen mit angegliederten Kundenbüros für die parallele Vorbereitung von insgesamt 24 Fahrzeugen
- separate abgetrennte Arbeitsräume für Schweißarbeiten, HV-Fahrzeuge, Kameratechnik, Messtechnik, Dummytechnik, Lager, Achsvermessung und Waage, taktile Fahrzeugvermessung sowie 3D-Flächen-Scan (Creaform)
- Leitstand mit angegliedertem Besprechungsraum und 3 Besucherräumen mit Blick auf Aufprallbereich
- Büroräume im Obergeschoss
- Fahrzeugklimatisierung vor Crash in Startposition (Klimakammer)
- Rücktransport nach Crash in Werkstattbox mit Stringo bzw. Stapler (ggf. in Querposition, je nach Zustand)
- Zwischenlagerung Crashfahrzeuge bis zur Abholung durch den Kunden in der Anlieferhalle
- Kalthalle für Sonderversuche mit weit ausladenden Fahrzeugbewegungen
- Sicherheitskonzept für HV-Batterietechnik sowie Erweiterbarkeit auf Wasserstoff-/Brennstoffzellenfahrzeuge (Bei Hochvolt-Fahrzeugen kann ein kritisches Fahrzeug über Wärme und Chemikalienanalyse durch eine Außentor im Aufprallbereich direkt in den Außenbereich gebracht und dort überwacht werden)

- Bei Test mit quer Aufprallsituationen simulierten Hochvolt-Fahrzeuge werden nach Crash die relevante Batterie-Temperatur bzw. austretende Gase mit einem ferngesteuerten Roboter (Bild 1) überwacht
- Nachgelagerte Angliederung einer zusätzlichen Schlittenanlage



Bild 1: Roboter zur Temperatur und Gasmessung

Gebäudeparameter

Hieraus wurden direkt die folgenden Gebäudeparameter abgeleitet:

- Gebäude: Länge 220 m x Breite 60 m x Hallenhöhe 10 m
(inkl. Rollover-Halle Länge 70 m x Breite 40 m)
- Höhe Aufprallbereich: ca. 10 m
- Höhe restliche Gebäudefläche: ca. 5 m
- Breite Anlaufbahn: 10 m
- Maße stützenloser Aufprallbereich: 30 m x 40 m
- Crashblock 100 t mobil verfahrbar
- Maße Startbereich: ca. 15 m x 15 m
- Bürofläche: ca. 400 m²
- Raumklima: 20 – 26 °C
- Klimazelle im Startbereich: 20,6 bis 22,0 °C
- Dummywerkstatt separat klimatisiert: 20,6 bis 22,0 °C
- 5 t-Bekranung im Aufprallbereich
- Messring LED High Speed Filmbeleuchtung 64 kW
- Filmgrube im Aufprallbereich, Maße: Länge 8 m x Breite 3 m x Höhe 4 m, kavernenförmig
- Filmgrube im Verbund mit Crashblockfundament
- Filmgrube transparent (Polycarbonat) abgedeckt
- Zutritt Vorbereitungs- und Analyseräume durch Türschließanlage einzeln sicherbar
- Prototypensicherheit nach Kundenvorgaben

Auf Basis dieser Festlegungen wurde unter dem Gesichtspunkt der kurzen Wege und optimierten Abläufe in der Versuchsvor- und -nachbereitung ein Bauentwurf gezeichnet und in mehreren Schleifen optimiert.

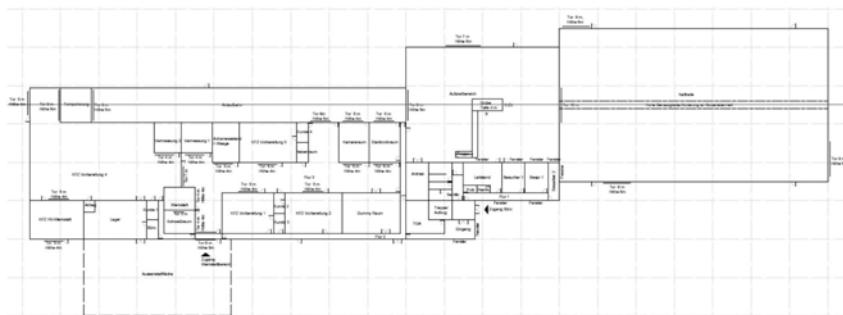


Bild 2: Überblick Crashanlage Ingolstadt

Erste Bodenarbeiten auf dem Grundstück erfolgten im Mai 2016 in Form archäologischer Untersuchungen. Nach Funden von Bronzeringen, Pfeilspitzen, Glas- und Bernsteinperlen kam es zu weitreichenden Grabungen, die ebenso wie die Frostperioden im Winter einen deutlichen Einfluss auf den Terminplan nahmen.



Bild 3: Archäologische Untersuchungen und gefundene Artefakte [ProArch GmbH]

Nach deren Abschluss konnten zwischen Dezember und April trotz einer ausgedehnten Frostperiode Fundamentarbeiten durchgeführt, die Fertigbetonelemente gesetzt und der Stahlbau mit den Wänden, den Dächern und den Bodenplatten vollendet werden.

Ab März begann die Firma Messring parallel zum Innenausbau mit dem Einbau den crashspezifischen Elementen des Schienensystems und dem Guss des Crashblocks.

Das Richtfest konnte Anfang April gefeiert werden und die Übergabe des Gebäudes an IAV Fahrzeugsicherheit erfolgte nach Abschluss der Innenarbeiten Ende Juli dieses Jahres.



Bild 4: Ansicht Gebäudekomplex

Crashtechnische Ausstattung

Letztendlich wurde die folgende crashtechnische Ausstattung realisiert.

- Elektrischer Antrieb
- Micro Track Seilwagensystem
- Mobiler Block in 2 Verankerungspositionen
- Filmgrube
- Flying floor
- Rollover Testschlitten
- Sämtliche feste und mobile Barrieren
- Fahrzeugbremsen
- Lichtschranksystem zur Geschwindigkeitsmessung
- Anlagensteuerung Crashsoft 3
- Schleppkabelsystem
- Triggersystem
- LED Crashbeleuchtung
- MBus Pro Datenerfassung
- Kraftmesswand 1 x 2 m, 128 Zellen
- Achsmessstand und Fahrzeugwaage
- Beschleunigungsschlitten in Vorbereitung



Bild 5: Crashtechnische Ausstattung durch Messring

Parallel-Betrieb

Da in Gifhorn schon eine Anlage mit ähnlichen Abmessungen und Kapazitäten seit 15 Jahren existiert und für den norddeutschen Raum gewinnbringend betrieben werden konnte, ist es vorteilhaft, in Ingolstadt eine moderne Schwester zu Gifhorn zu realisieren.

Da somit die an den beiden Standorten verwendeten Komponenten kompatibel und damit austauschbar ausgelegt sind, kann die zweite Anlage in Ingolstadt darüber hinaus über eine flexible Verwendung von Dummy-, Mess- und Kameratechnik, sowie in die gleichen Systeme eingearbeitetem Personal einen Ausgleich von Lastspitzen und eine effiziente Auslastung ermöglichen. Hierdurch können anfallenden Aufträge zeitsensibler durchgeführt werden und Kapazitäten angepasst werden.

Die verwendeten Systeme in beiden Anlagen zeigt die folgende Abbildung.

	Gifhorn	Ingolstadt
	1 Crashanlage, 2 Schlittenanlagen	1 Crashanlage + Rolloverbereich
Kameras	Stand: 14 PCO, 5 HG 100k, 4 Olympus Onboard: 12 AOS	Stand: 15 PCO (einheitlich) Onboard: 12 AOS
Messtechnik	M-Bus Pro: 5 Stk., NA 33: 4 Stk. Sensoren: >1000 Kanäle	M-Bus Pro: 6 Stk. Sensoren: >2000 Kanäle
Dummies	Dummies (DTI instrumentiert) <ul style="list-style-type: none"> • HIII 50%: 10 • HIII 5%: 4 • ES2: 2 • SIDlIs: 2 • Q6: 1 • Q10: 1 • WorldSID 50%: 2 • Dummy-Labor 	Dummies (DTI instrumentiert) <ul style="list-style-type: none"> • HIII 50%: 6 • HIII 5%: 4 • (ES2: Ausleihe Gifhorn) • SIDlIs: 2 • Q6: 1 • Q10: 1 • WorldSID 50%: 1 • THOR Dummy 1 (geplant) • Dummy-Labor (in Vorbereitung)
Anlagen- komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • Kraftmesswand Messring • HV Equipment • Fzg. Grill statisch • Flying Floor • Sämtliche mobile Barrieren 	<ul style="list-style-type: none"> • Kraftmesswand Messring • HV Equipment • Fzg. Grill statisch • Flying Floor • Sämtliche mobile Barrieren • Rollover Equipment

Bild 6: Mess- und kameratechnische Ausstattung beider Crashanlagen

Vorteile:

- Austausch des kompletten Equipments möglich (Kameras, Messtechnik, Sensoren, Kraftmesswand, Dummies, Werkzeug, HV-Equipment, Barrieren, Defoelemente usw.)
- Bei Anlagenausfall oder defektem Equipment sofortiger Ersatz verfügbar
- Beide Anlagen von der Firma Messring aufgebaut und betreut
- Vereinfachter Austausch und Erhöhung des Personals an einem Standort
- Verlagerung der Kapazität bei Urlaub/ Krankheit
- Kapazitätserweiterung bei Engpässen

- Gleiche Prozesse im gesamten Crashbetrieb
- Nahezu gleicher Ausbildungsstand des Personals
- Entfernung 550 km, ca. 5 Std. Fahrzeit
- Vor Anlauf der Anlage Ingolstadt Schulung in Gifhorn
- Erweiterte Rollover-Testmöglichkeiten (Bild 7)



Bild 7: Erweiterte Rollover-Ausstattung in Großmehring

Die notwendige Flexibilität der Mitarbeiter sowie die erforderlichen kurzen Wege zu den Kollegen der Engineering-Abteilungen werden seit kurzem auch durch eine geänderte Unternehmensstruktur verstärkt, in der die Entwicklungs-Ingenieure des IAV-Fachbereiches TB-V mit den Abteilungen Fahrzeugsicherheit, Insassen- und Partnerschutz sowie Sicherheitselektronik mit den Mitarbeitern der beiden Crashanlagen im Unternehmen IAV Fahrzeugsicherheit GmbH & Co. KG zusammengefasst wurden.

Abschließend zeigt die folgende Abbildung Meilensteine der Entwicklung der IAV Fahrzeugsicherheit seit der Gründung im Jahr 2000.

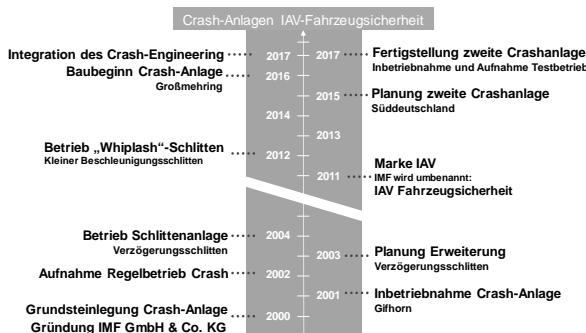


Bild 6: Geschichte der IAV-Fahrzeugsicherheit

Herausforderungen, Anwendungsfälle und Zukunftstechnologien für einen besseren Radfahrerschutz mit hochauflösenden Automobilradaren

M.Sc. **Mingkang Li**, Dr.-Ing. **Martin Kunert**,

Robert Bosch GmbH, Leonberg;

Dr.-Ing. **Roman Henze**, Technische Universität Braunschweig,

Institut für Fahrzeugtechnik, Braunschweig

Kurzfassung

Im Zuge der fortschreitenden Automatisierung im Fahrzeughbereich erhalten Fahrerassistenzsysteme zunehmend Einzug in moderne Kraftfahrzeuge. In diesem Bereich wurden große Fortschritte durch automatische Notbremssysteme erzielt. Diese Systeme adressieren vor allem potentielle Unfallsituationen mit Fahrzeugen im Längsverkehr oder mit querenden Fußgängern.

Eine häufige Unfallursache, die immer mehr in den Fokus der Entwicklung rückt, ist der Zusammenstoß mit querenden und vorbeifahrenden Radfahrern. Von 2018 an wird EuroNCAP neue Szenarien einführen, in denen ein aktives Sicherheitssystem zum Radfahrerschutz bewertet wird. Aktuell beschäftigen sich viele Organisationen, Industriepartner und Verbände mit der Definition möglicher Testszenarien, wozu unter anderem Längs-, Kreuzungs-, Abbiege- und Türöffnungsszenarien gehören.

In diesem Vortrag wird zuerst eine Anwendungsfallanalyse der komplexen und vielfältigen Szenarien durchgeführt. In jedem Szenario werden unterschiedliche Situationen untersucht, die sich weiter in den „sicheren“, „kritischen“ und „potenziell kritischen“ Fall unterteilen lassen. Wenn kein Konflikt zwischen dem Fahrzeug und Radfahrer festgestellt wird, steht eine niedrige Fehlauslösungsrate in erster Priorität für das aktive Schutzsystem, weil die Fehlauslösung sowohl zu einer Störung des Fahrers als auch zu einem potenziellen, unerwünschten Unfall führen kann. Aus diesem Grund muss die Kritikalität der Situation möglichst genau erkannt und bewertet werden.

Für verschiedene kritische Situationen wird eine geeignete Strategie der Warnung und des Noteingriffs konzipiert. Wenn die Kollision durch eine Notbremsung nicht mehr vermeidbar ist, wird zusätzlich ein Ausweichmanöver in Betracht gezogen. Allerdings könnte ein unachtsames Ausweichen auch weitere Kollisionen, beispielsweise mit dem Gegenverkehr oder mit Bebauungen am Straßenrand, verursachen. Deshalb muss die Umgebungsinformation über

den Freiraum und die Bewegung von anderen Verkehrsteilnehmern bei der Aktionsplanung mit berücksichtigt werden.

Unter Einbezug von spezifischen Unfalldaten wird eine Simulation repräsentativer Szenarien durchgeführt, wobei die Anforderungen an die Sensorik und Aktionsplanung genauer untersucht werden. Um die Herausforderungen zu erfüllen, wird ein neues System basierend auf hochauflösenden Automobilradardaten entwickelt. Mit einer großen Menge von detektierten Punkten wird eine Umfeld-Perzeption bis auf der „Pixel-Ebene“ möglich, um die notwendigen Umgebungsinformationen möglichst realitätstreu zu erfassen und der Aktionsplanung zur Verfügung zu stellen.

Abstract

To make our driving safer and our life more convenient, the development of Advanced Driver Assistance System (ADAS) is rapidly gaining its pace. A major advantage of such kind of system is proved e.g. in the application of Autonomous Emergency Braking (AEB), which addresses in advance the potential collision between vehicles in longitudinal direction or between vehicle and crossing pedestrians.

A major part of the accidents are caused by the collision between vehicle and crossing/passing cyclists. From 2018 on, EuroNCAP will introduce new test scenarios to assess the active safety system for cycling protection. Currently, many organizations, industry partners and associations are engaged with the definition of possible test scenarios, including longitudinal, intersection, turning and door opening applications.

In this lecture, an analysis of the complex and diverse scenarios will be carried out. In each scenario, different use cases can be subdivided into the "safe", "critical" and "potentially critical" classes. If there is no conflict between the vehicle and the cyclist, since a false alarm or intervention can disturb the driver or even cause a potential accident, a low false alarm ratio is first priority for the active protection system. For this reason, the criticality of the situation must be assessed as precisely as possible.

For the different scenarios, the corresponding warning and intervention strategies will be developed. If the collision can no longer be avoided by an emergency braking, an evasive maneuver is considered, too. However, a careless evasive maneuver could also cause further collisions, for example with the oncoming traffic or roadside infrastructure. Therefore, the environmental information about the free space and the movement of other traffic participants must be taken into account during the action planning.

The requirements for sensor systems and action planning for the representative scenarios will be analyzed in this lecture. In order to meet these challenges, a new system based on high-resolution automotive radars is developed. With a large number of detection points, an environmental perception is able to be performed on a pixel level, which consequently brings better environmental information to the action planning stage.

1. Einleitung

Im vergangenen Jahrzehnt ist die gesamte Anzahl der Getöteten im Straßenverkehr in der Europäischen Union (EU) stark zurückgegangen. Die Anzahl der getöteten Radfahrer ist diesem Trend jedoch nicht gefolgt. Der relative Anteil der Fahrradtoten an allen Verkehrstoten in der EU ist von 6% im Jahr 2004 auf 8% im Jahr 2014 gestiegen (Bild 1). In Deutschland hat sich dieser Anteil sogar um 50% erhöht (Anteil 2004: 8%; Anteil 2014: 12%). Im Jahr 2014 starben 2.131 Radfahrer bei einem Verkehrsunfall in der EU, wovon allein 396 Unfälle innerhalb Deutschland registriert wurden.

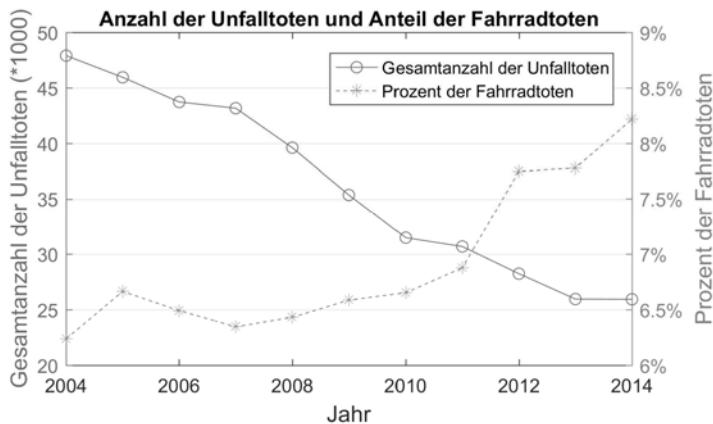


Bild 1: Gesamtanzahl der Unfalltoten und Prozent der Fahrradtoten in der EU vom Jahr 2004 bis zum Jahr 2014 [1]

Im Jahr 2014 war ungefähr die Hälfte der schwerverletzten Radfahrer und mehr als ein Drittel der getöteten Radfahrer an einem Unfall mit einem Personenkraftwagen (Pkw) beteiligt. Für Pkws sind zum Fußgängerschutz bereits einige passive Sicherheitsmaßnahmen entwickelt worden, welche mitunter bereits Einzug in Serienfahrzeuge erhalten haben. Jedoch

profitieren die Radfahrer von diesen passiven Maßnahmen nur wenig [2]. Im Gegensatz dazu können zukünftige aktive Sicherheitssysteme am Pkw wie z.B. ein Notbremsassistent mit Radfahrererkennung viel beitragen. Eine der Hauptaufgaben dieses Systems liegt in der Reduzierung der Unfallschwere, womit die Anzahl an tödlichen Unfällen deutlich gemindert werden kann. Zusätzlich bietet ein solches System noch die Möglichkeit einer Unfallvermeidung. Zur Entwicklung und Auslegung solcher Systeme ist es notwendig, eine Analyse der Herausforderungen und Anwendungsfälle durchzuführen, welche im Folgenden beschrieben wird.

2. Radfahrerunfälle und Testszenarien

Die Radfahrerunfälle mit einem Pkw können durch verschiedene Unfalltypen beschrieben werden. Beispielsweise sind in Bild 2 sechs Unfalltypen dargestellt, die sich durch Verkehrsinfrastrukturen wie z.B. Verkehrsschilder, Ampeln, Radwege und Menge der Kreuzungsarme unterscheiden lassen. Innerhalb des Testgeländes werden die Verkehrsinfrastrukturen bei der Evaluation und Messung des aktiven Schutzsystems normalerweise nur zum Teil repräsentiert und berücksichtigt. Aus diesem Grund werden diese Unfalltypen in einem nachvollziehbaren Szenario zusammengefasst, bei dem ein Pkw an einer Kreuzung nach links abbiegt und ein Radfahrer von der Gegenrichtung die Kreuzung durchfährt.

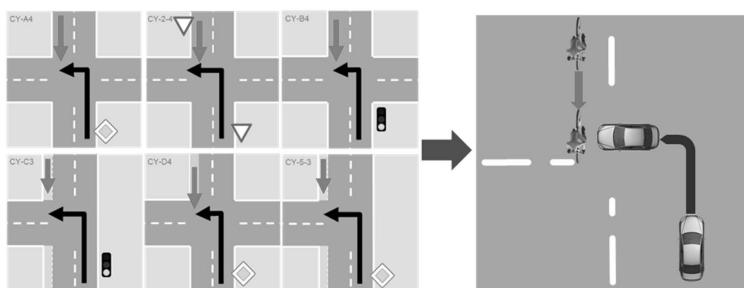


Bild 2: Unfalltypen und zusammengefasstes Testszenario (roter Pfeil: Radfahrer, schwarzer Pfeil: Fahrzeug)

Die Unfallstatistik von jedem einzelnen Unfalltyp wird in der *German In-Depth Accident Study* (GIDAS)-Datenbank festgehalten. Dabei wird neben dem Unfallszenario die Verletzungsschwere der beteiligten Personen berücksichtigt, wodurch ihre Beziehung zu verschiedenen anderen Parametern erkennbar wird [3]. In der GIDAS-Datenbank liegt die Variable „Verletzungsschwere“ als *Police-reported injury severity (PVERL)* in den Ausprägungen „unver-

letzt“, „leicht verletzt“, „schwer verletzt“, „tödlich verletzt“ vor. PVERL 3&4&5 steht für die Verletzungsschwere von mindestens „leicht verletzt“ und PVERL 4&5 für die Verletzungsschwere von mindestens „schwer verletzt“.

Im Rahmen des EU-Projekts *Proactive Safety for Pedestrians and Cyclists* (PROSPECT) wurden 30 wesentliche Unfalltypen ausgewählt, die in neun Testszenarien für Radfahrerunfälle zusammengefasst wurden (Bild 3).

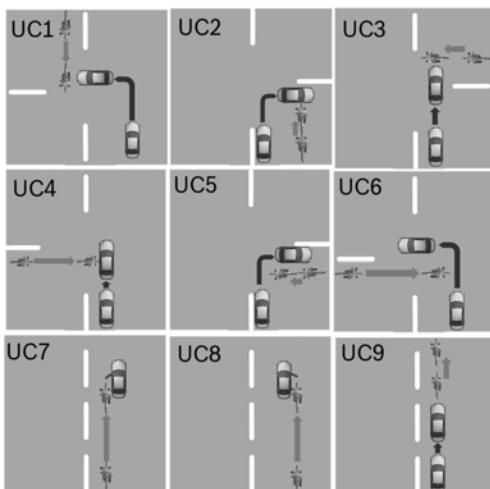


Bild 3: Testszenarien im Projekt PROSPECT [4]

Mit diesen neun Testszenarien werden insgesamt 78% der Unfälle von PVERL 3&4&5 und 81% der Unfälle von PVERL 4&5 abgedeckt (Tabelle 1). Die Testszenarien unterscheiden sich durch die Relativposition und Fahrtrichtung des Fahrzeugs und des Radfahrers. Daraus ergeben sich die Längsszenarien (UC9, engl. *Use Case*), Kreuzungsszenarien (UC3, UC4), Abbiegeszenarien (UC1, UC2, UC5, UC6) und Türöffnungsszenarien (UC7, UC8).

32% der Unfälle (PVERL 3&4&5) zwischen dem Fahrzeug und Radfahrer finden in den Kreuzungsszenarien UC3 und UC4 statt. Der Anteil der Unfälle beim Linksabbiegen beträgt 14% und beim Rechtsabbiegen liegt der Anteil bei 23%. Die verbleibenden 7% der Unfälle werden durch Türöffnungsszenarien verursacht, wobei ein Radfahrer von hinten dicht an einem parkenden Fahrzeug vorbeifährt, während die Fahrzeugtür auf der Fahrer- oder Beifahrerseite geöffnet wird.

Tabelle 1: Anteil der neun Testszenarien

Testszenarien	Anteil PVERL 3&4&5	Anteil PVERL 4&5
UC1	8,3%	8,8%
UC2	5,5%	3,9%
UC3	20,6%	22,4%
UC4	11,6%	15,6%
UC5	17,7%	15,4%
UC6	5,5%	6,0%
UC7	6,1%	5,5%
UC8	1,3%	1,1%
UC9	1,7%	2,5%
Gesamt	78,3%	81,2%

Im Jahr 2016 hat das Projekt *Cyclist-AEB Testing System* (CATS) verschiedene Szenarien zum Radfahrerschutztest definiert [5], die vom *European New Car Assessment Programme* (EuroNCAP) übernommen und im vorläufigen Versuchsprotokoll für das Jahr 2018 veröffentlicht wurden [6]. Analog zum Fußgängerschutztest sind die Längs- und Kreuzungsszenarien enthalten, bei denen die Testgeschwindigkeit des Fahrzeugs und des Radfahrers, die Verdeckung und der Aufprallpunkt definiert werden (Tabelle 2). Das Notbremssystem (engl. *Autonomous Emergency Braking*, kurz AEB) und das Auffahrwarnungssystem (engl. *Forward Collision Warning*, kurz FCW) am Pkw wird in allen definierten Szenarien geprüft und bewertet. Die vorgestellten Szenarien von EuroNCAP sind auch in UC3 und UC9 des Projektes PROSPECT abgedeckt. Innerhalb des nächsten Kapitels werden die Testszenarien des Projektes PROSPECT analysiert.

Tabelle 2: EuroNCAP 2018 und 2020 - Testszenarien zum Radfahrerschutz

	EuroNCAP 2018			EuroNCAP 2020*	
	CBNA-50	CBLA-50	CBLA-25	-	-
Fahrzeug Geschwindigkeit	20-60 km/h	25-60 km/h	50-80 km/h	20-60 km/h	20-60 km/h
Radfahrer Geschwindigkeit	15 km/h	15 km/h	20 km/h	10 km/h	20 km/h
Verdeckung	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein
Aufprallpunkt	50%	50%	25%	50%	25%
AEB/FCW	AEB	AEB	FCW	AEB	AEB
Abbildung					

* EuroNCAP 2020 Testszenarien sind noch im Entwurf.

3. Anwendungsfallanalyse

Zur Anwendungsfallanalyse ist ein Beispiel des Kreuzungsszenarios in Bild 4 dargestellt. Das Egofahrzeug nähert sich einer Kreuzung mit der Absicht geradeaus weiterzufahren, während ein Radfahrer von links kommt und die Kreuzung durchfahren möchte. Eine Kollision tritt auf, wenn das Fahrzeug und der Radfahrer die Kreuzung zur gleichen Zeit am selben Ort überqueren möchten.

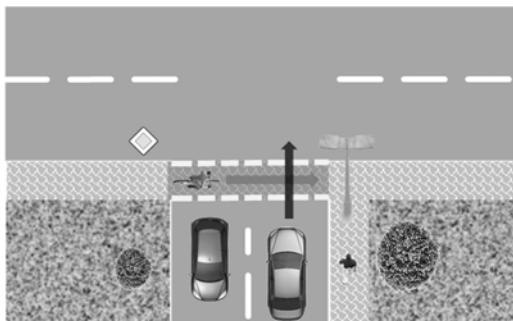


Bild 4: Beispiel des Szenarios UC4

Als erste Voraussetzung muss der Radfahrer als ein bewegtes Objekt von den Sensoren im Fahrzeug detektiert werden. Eine frühe und genaue Erkennung wird benötigt, um dem System genügend Zeit zur Reaktion bereitzustellen.

Unter Annahme einer Klassifizierungsmöglichkeit zwischen verschiedenen detektierten Objekten (z.B. Radfahrer, Fußgänger und Fahrzeug) wird der detektierte Radfahrer mit dem entsprechenden Zielmodell mit den vordefinierten Parametern und erfassten dynamischen Daten repräsentiert. Eine zuverlässige Klassifizierung ist erforderlich, um das richtige Zielmodell und damit die passenden Parameter (z.B. die Größe, Ausdehnung) für das bestimmte Objekt zu wählen.

Anhand der Sensoren und der darauf basierenden Perzeption werden die Position und die dynamischen Daten (z.B. die Geschwindigkeit, Fahrtrichtung) des Radfahrers erfasst. Auf den Daten gestützt wird der Bewegungszustand des Radfahrers geschätzt und das Zielmodell mit dynamischen Daten vervollständigt. Die genaue Messung der dynamischen Daten sichert eine zuverlässige Zustandsschätzung des Radfahrers und daraus auch eine präzise Prädiktion.

Die zukünftige Position des Radfahrers sowie die Position des Egofahrzeugs werden anhand der aktuellen Zustandsparameter prädiziert. Mittels der zukünftigen Position des Rad-

fahrers und des Egofahrzeuges wird vorhergesagt, ob das Egofahrzeug und der Radfahrer gleichzeitig dieselbe Fläche bzw. die Kollisionszone durchfahren werden.

Mithilfe einer Situationsanalyse und der Kritikalitätsbewertung lässt sich dieses Szenario weiter in den „sicheren“, „kritischen“ und „potenziell kritischen“ Fall unterteilen. In Bild 5 wird das „Storyboard“ des Szenarios UC4 vorgestellt.

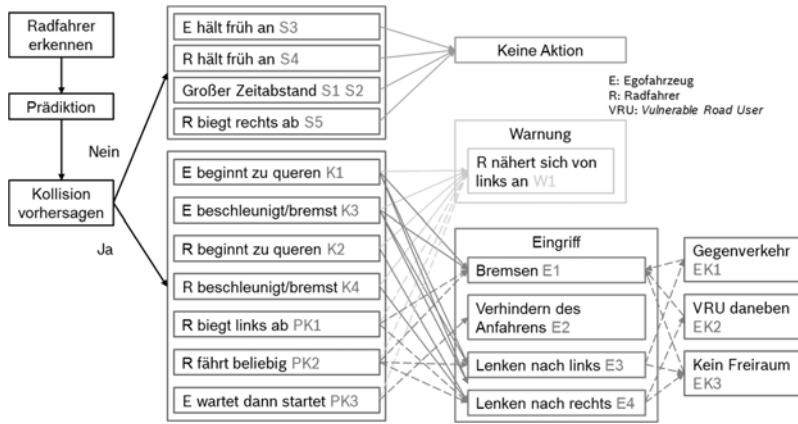


Bild 5: „Storyboard“ des Szenarios UC4

Einige Szenen werden als „sicher“ (S) betrachtet. S1 bis S5 sind fünf „sichere“ Szenen:

- S1) Das Fahrzeug tritt früher in die Kreuzung ein als der Radfahrer und verlässt die Kollisionszone mit einem ausreichenden Zeitabstand, bevor der Radfahrer die Kollisionszone erreicht.
- S2) Der Radfahrer tritt früher in die Kreuzung ein als das Fahrzeug und verlässt die Kollisionszone mit einem ausreichenden Zeitabstand, bevor das Fahrzeug die Kollisionszone erreicht.
- S3) Das Fahrzeug hält vor der Kreuzung an und gewährt dem Radfahrer die Vorfahrt.
- S4) Der Radfahrer hält vor der Kreuzung an.
- S5) Der Radfahrer nähert sich der Kreuzung an und entscheidet sich, nach rechts abzubiegen.

In den „sicheren“ Szenen soll keine Aktion wie Warnung oder Eingriff vom System automatisch ausgeführt werden, um eine niedrige Fehlauslösungsrate zu garantieren. Andernfalls führt die Fehlauslösung einerseits zu einer Störung des Fahrers, andererseits kann ein Not-

eingriff bei normalem Fahrverhalten unerwünschte Konsequenzen wie einen Auffahrunfall verursachen. Aus diesem Grund muss die Kritikalität der Situation möglichst genau bewertet werden.

Wenn die Situation als „kritisch“ (K) beurteilt wird, ist eine Warnung oder ein Eingriff erforderlich.

K1 bis K4 sind vier „kritische“ Szenen:

- K1) Das Fahrzeug tritt in die Kreuzung ein, wenn sich der Radfahrer bereits auf der Kreuzung befindet.
- K2) Der Radfahrer tritt in die Kreuzung ein, wenn sich das Fahrzeug bereits auf der Kreuzung befindet.
- K3) Das Fahrzeug beschleunigt oder bremst, so dass es in die Kreuzung zur gleichen Zeit wie der Radfahrer eintritt.
- K4) Der Radfahrer beschleunigt oder bremst, so dass er in die Kreuzung zur gleichen Zeit wie das Fahrzeug eintritt.

Einige Szenen werden als „potenziell kritisch“ (PK) eingestuft. Für diese Szenen kann eine Warnung oder ein Eingriff notwendig sein, je nachdem, wie sich die Situation im Laufe der Zeit weiter entwickelt.

PK1 bis PK3 sind drei „potenziell kritische“ Szenen:

- PK1) Der Radfahrer nähert sich der Kreuzung an und entscheidet sich, nach links abzubiegen.
- PK2) Der Radfahrer fährt einen beliebigen Weg über der Kreuzung.
- PK3) Das Fahrzeug wartet an der Kreuzung und fährt an, wenn der Radfahrer von links quert.

Für verschiedene „kritische“ und „potentiell kritische“ Szenen wird eine geeignete Strategie der Warnung und des Noteingriffs konzipiert. Basierend auf der Situation wird zuerst eine frühzeitige Warnung (W) vor dem sich von links nähern den Radfahrer ausgelöst.

- W1) Warnung: Der Radfahrer nähert sich der Kreuzung von links an. (K1, K2, K3, K4, PK1, PK2, PK3)

Wenn der Fahrer auf die Warnung nicht reagiert und die Situation kritischer wird, dann wird ein Eingriff (E) vom System automatisch ausgeführt.

- E1) Das Fahrzeug bremst und lässt den Radfahrer die Kreuzung durchfahren. (K1, K3, PK1, PK2)
- E2) Das Anfahren wird vom Fahrzeug verhindert, bis der Radfahrer über die Kreuzung gefahren ist. (PK3)
- E3) Das Fahrzeug weicht nach links aus, wenn der Radfahrer den möglichen Kollisionspunkt schon erreicht hat. (K1, K3, PK2)
- E4) Das Fahrzeug weicht nach rechts aus, während der Radfahrer noch von links kommt. (K1, K2, K3, K4, PK2)

In K2 und K4 ist eine Notbremsung nicht mehr nützlich, weil sich das Fahrzeug bereits in der Kollisionszone befindet und der Radfahrer sonst von links auffährt. In PK3 muss das Anfahren des Fahrzeuges verhindert werden, bis der Radfahrer durch die Kreuzung durchgefahrene ist.

In K1 und K3 wird ein Notbrems- oder Notausweichvorgang durchgeführt. Wenn die Kollision durch eine Notbremsung nicht mehr vermeidbar ist, wird ein Ausweichmanöver in Betracht gezogen. Allerdings könnte ein unachtsames Ausweichen auch weitere Kollisionen beispielsweise mit dem Gegenverkehr oder Straßenpfosten verursachen. Wie in Bild 4 gezeigt, könnte ein Ausweichen nach rechts zur Kollision mit der Straßenbeleuchtung oder dem vorbeigehenden Fußgänger führen.

Mit einem nicht geeigneten Eingriff kann die Situation verschlechtert und eine „kritische“ Szene (EK) erzeugt werden.

EK1 bis EK3 sind drei „kritische“ Szenen nach dem Eingriff:

- EK1) Das Fahrzeug weicht nach links aus, wenn ein Verkehrsteilnehmer aus der entgegengesetzten Richtung kommt.
- EK2) Das Fahrzeug weicht nach rechts aus, wenn sich ein verletzlicher Verkehrsteilnehmer (engl. *Vulnerable Road Users*, kurz VRU) auf der rechten Seite befindet.
- EK3) Das Fahrzeug weicht in eine Richtung aus, die durch ein Hindernis besetzt ist und somit keinen ausreichenden Freiraum bietet.

Um diese „kritischen“ Szenen zu vermeiden, ist eine geeignete Aktionsplanung von großer Bedeutung, innerhalb der die Umgebungsinformation über den Freiraum und die Bewegung von anderen Verkehrsteilnehmern mit berücksichtigt werden muss.

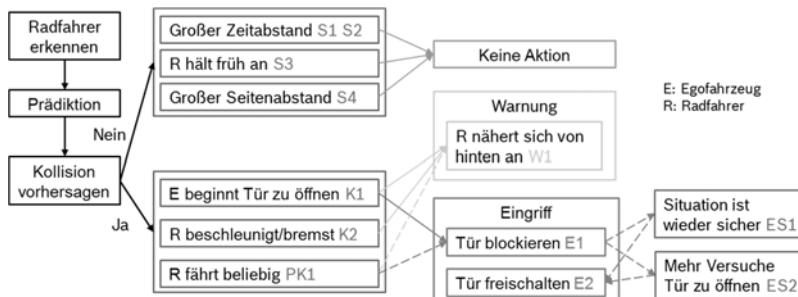


Bild 6: „Storyboard“ des Szenarios UC7

In Bild 6 wird das „Storyboard“ des Türöffnungsszenarios UC7 dargestellt. In den „kritischen“ Szenen muss der Fahrer zuerst davor gewarnt werden, dass sich ein Radfahrer von hinten nähert. Wenn der Fahrer trotz der Warnung versucht, die Tür zu öffnen, wird ggf. die Türverriegelung aktiviert. Die Situation wird wieder als „sicher“ bewertet, wenn der Radfahrer das Fahrzeug überholt hat oder vor der möglichen Kollision mit der Fahrzeugtür anhält. In diesem Fall wird die Tür wieder freigeschaltet (ES1). Bei mehrmaligem Versuch des Öffnens der blockierten Tür durch den Fahrer muss die Tür aus Sicherheitsgründen entriegelt werden (ES2). Eine zwingende Verriegelung der Fahrzeugtür trotz mehrmaliger Versuche der Türöffnung vom Fahrer oder Beifahrer ist gesetzlich nicht erlaubt.

Mithilfe von MATLAB® werden die verschiedenen Szenarien simuliert. Bei jeder Szene wird eine bestimmte Menge an Parametern definiert, unter anderem die Geschwindigkeit des Fahrzeugs und des Radfahrers, der seitliche Versatz zwischen dem Kollisionspunkt und der Fahrzeughinterachse und die *Time To Collision* (TTC) zum ersten Zeitpunkt der Simulation. Darauf basierend werden die Anfangswerte des x- und y-Abstandes des Radfahrers zur Mitte der Fahrzeughinterachse berechnet. In Bild 7 wird beispielhaft die Simulation der zwei Testszenen von UC2 und UC4 dargestellt. Das Fahrzeug und der Radfahrer werden beide durch ein Rechteck mit korrespondierender Größe repräsentiert. Ein Einspurmodell wird zur Schätzung und Prädiktion des dynamischen Zustandes des Fahrzeugs und des Radfahrers verwendet.

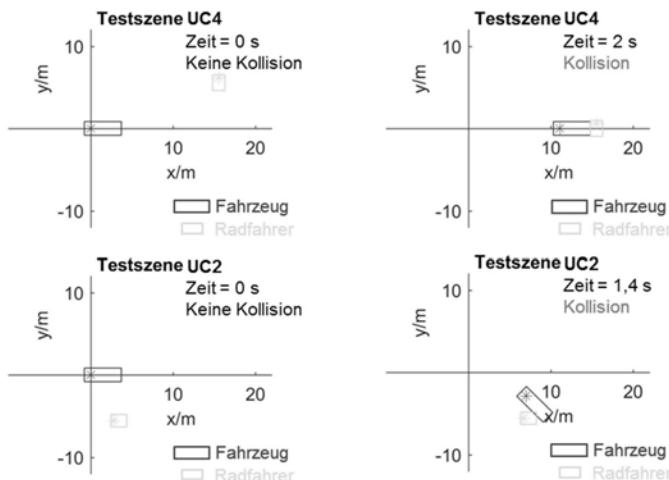


Bild 7: Simulation der zwei Testszenen von UC2 und UC4 mit MATLAB®

4. Anforderungen an die Sensorik, Perzeption und Aktionsplanung

Basierend auf der Anwendungsfallanalyse in Kapitel 3 werden die Anforderungen an die Sensorik, Perzeption und Aktionsplanung abgeleitet (Bild 8).

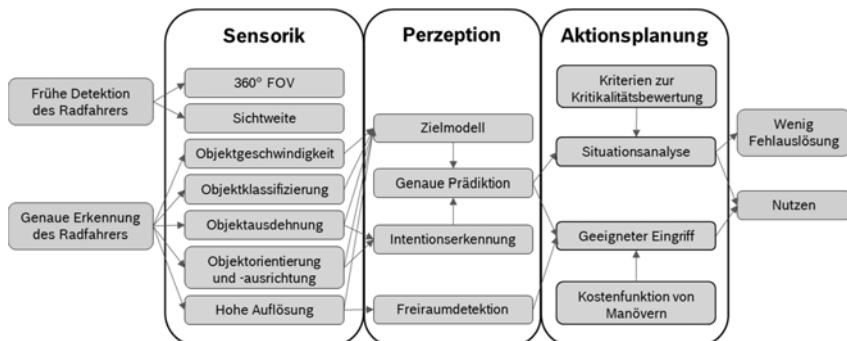


Bild 8: Anforderungen an die Sensorik, Perzeption und Aktionsplanung

Eine frühe Detektion des Radfahrers gewährleistet ausreichend Zeit für das System zur Aktionsplanung und Reaktion. Daher sollen die Sensoren über eine bestimmte Reichweite und ein großes Sichtfeld (engl. *Field of View*, kurz FoV) verfügen. Um die Kreuzungs-, Abbiege-

und Türöffnungsszenarien abzudecken, muss ein nahezu unbegrenztes Sichtfeld von 360 Grad um das Fahrzeug von den Sensoren erreicht werden.

Eine genaue Erkennung des Radfahrers wird ermöglicht, unter der Voraussetzung, dass die Position und der dynamische Zustand des Radfahrers möglichst genau erfasst werden. Die präzise Wahrnehmung der Objektgeschwindigkeit, -orientierung und -ausdehnung ist ausschlaggebend für eine zuverlässige Objektklassifizierung, mit der ein entsprechendes realitätsgtreues Zielmodell mit der Intentionserkennung erstellt wird [7 bis 8]. Darauf basierend wird eine genaue Prädiktion durchgeführt, die bei der Situationsanalyse eine wichtige Rolle spielt. Zusätzlich müssen die geeigneten Kriterien zur Kritikalitätsbewertung der Situation verwendet werden.

Mit einer hohen Auflösung der Sensorik wird eine Freiraumdetektion ermöglicht, die zusammen mit der genauen Prädiktion zur richtigen Entscheidung der kollisionsvermeidenden Manöver (z.B. Bremsen, Ausweichen und kombinierter Eingriff) beiträgt. Durch eine genaue Situationsanalyse und ein geeignetes Entscheidungsverfahren werden wenig Fehlauslösung und guter Nutzen des aktiven Schutzsystems erzielt.

5. Aktiver Radfahrerschutz mit hochauflösenden Automobilradaren

Dank der guten Robustheit und großen Sichtweite werden die Radarsensoren schon im AEB System serienmäßig verwendet. Mit den vom Serienradar detektierten Punkten wird ein Umgebungsmodell um das Fahrzeug auf der Objekt-Ebene erstellt. Der TTC-Wert jedes Objektes wird berechnet, um das kritischste Objekt zu finden und als Zielobjekt auszuwählen. Abhängig vom TTC-Wert kann eine Bremsung mit unterschiedlichen Verzögerungsstufen ausgelöst werden, um die Kollision mit dem Zielobjekt zu vermeiden. Weil die vorhandenen Radarsensoren in Serienfahrzeugen noch keine hohe Auflösung haben und daher nur eine begrenzte Menge von Objektdaten erfassen können, ist der Fokus der Perzeption und Aktionsplanung auf das einzelne relevante Zielobjekt gerichtet. Deshalb stehen keine weiteren Umgebungsinformationen, wie z.B. über den Freiraum, zur Verfügung. Demzufolge ist ein gezielter Notausweichvorgang mit diesem System nicht praktikabel oder umsetzbar.

Um sowohl eine Notbrems- oder Notausweichfunktion als auch eine kombinierte Funktion aus Beiden zu verwirklichen werden aktuell hochauflösende Radarsensoren, wie in Bild 9 gezeigt, entwickelt. Eine maßgebliche Neuerung des Sensors ist hierbei die erhöhte Anzahl der verwendeten Sende- und Empfangsantennen. Mit der angepassten Modulation wird eine große Menge von Rohdaten aufgezeichnet und in einem *Field Programmable Gate Array* (FPGA) mit verschiedenen Algorithmen echtzeitfähig verarbeitet.

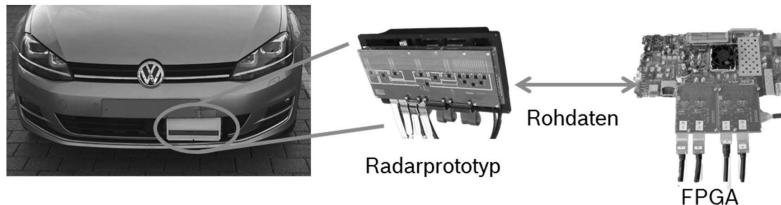


Bild 9: Radarprototyp und FPGA [9]

Mit diesem hochauflösenden Radarsensor werden tausende von Reflexionspunkte pro Zyklus detektiert, damit eine Perzeption auf Feature oder Pixel-Ebene ermöglicht wird. Um das Fahrzeug herum wird die statische und dynamische Umgebung getrennt modelliert.

In der dynamischen Umgebung wird eine Liste der bewegten Objekte erstellt (Bild 10). Die bewegten Punkte werden anhand der Position und Geschwindigkeit zu den Objekten zusammengefügt, die mithilfe des μ -Doppler-Effektes als Fußgänger, Radfahrer und Fahrzeug klassifiziert und anschließend mit dem entsprechenden Zielmodell repräsentiert werden [10]. Anhand dieser Information wird darauffolgend der dynamische Zustand eines jeden Objekts geschätzt und prädiziert.

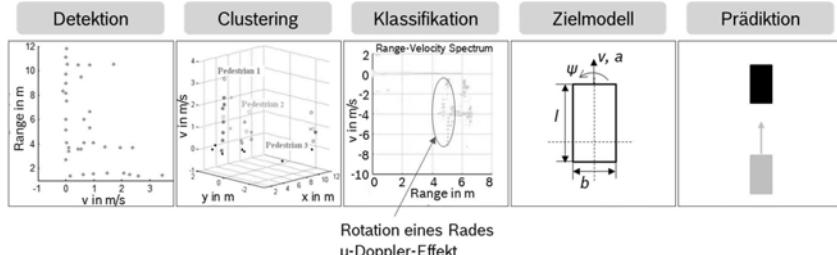


Bild 10: Perzeption der dynamischen Umgebung

Wie in Bild 11 gezeigt, wird die statische Umgebung als *Occupancy Grid Map* repräsentiert [11]. Basierend auf ihren jeweiligen Positionen sind die detektierten Punkte entsprechenden Zellen zugeordnet. Diese Zellen werden abhängig von der Fahrzeugbewegung befüllt und mit den neuen eingehenden Daten assoziiert. Die Gewichtung der Zellen wird im zeitlichen Verlauf gesenkt. Die Belegungswahrscheinlichkeit einzelner Zellen wird anhand der Stärke der Reflexion und der Menge der Punkte berechnet, damit eine Freiraumdetektion durchgeführt werden kann.

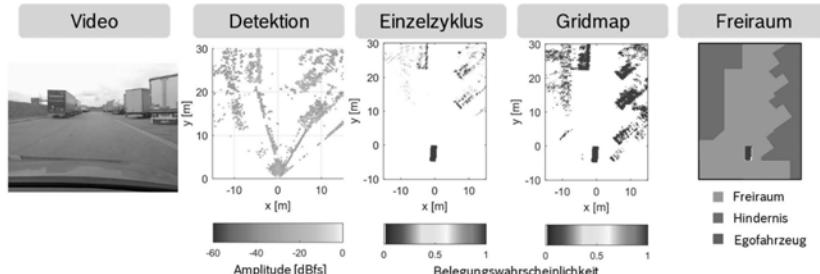


Bild 11: Perzeption der statischen Umgebung

Nach der Perzeption der statischen und dynamischen Umgebung wird die Aktionsplanung durchgeführt (Bild 12). Die Umgebung mit den kritischen Objekten wird prädiziert, um anhand der aktuellen und prädizierten Situation die Kritikalität zu bewerten. Falls die Situation als kritisch betrachtet wird, wird eine Kostenfunktion benutzt, um verschiedene kollisionsvermeidende Manöver zu bewerten. Unter Annahme, dass ein Eingriff unvermeidbar ist, wird die prädizierte Situation analysiert, um den Gewinn des geplanten Manövers abzuschätzen. Die Umgebungsinformationen über den verfügbaren Freiraum und potentiell kritische Objekte werden in die Kostenfunktion integriert. Zusätzlich werden Daten der Aktorik und des Manövers mit berücksichtigt. Alle Aspekte werden in der Kostenfunktion zusammengefasst, um die Entscheidung über einen bestmöglichen Eingriff zu treffen und an die Aktorik zu senden.

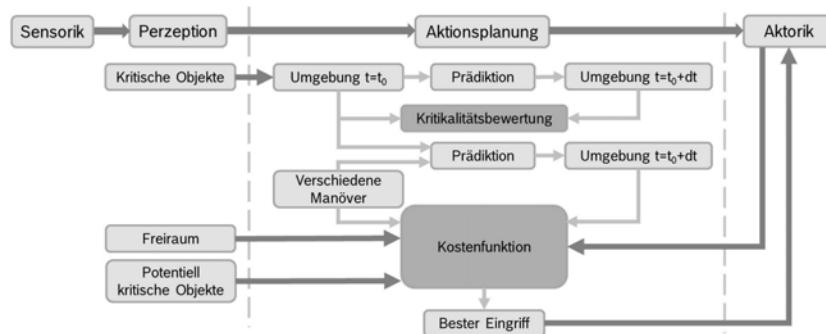


Bild 12: Aktionsplanung und Kostenfunktion

In Bild 13 ist eine Messung des Radfahrer-Dummys von 4activeSystems GmbH dargestellt. Darauf sind zwei auf der rechten Seite (ausgehend vom Egofahrzeug) geparkte Fahrzeuge (blau) und ein Radfahrer-Dummy (rot), der gerade angefahren ist, zu sehen.

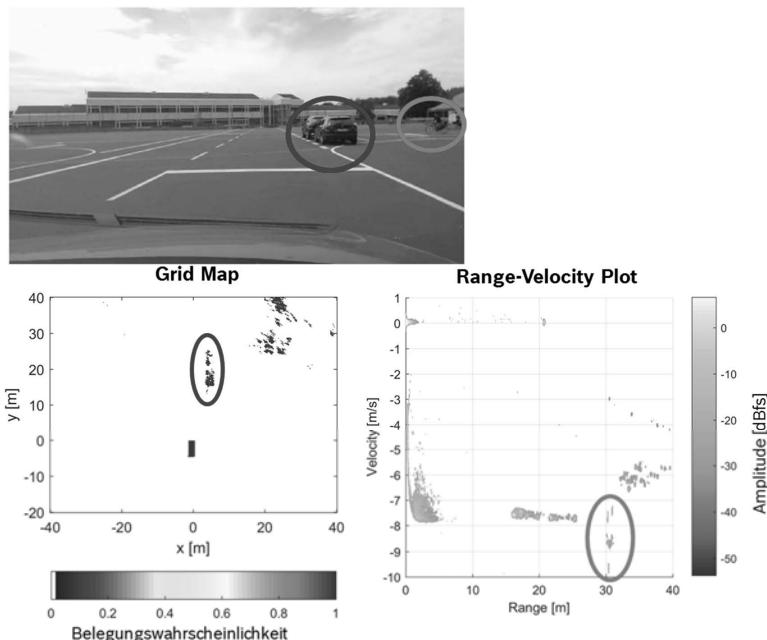


Bild 13: Messung mit Radfahrer-Dummy von 4activeSystems GmbH

In Bild 13 unten ist die von einem Radsensor erfasste statische und dynamische Umgebung dargestellt. Im *Grid Map* wird gezeigt, dass zwei parkende Fahrzeuge klar detektiert werden und die entsprechenden Zellen eine Belegungswahrscheinlichkeit von fast 1 haben. Hiermit ist ein Ausweichmanöver nach rechts nicht durchführbar. Im *Range-Velocity Plot* wird die Rotation des Vorderrades und des Hinterrades des Radfahrers detektiert (roter Kreis), womit der Radfahrer-Dummy erkannt und klassifiziert werden kann.

Wie aus Bild 14 ersichtlich, ist eine sehr gute Erfassung der statischen und dynamischen Umgebung möglich. Demzufolge können die Informationen der Liste der bewegten Objekte und des Freiraums bei der Aktionsplanung mit berücksichtigt werden. So wie beim Notbremssystem für den Fußgängerschutz können die Automobilradare im Bereich des aktiven Radfahrerschutzes ebenfalls ihre Anwendung finden.

Danksagung:

Diese Arbeiten wurden von der EU im Verbundprojekt PROSPECT (Grant-No.: 634149) und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Verbundprojekt iFUSE gefördert.

Literaturverzeichnis:

- [1] European Road Safety Observatory, Community database on Accidents on the Roads in Europe: Annual Accident Report 2016, 2016
- [2] Brockmann, S.: Radfahrer/Pkw-Unfälle, Unfallforschung der Versicherer(UDV) Presseveranstaltung in Münster, Deutschland, 2015
- [3] PROSPECT EU Project GA No. 634149 - Deliverable D3.1: The addressed VRU scenarios within PROSPECT and associated test catalogue, 2016
- [4] PROSPECT EU Project GA No. 634149 - Deliverable D3.2: Specification of the PROSPECT demonstrators, 2016
- [5] CATS TNO Project - Deliverable 2.2: CATS car-to-cyclist accident parameters and test scenarios, 2016
- [6] Euro NCAP Test Protocol – AEB VRU Systems Version 2.0, 2017
- [7] Kunert, M.: High-resolution Automotive Radars for Safety Features and Automated Driving Functions, European Radar Conference (EuRAD) in London, Großbritannien, 2016
- [8] Kunert, M., Meini, F., Stolz, M.: Herausforderungen, Migrationspfade und Zukunftstechnologien auf dem Weg hin zum vollautomatisierten Fahren – Perspektiven und Sichtweisen aus dem Blickwinkel eines Automobilradars, 32. VDI/VW Gemeinschaftstagung Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren, Wolfsburg, Deutschland, 2016
- [9] Meini, F., Stolz, M., Kunert, M., Blume, H.: An Experimental High Performance Radar System for Highly Automated Driving, International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM), Nagoya, Japan, 2017
- [10] Schubert, E., Meini, F., Kunert, M., Menzel, W.: High Resolution Automotive Radar Measurements of Vulnerable Road Users – Pedestrians & Cyclists, International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM), Heidelberg, Deutschland, 2015
- [11] Li, M.: High-Resolution Radar Based Environment Perception and Maneuver Planning, CTI Symposium on Automated Driving, Future Mobility and Digitalization (ADFD), Hanover, Germany, 2017

Fahrerassistenzsysteme für motorisierte Zweiräder

Dipl.-Ing. **Markus Köbe**, Prof. Dr.-Ing. **Günther Prokop**,
Technische Universität Dresden, Dresden;
Dipl.-Ing. **Stefan Hans**, BMW Group, München

Schlüsselwörter:

Entwicklung, Fahrerassistenzsysteme, Motorräder, Unfallforschung

Kurzfassung

Maßnahmen der aktiven und passiven Sicherheit bei Kraftfahrzeugen sorgen seit Jahren für einen Rückgang der Verletzten und Getöteten im Straßenverkehr. Dem entgegen steht der steigende Anteil verletzter und getöteter Aufsassen motorisierter Zweiräder. Hier zeigt sich, dass großes Potential für weitere Sicherheitsmaßnahmen im Zweiradbereich besteht. Insbesondere aktive Sicherheitssysteme können im Bereich der Unfallprävention einen entscheidenden Beitrag zur Steigerung der Sicherheit motorisierter Zweiräder leisten. Das Ziel ist es, Fahrerassistenzsysteme zu entwickeln, die im Unfallgeschehen wirksam und durch den Fahrer akzeptiert sind und genutzt werden. Aufgrund der Fahrdynamik, die sich wesentlich vom Personenkraftwagen (Pkw) unterscheidet, können bestehende Systeme nicht einfach vom Pkw übernommen werden, sondern müssen auf das motorisierte Zweirad angepasst und bezüglich der Wechselwirkungen mit dem Fahrer untersucht werden.

Die Fahreraufgaben werden in die Navigationsebene, Bahnführungs- und Stabilisierungsebene unterteilt und genauer beschrieben. Das Normalfahrverhalten sowie das Unfallgeschehen motorisierter Zweiräder, welches mittels Daten des deutschen statistischen Bundesamtes sowie mit Daten der German In-Depth Accident Study untersucht wurde, liefert die zu adressierenden Szenarien. Die Betrachtung der Szenarien in ihrem zeitlichen Verlauf in Normalfahrt, kritische Situation und Unfallphase ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung und liefert Ansatzpunkte für Assistenzfunktionen. Die Kombination von Assistenzfunktionen mit Sensorik und Aktorik innerhalb der Methodik führt zu umsetzbaren Assistenzsystemen und Ableitung eines Handlungsfelds.

In Anlehnung an das menschliche Fahrerverhalten wird ein Beobachter entworfen, der auf Basis eines mathematischen Fahrdynamikmodells das Fahrverhalten überwachen kann und auf Methoden des automatisierten Fahrens aufbaut. Dieser Beobachter ist kaskadiert ausge-

führt und überwacht die Ausführung der Fahraufgaben in der Bahnführungsebene sowie der Stabilisierungsebene.

Im Ergebnis steht ein Beitrag zur Steigerung der Fahrzeugsicherheit motorisierter Zweiräder durch die Entwicklung von Assistenzfunktionen in Anlehnung an das menschliche Fahrerverhalten, um identifizierte Unfallsituationen zu adressieren und künftig frühzeitig zu vermeiden.

1. Einleitung und Motivation

Die Begriffe Motorrad und Motorradfahren sind mit Fahrspaß und Freiheit untrennbar verbunden. Maßgeblich sind die besonderen Eigenschaften des Motorrads als einspuriges Kraftfahrzeug für die Faszination Motorradfahren verantwortlich. Diese Faszination beruht im Wesentlichen auf der Unmittelbarkeit des Fahrerlebnisses, der Dynamik und der Intensität der Sinnesbeanspruchung. Diese Emotionalität und die Vielfalt des Erlebens sind wesentliche Gründe dafür, dass Motorradfahren fasziniert und sich Motorräder zunehmender Beliebtheit erfreuen. So stieg der Anteil zulassungspflichtiger Krafträder von 1992 (1.678.701 Fahrzeuge¹) bis 2016 (4.314.493 Fahrzeugen²) um das Zweieinhalbache an. [1]

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

¹ mit vorrübergehend stillgelegten Fahrzeugen

² einschließlich drei- und vierrädrigen Krafträder wie Trikes oder Quads

³ ohne vorrübergehend stillgelegte Fahrzeuge

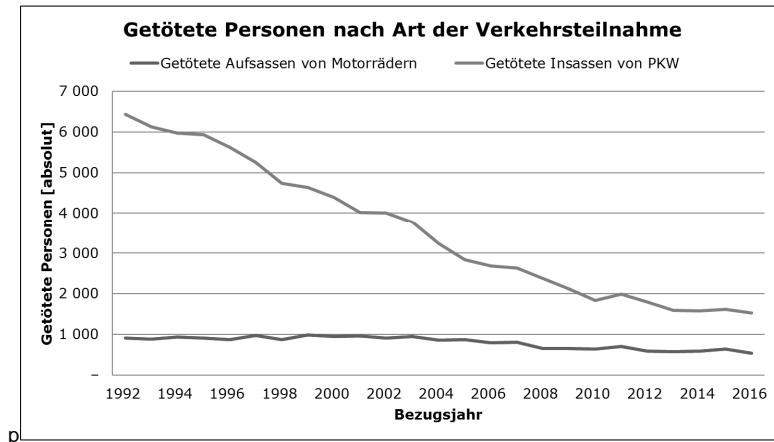


Bild 1: Anzahl getöteter Insassen von PKW und Aufsassen von Motorrädern von 1992 bis 2016 [1]

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

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

2. Unfallgeschehen von motorisierten Zweirädern

Auf Basis von Analysen der German In-Depth Accident Study (GIDAS) wurden Unfälle mit 2.394 beteiligten Motorradfahrern ausgewertet. Abbildung 3 zeigt die Verteilung der verunglückten Motorradfahrer über die Unfalltypen nach amtlicher Verletzungsschwere⁴.

⁴ Diese Abbildung ermöglicht eine Darstellung auf Fahrzeugebene

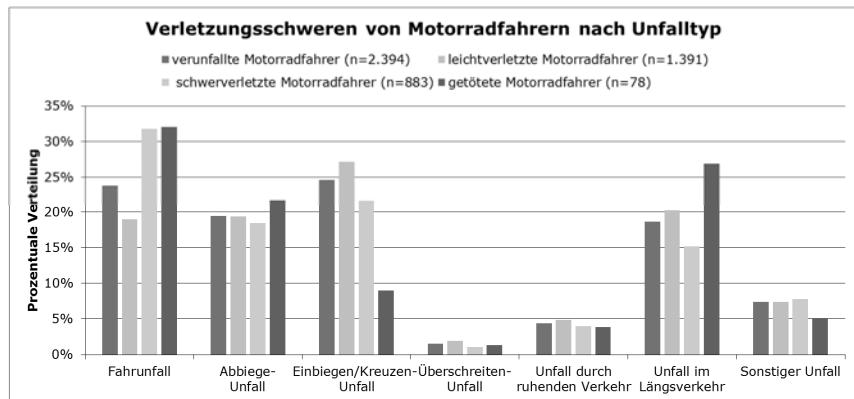


Bild 2: Verteilung der verunglückten Motorradfahrer nach Unfalltyp und Verletzungsschwere

Hieraus gehen vier Hauptunfalltypen für Motorradfahrer hervor, welche in Abbildung 4 nochmals mit Beispielfällen veranschaulicht werden.

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

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

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

beim Motorradfahrer das Ausweichen in Richtung der Bewegungsrichtung des Gegners beobachten.

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

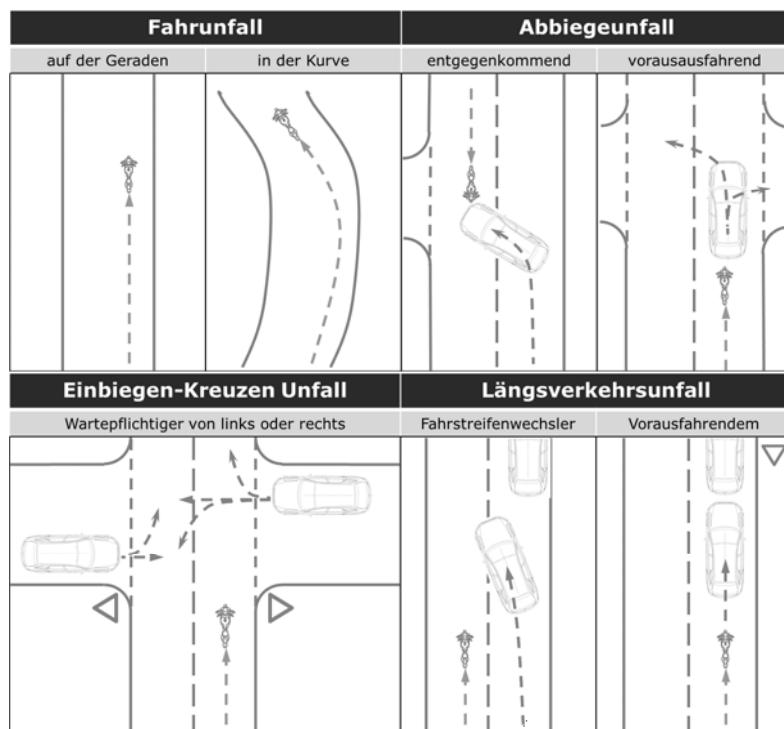


Bild 3: Beispiele für die Hauptunfalltypen von Motorradfahrer

3. Fahrverhalten und Fehlerverortung

Aus der Fahrerverhaltensmodellierung ist eine Vielzahl an Ansätzen zur Modellierung bekannt. [9, 10, 11, 12, 13] Grundsätzlich wird hierbei der Fahrer in der Wahrnehmung seiner Fahraufgabe beschrieben. Ein fünfteiliger Ansatz mit Ergänzung des Wahrnehmungsfilters ist in Abbildung 2 dargestellt und beinhaltet:

1. Die **Informationsaufnahme** in Form der Sinneswahrnehmung. Diese besteht für die Wahrnehmung der Fahraufgabe im Wesentlichen aus visuellen, vestibulären, auditiven, taktilen, propriozeptive und haptischen Reizen.
2. Die **Wahrnehmung** ist die Modellierung eines Filters für die aufgenommenen Reize.
3. Die **Beurteilung** umfasst die Einschätzung der Fahrsituation, den Abgleich mit bereits erlebten Situationen sowie Abschließend der Beurteilung der Situation.
4. Die **Handlungsableitung** beinhaltet die Entscheidung über eine Verhaltensadaption und führt zur Handlungsstrategie innerhalb der wahrgenommenen Fahrsituation.
5. Die **Handlungsumsetzung** beinhaltet dann die tatsächliche Fahrzeugbedienung.

In der Verkehrsorschung wird die Zeit von Informationsaufnahme bis Handlungsumsetzung als messbare Reaktionszeit mit beobachtbarem Ausgang angesehen. Die Abläufe und Modellierung sämtlicher Blöcke ist Gegenstand aktueller Forschung. [17]

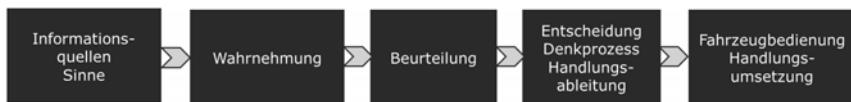


Bild 4: Darstellung der Fahraufgabe im Blockdiagramm

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

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

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

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

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

Tabelle 1: Verortung des Fehlers für alle Motorradfahrer

n=206

Sinneswahrnehmung?	Wahrgenommen?	Falsch eingeschätzt?	Falsche Handlung abgeleitet?	Fehler bei der Umsetzung?
				
22,8 %	19,9 %	35 %	16,5 %	5,8 %

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

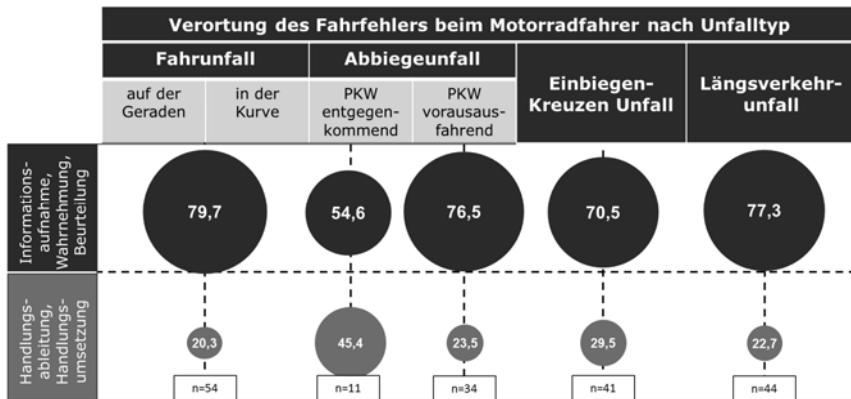


Bild 5: Verortung des Fahrfehlers beim Motorradfahrer

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

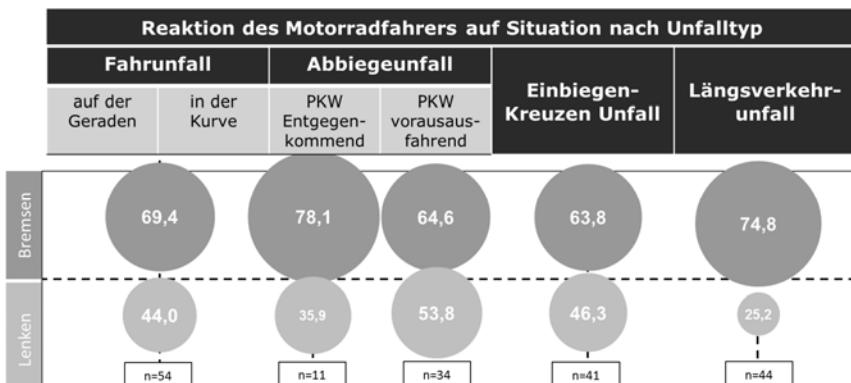


Bild 6: Reaktion des Motorradfahrers auf die Situation

Dem Gegenüber ist in Abbildung 7 die Verteilung der Verortung des Fahrfehlers für den PKW-Fahrer angegeben. Hier sind etwas mehr als 88 % der Fehler auf die Informationsaufnahme bzw. deren Wahrnehmung verortet. Hieraus lässt sich ein Bedarf für Sicherheitsfunktionen am PKW für Motorradfahrer ableiten, welche informierend/warnend oder proaktiv die Informationsaufnahme, Verarbeitung und Einschätzung des PKW Fahrers addressieren.

n=146

Sinneswahrnehmung?	Wahr-genommen?	Falsch eingeschätzt?	Falsche Handlung abgeleitet?	Fehler bei der Umsetzung?
				
43,8 %	44,5 %	8,9 %	2,1 %	0,7 %

Bild 7: Verortung des Fehlers beim PKW-Fahrer

4. Fahrermotivation und Nutzerakzeptanz aus der Literatur

Die Motive zum Fahren von Fahrzeugen ähneln und unterscheiden sich bei Motorradfahrern sowie PKW-Fahrern je nach Fahrtzweck. Der PKW ist oft ein Verkehrsmittel für die Fahrt von A nach B und somit ein Mittel zum Zweck mit einem relativ unsinnlichem Bewegungserlebnis. Die Anonymität im Fahrzeug zeigt sich oft in Egozentrik und im schlimmsten Fall in Asozialität. Zudem hat der PKW nach wie vor eine hohe Signalwirkung als Statussymbol. [4, 19] Das Motorrad hingegen erfüllt oft eher eine Freizeitfunktion. Es dient vielen Fahrern für unterschiedliche Motive [4, 19]

- „Thrill“-Erleben als eine Wechselwirkung zwischen Angst und Lust
- „Flow“-Erleben als gesteigerte Gegenwart mit Spaß und Freude, in der Subjekt und Umwelt verschmelzen
- Sinnliche Aspekte wie die Fahrdynamik, haptische und kinästhetische Wahrnehmung von Geschwindigkeit und Beschleunigung
- Suche nach „Arousal“

Oft wird Motorradfahren mit Freiheit verbunden und gibt das Gefühl von Unabhängigkeit, auch in Bezug auf eine größere Beweglichkeit im Straßenverkehr wie das Durchschlängeln im Stau oder die oft ausbleibende Parkplatzsuche. Oft haben Fahrer ein „persönliches“ Verhältnis zum Motorrad, Wartung und Reparatur werden selbst übernommen und das Motorrad

ist mit Stolz verbunden. Die Schutzlosigkeit in der Eigenschaft als schwächerer Verkehrsteilnehmer verbunden mit oben genannten Motiven führen zu einem Gruppenerlebnis als über-individuelle Identität, die sich beispielsweise im Grüßen der Fahrer untereinander äußert. [4, 19]

Eine kalifornische Fragebogenstudie untersuchte die Risikowahrnehmung von Motorradfahrern und arbeitete Alter, Geschlecht sowie Grad der Erfahrung als Variablen für riskantes Verhalten heraus. [14]

Die Europäische Fragebogenstudie Social Attitudes to Road Traffic Risk in Europe (kurz: SATRE4) untersuchte Meinungen und Verhaltensweisen, welche hinsichtlich Risiko und Sicherheit im Straßenverkehr bestehen. *Im Ergebnis sind Maßnahmen für mehr Verkehrssicherheit in Hinblick auf Motorradfahrer nicht pauschal für alle Motorradfahrer gleichermaßen anzusetzen, sondern Zielgruppen- und Länderspezifisch einzusetzen.* [18]

Eine Studie aus Norwegen untersuchte, welche Motorradfahrer besonders gefährdet sind. Im Ergebnis misst diese Studie informierenden und warnenden Systemen ein hohes Potential für mehr Sicherheit bei. [3]

Aus einer quantitativen Gruppendiskussion aus Australien wurden soziale Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten analysiert. Dabei stellte sich das „in-group“ Verhalten als entscheidende Einflussvariable heraus. [20]

Bezüglich der Nutzerakzeptanz erarbeitete eine Survey Studie die Fragestellung, welche Fahrerassistenzsysteme für Motorradfahrer die größte Akzeptanz erreicht. Die höchste Akzeptanz gab es hierbei allgemein für informierende Systeme. Grundsätzlich akzeptierten jüngere Fahrer Fahrerassistenzsysteme eher als ältere Fahrer. Die größten Befürchtungen bei der Einführung solcher Systeme bestehen in der Wahrnehmung, dass diese zu Faulheit und Unachtsamkeit führen. Es zeigte sich vor allem die Angst, dass Fahrer ihr Fahrzeug nicht mehr richtig „kennen“ und technische Prinzipien nicht mehr verstehen. Die Einstellung zu selbst agierenden Systemen wird als Kontroll- und Verantwortungsverlust empfunden. Motorradfahren sei eine freie Entscheidung, weshalb diese nicht abgegeben werden solle. Hierbei müsse ein Grad der Einflussnahme sowie die Möglichkeit vorhanden sein, Systeme abschalten zu können. Multiple Fahrerassistenzsysteme werden als verwirrend, nervig und ablenkend beschrieben. Im Ergebnis besteht eine höhere Akzeptanz für informierende statt für eingreifende Systeme. Gerade automatische Notrufsysteme haben eine hohe Akzeptanz. Im Gegensatz dazu sind eingreifende Systeme, vor allem jene, die die Freiheit in der Fahrzeugführung einschränken, weniger akzeptiert. Die Gründe dafür liegen in fehlenden Erfahrungen mit solchen Systemen und die Vorteile dieser Systeme den Fahrern nicht bekannt sind. [2]

Der Fragestellung nach Einflussfaktoren für die Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen geht eine Simulatorstudie nach. Die Modellvorstellung hierbei beschreibt die soziale Norm, die Bewertung des Designs sowie die wahrgenommene Sicherheit als Determinanten für die Nutzerintension („usage intention“), welche über „willingness to have system installed“ und „willingness to pay for system“ analysiert wurde. *Dabei wurde für die soziale Norm identifiziert, dass Systeme, die Freunde von Motorradfahrern mögen bzw. nutzen die Wahrscheinlichkeit der eigenen Nutzung erhöht. Eine bessere Bewertung der Informationsdarstellung geht mit einer höheren Nutzerintention einher und hat darauf einen signifikanten Einfluss.* [8] Aus der Betrachtung des Fahrers hat dieser Beitrag zum Ziel, dem Fahrer durch Assistenzsysteme einen Mehrwert zu bieten, innerhalb kritischer Situationen durch Eingriffe zu schützen, jedoch den Fahrer nicht in seinen Motiven zur Fahrzeugnutzung einzuschränken.

5. Modellierung und Beobachterentwurf

Im Gegensatz zum PKW befindet sich das motorisierte Zweirad im labilen Gleichgewicht und muss stets durch aktive Fahrereingaben stabilisiert werden. Für den Beobachter in Analogie zum Fahrerverhalten ist also ein Fahrdynamikmodell erforderlich, welches den Zielkonflikt zwischen Genauigkeit und Recheneffizienz ideal auflöst. Die Modellvorstellung basiert auf dem Fahrermodell nach Getz [6] in seiner Erweiterung nach Yi, Zhang und Song [21] und ist in Abbildung 8 sowie Formel (1) dargestellt.

$$\mathbf{M}(\underline{q}) \ddot{\underline{q}} = \mathbf{K}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) + \mathbf{B} \underbrace{\begin{bmatrix} \omega_\kappa \\ F_{rx} \end{bmatrix}}_{\underline{u}} \quad (1)$$

Die zugehörigen Matrizen $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{nxn}$, $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{nx1}$ und $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{nxm}$ sind in den Formeln (2a), (2b) und (2c) dargestellt.

$$\mathbf{M}(\underline{q}) = \begin{bmatrix} h^2 & -ch\kappa \cos \phi \\ -ch\kappa \cos \phi & c^2\kappa^2 + h^2\kappa^2 \sin^2 \phi + 2h\kappa \sin \phi + 1 \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$\mathbf{K}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) = \begin{bmatrix} (1 + h\kappa \sin \phi)hv_{rx}^2\kappa \cos \phi + gh \sin \phi - gce\kappa \sin \eta \cos \phi \\ -ch\kappa \dot{\phi}^2 \sin \phi - 2v_{rx}h^2\kappa^2\dot{\phi} \cos \phi \sin \phi - 2v_{rx}h\kappa\phi \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2b)$$

$$\mathbf{B}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) = \begin{bmatrix} chv_{rx} \cos \phi & 0 \\ -\kappa c^2 v_{rx} - v_{rx}h^2\kappa \sin^2 \phi - v_{rx}h \sin \phi & \frac{1}{m} \end{bmatrix} \quad (2c)$$

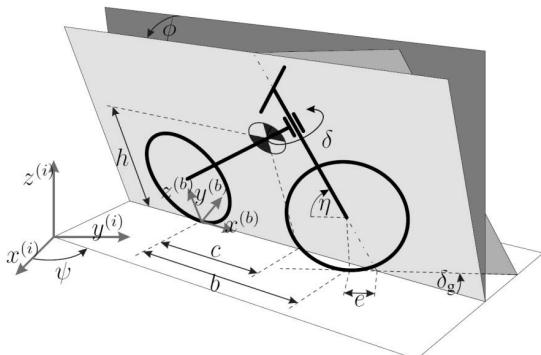


Bild 8: Fahrdynamikmodell für den Beobachterentwurf

Der Zustandsvektor \dot{q} enthält die Rollgeschwindigkeit $\dot{\phi}$ sowie die Hinterradgeschwindigkeit v_{rx} in Längsrichtung. Der Eingangsvektor \underline{u} besteht aus der zeitlichen Ableitung der Krümmung $\dot{\omega}_k = \dot{\kappa}$ und der Längskraft im Hinterradaufstandspunkt in Längsrichtung F_{rx} .

Aus der Fahrerverhaltensmodellierung ist nach Donges [5] die Einteilung der Fahraufgabe in drei Ebenen bekannt:

- In der **Navigationsebene** wird die globale Route geplant.
- Die **Bahnplanungsebene** bzw. **Bahnhörungsebene** beinhaltet die Planung des unmittelbar nächsten Manövers sowie Ableitung einer zugehörigen Trajektorie, bestehend aus Position und Geschwindigkeit.
- In der **Stabilisierungsebene** wird das Manöver mit der geplanten Trajektorie angefahren und eingestellt.

In Ergänzung hierzu entwickelte Rasmussen [16] die Vorstellung des menschlichen Verhaltens in wissensbasiertem, regelbasiertem und fertigkeitsbasiertem Verhalten. In Anlehnung an diese Hierarchie entwickelte Prokop [15] einen Regler für Fahrzeuge mit einem Prädiktionsalgorithmus für künftige Fahrzustände auf Basis einer Vektoroptimierung.

Analog zu diesen Ansätzen wird ein Beobachter auf drei Ebenen entworfen:

1. Low-Level (Stabilisierung / Fertigkeitsbasiert)

Diese Ebene erhält eine Geschwindigkeits- und Rollwinkelvorgabe in Form einer Trajektorie innerhalb von sicheren Grenzen. Hierbei werden robuste Reglermethoden zur Kompensation von Messungenauigkeiten und Modellfehlern herangezogen.

2. Medium-Level (Bahnplanung/-führung / Regelbasiert)

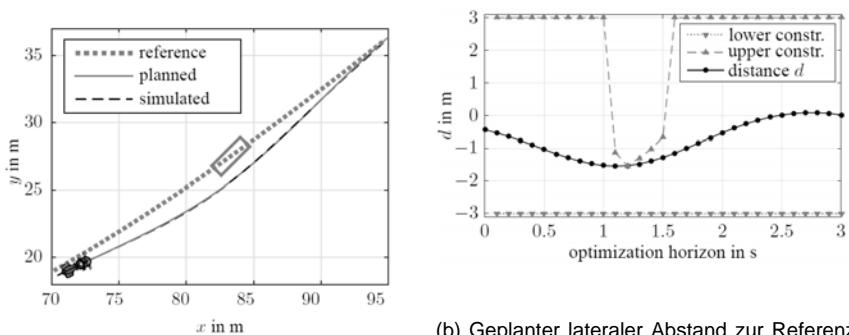
Diese Ebene nutzt eine linearisierte modellprädiktive Regelung (Linear Model Predic-

tive Control, kurz: LMPC) zur Planung einer lokalen Trajektorie. Das optimale Manöver für einen gegebenen Zeithorizont wird ausgehend vom aktuellen Fahrzeugzustand aus geplant und berücksichtigt Randbedingungen wie Straßenbreite, Hindernisse, Komforteigenschaften oder Energieeffizienz. Die sich ergebene Trajektorie wird an die Low-Level-Ebene mit Referenzgeschwindigkeit und Referenzrollwinkel als Eingang weiter gegeben.

3. High-Level (Navigationsebene / Wissensbasiert)

Diese Ebene enthält strategische Entscheidungen über die globale Routenplanung und soll in diesem Beitrag nicht weiter diskutiert werden.

Für die exakte Herleitungen der Reglergesetze und Randbedingungen sei hier auf Hans, Krehel, Köbe und Prokop [7] verwiesen. Abbildung 9 zeigt das Ergebnis der Simulation einer Kurvenfahrt mit einem Hindernis auf der Referenz. Es wird die geplante und gefahrene Trajektorie aus der Vogelperspektive (a) sowie die laterale Abweichung als Teil des Kostenfunktionalen mit ihren Grenzverläufen im Optimierungshorizont (b) gezeigt.



(a) Vogelperspektive des geplanten Manövers aus der LMPC und Referenz

(b) Geplanter lateraler Abstand zur Referenz und Begrenzung für die Optimierung im Horizont aus (a) in obere und untere Grenze

Bild 9: Simulation einer Kurvenfahrt mit Hindernis auf der Referenz

Der Beobachter prädiziert das richtige Verhalten und passiert das Hindernis (9a) nach 1,2 s mit dem minimalen Erlaubten Abstand aus der oberen Begrenzung (9b). Eine Einschränkung im Kostenfunktional des Beobachters erlaubt eine Adaption der geplanten Trajektorie im *Medium-Level* des Beobachters. Somit ist es möglich, potentiell künftige Fahrzustände zu prädizieren und für die Entwicklung von Assistenzsystemen heranzuziehen.

6. Ableitung von Fahrerassistenzsystemen

Für die Ableitung von Assistenzsystemen wird zunächst die Fahraufgabe betrachtet und in Abbildung 10 in drei Ebenen eingeteilt.

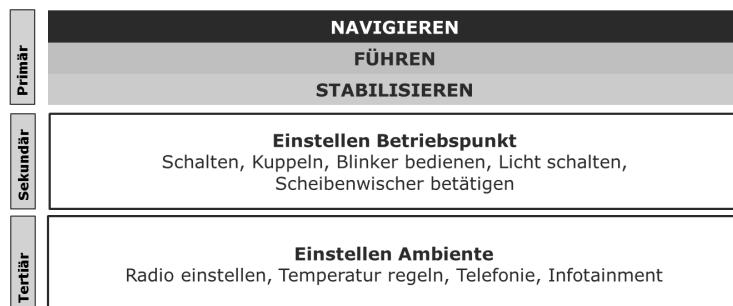


Bild 10: Ebenen der Fahraufgaben

Die **primären Fahreraufgaben** sind *direkt* mit dem Führen des Fahrzeugs verknüpft und beinhalten die Ebenen der Fahrzeugführung nach Donges [1]. Das Führen und Stabilisieren des Fahrzeugs meint hierbei genauer das Beschleunigen, Bremsen und Lenken.

Die **sekundären Fahreraufgaben** sind *indirekt* mit dem Führen des Fahrzeugs verknüpft und beinhalten Aufgaben, die zur Ausführung der primären Fahreraufgaben notwendig sind. Sie können als das *Einstellen eines Betriebspunkts* zusammengefasst werden.

Die **tertiäre Fahreraufgabe** sind *nicht* mit dem Führen des Fahrzeugs verknüpft, sind aber ebenfalls Aufgaben, die ein Fahrer zu bewältigen hat. Sie können als *Einstellen des Ambientes* zusammengefasst werden. Sie werden in diesem Beitrag nicht weiter diskutiert.

Aus der **Betrachtung des Unfallgeschehens** sind die Situationen bekannt, in denen ein Motorradfahrer unterstützt werden muss. Zur weiteren Ableitung der Assistenzsysteme bietet sich eine begriffliche Trennung an.

Eine **Assistenzfunktion** beinhaltet die Unterstützung des Fahrers in einer einzelnen Fahraufgabe. Die Kombination einer oder mehrerer Assistenzfunktionen mit Sensorik und Aktorik ergibt ein **Assistenzsystem**.

Beispiel: Das Einstellen eines Abstands zu einem vorausfahrenden Fahrzeug ist eine Assistenzfunktion. Das Einstellen einer gewünschten Geschwindigkeit ist ebenfalls eine Assistenzfunktion. In dieser Kombination mit zugehöriger Sensorik und Aktorik sind diese Funktionen Teil des Assistenzsystems Abstandsregeltempomat.

In einer Matrix werden innerhalb der Spalten die zeitlichen Verläufe identifizierter Szenarien aus dem Unfallgeschehen in „Normalfahrt“, „Gefahrensituation“ und „Unfallphase“ unterteilt. Die Zeilen bilden die einzelnen Fahreraufgaben während der Fahrzeugführung. Die entstehenden Felder der Matrix können nun mit einer Fahrsituation und zugehöriger Assistenz aufgefüllt werden. In Abbildung 11 findet sich ein Auszug dieser Matrix. Hellblau dargestellt sind hier die Situationen und zugehörig in dunkelblau die Assistenzfunktion.

		Kritische Situation		
		Normalfahrt	Warnphase	Gefahr
Primäre Fahreraufgabe	Navigation	Befahren unbekannter Strecken	Gefahrenstellen Ablegen von Gefahrenstellen auf Kartenmaterial	
	Planung Krümmung	Befahren von Kurven	Krümmung für Geschwindigkeit zu groß Lenkmoment zur Ideallinie bzw. für größere Krümmung	
	Planung Geschwindigkeit	Befahren von Kurven	Geschwindigkeit für Krümmung zu hoch Reduktion Antriebsmoment/ Bremseingriff am Hinterrad für kurveneindrehendes Giermoment	
	Stabilisierung (Längs/Quer)	Fahren mit GRA	Kurvenbremsung Kompensation des Lenkmoments	
	(...)			
Einstellen Betriebspunkt	Wahl Übersetzung	Anfahren, Kuppeln und Schalten bei stockendem (innerorts) Verkehr	Gefahrenbremsung Automatisches Runterschalten	
	Kuppeln		Gefahrenbremsung Automatisches Auskuppeln	
	Drehzahl	Anpassung nach Gangwechsel	Akustisch/haptische MMI Gefahrenbremsung mit Momentenanforderung Rücknahme Motormoment - Drehzahlanpassung	
		Drehzahlanpassung		

Bild 11: Ableitung von Assistenzfunktionen aus Fahreraufgaben in Ihrem zeitlichen Verlauf

Exemplarisch werden in diesem Beitrag vier Assistenzsysteme erläutert, welche mit dieser Methodik identifiziert werden konnten. Es wird dabei auf die kritische Situation aus dem Unfallgeschehen eingegangen, der Kundenmehrwert und Kaufanreiz erläutert sowie kurz auf den entworfenen und verwendeten Beobachter eingegangen. Grundsätzlich werden die Assistenzfunktionen auf Basis des Beobachters und damit der Fahrdynamik entworfen. Innerhalb dieses Beitrags werden weiterhin keine informierenden oder warnenden Systeme betrachtet. Das Ziel mit diesem Ansatz ist es, dem Fahrer durch Eingriffe zu assistieren und ihn damit zu schützen, andererseits jedoch keines der Motive zur Fahrzeugnutzung selbst einzuschränken.

Zunächst wird die **sekundäre Fahreraufgabe** mittels einer „**Stadtassistenz**“ assistiert. Hierbei wird vor allem für den *Innerortsverkehr* eine Kupplungs- und Getriebeautomatisierung genutzt, um das Kuppeln und die Wahl der Übersetzung als Fahreraufgaben an das Fahrzeug zu übergeben. Sobald der Fahrer selbst kuppelt oder schaltet, wird das System deaktiviert. Der Kundenmehrwert ist vor allem im Komfort zu identifizieren.

Der Sicherheitsmehrwert der „**Stadtassistenz**“ ist ebenfalls durch die erreichte Kupplungs- und Getriebeautomatisierung in Form des „**Notrunterschaltens**“ realisierbar. Aus dem Unfallgeschehen geht ein hoher Anteil an Bremsreaktionen bei Motorradfahrern innerhalb von kritischen Situationen hervor. Diese Reaktion wird in der sekundären Ebene unterstützt. Während der **Gefahrenbremsung** des Motorradfahrers wird bei Erreichen einer unteren Drehzahlgrenze der **Gang nach unten gewechselt**. Durch das Ziehen der Kupplung und schnelle Umgreifen am Gasgriff zur Bremse kann es passieren, dass der Motorradfahrer mit einer Momentenanforderung am Gasgriff (also umgangssprachlich mit „offenem Gas“) bremst, wodurch sich die Motordrehzahl erhöhen würde. Dies wird durch Einregeln der Motordrehzahl auf die – bei theoretisch geschlossener Kupplung – anliegende Drehzahl eingeregelt. Kann eine kritische Situation durch den Motorradfahrer beherrscht werden, so kann er auch nach starker Reduktion seiner Geschwindigkeit direkt in der richtigen Übersetzung weiterfahren. Die Drehzahlanpassung verhindert ein Hochdrehen des Motors und sorgt für ein ruckfreies Einkuppeln. Zudem erhält der Fahrer so eine haptische und akustische Rückmeldung darüber, dass das Fahrzeug die Gefahrenbremsung erkannt hat und die Übersetzung anpasst. So kann sich der Fahrer vollständig auf die primäre Fahraufgabe und damit auf die Vermeidung des Unfalls konzentrieren. Die Gefahr von Folgeunfällen durch ein Anhalten des Motorradfahrers, um für die Weiterfahrt die richtige Übersetzung einzustellen, kann so reduziert werden.

Innerhalb der **primären Fahreraufgabe** kann durch fahrdynamische Eingriffe ebenfalls assistiert werden. Ausgehend vom aktuellen Fahrzeugzustand werden Trajektorien für die Kur-

venfahrt geplant und über den Beobachter potentiell zukünftige Fahrzustände prädiziert. Für diesen Kurvenassistenten kann der Fahrer über Fahrmodi für sein individuelles fahrerisches Können, je nach Bekanntheit der Strecke oder den Witterungsbedingungen entsprechend Grenzwerte für Eingriffe einstellen. Prädiziert das Fahrzeug für die Zukunft keinen Fahrzustand innerhalb der eingestellten Grenzen in der Zukunft, reduziert das Fahrzeug zunächst die Beschleunigungsanforderung. Bleibt eine Reaktion des Fahrers aus, reduziert das Fahrzeug die Beschleunigungsanforderung weiter bis hin zu einem Anbremsen der Kurve mit einer Komfortverzögerung. So können Fehleinschätzungen bezüglich des Streckenverlaufs durch den Fahrer und damit eine nicht angepasste Planung auf Bahnführungsebene vermieden werden. Fahrer genießen zudem den Komfort, auch unbekannte Strecken mit einer höheren Sicherheit befahren zu können.

Auch **Querdynamisch** gibt es eine Vielzahl an Situationen, in denen eine Assistenz dem Fahrer in der primären Fahreraufgabe unterstützen kann:

- Während des Befahrens von **Kurvenfolgen** ist die Wahl der Fahrlinie bei Einspurfahrzeugen entscheidend, mit welcher Wahrscheinlichkeit kritische Situationen entstehen können. Grundsätzlich sollten bei Kurven die Scheitelpunkte der Fahrlinie hinter den Scheitelpunkt der Kurve selbst gelegt werden, was umgangssprachlich „Hinterschneiden“ genannt wird.
- **Linkskurven** sollten immer möglichst weit rechts im eigenen Fahrstreifen angefahren werden. Wird dies missachtet, muss sich der Fahrer das Fahrzeug bei Gegenverkehr kurzzeitig aufstellen und reduziert damit seine Krümmung – er fährt dann innerhalb der Kurve gerade aus. Erst wenn der Fahrer den Gegenverkehr passiert hat, kann er wieder Schräglage einregeln. Hier kann es jedoch vorkommen, dass die Schräglage (und damit die Krümmung), die zum Befahren der Kurve auf der Fahrbahn nötig wäre, durch den Fahrer nicht mehr eingeregelt werden kann und dieser die Fahrbahn verlässt.
- **Bei geringen Geschwindigkeiten** befindet sich das Einspurfahrzeug in einem instabilen Bereich. Das sogenannte labile Gleichgewicht des Fahrzeugs wird durch den Fahrer mittels Lenkimpulse und Gewichtsverlagerung eingeregelt. Das Befahren schmaler Gassen ist häufig Gegenstand von Fahrertrainings und bereitet nicht selten einigen Fahrern Schwierigkeiten.

Ausgehend vom Fahrzeugzustand wird mittels des vorgestellten Modellansatzes ein Krümmungsverlauf zur Referenz – beispielsweise der Ideallinie, der Linkskurvenlinie oder der Mitte der Gasse – und damit ein Gleichgewichtsrollwinkel errechnet. Dieser wird an den unterlagerten Regler weiter gegeben und der Fahrer über additive Lenkmomente unterstützt.

Eine detailliertere Vorstellung dieser Systeme in ihrer prototypischen Umsetzung erfolgt im Vortrag der Tagung.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag umfasst das Unfallgeschehen mit identifizierten Szenarien, der Betrachtung des Fahrers mit Nutzerakzeptanz und Kaufanreizen sowie dem Entwurf eines Beobachters auf Basis der Fahrdynamik. Es wurde eine Methodik vorgestellt, welche es ermöglicht, ganzheitlich Assistenzfunktionen aufzufinden und zu Systemen zusammen zuführen. Es wurde eine Auswahl fahrdynamisch-intervenierender für primäre und sekundäre Fahreraufgaben vorgestellt.

In der Entwicklung der Motorradsicherheit können so nach reaktiven Systemen wie Antiblockiersystemen oder Antriebsschlupfregelsystemen auf Basis von **Modellprädiktion mit Trajektorienplanung** auch aktive und pro-aktive Systeme entwickelt werden (Abbildung 12).

Diese assistieren dem Fahrer während Instabilitäten sowie in Egosituationen. Die Trajektorienplanung mit weiteren Verkehrsteilnehmern in einer dynamischen Umgebung als **Interaktionssituationen** wird durch diesen Beitrag nicht betrachtet. Gerade dieses Gebiet ist im Forschungsbereich PKW durch die Entwicklung des automatisierten Fahrens stark im Fokus und wird ein Bereich sein, von dem die Motorradsicherheit in Zukunft stark profitiert. Diese Arbeit leistet hingegen einen Beitrag, um eben diese Erkenntnisse in Zukunft auf motorisierte Zweiräder adaptieren zu können.

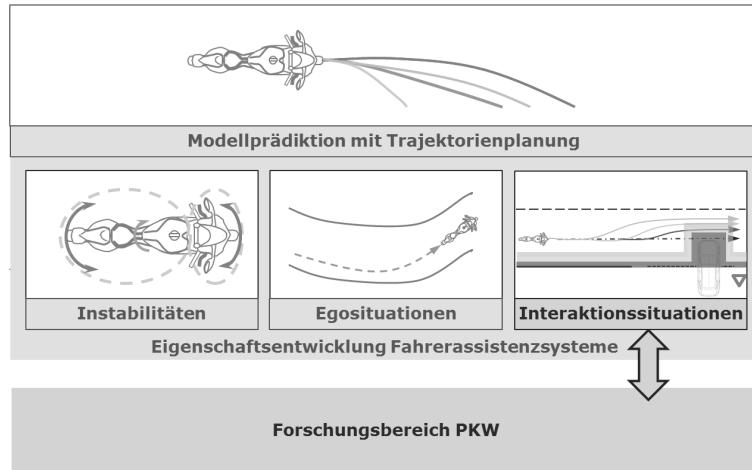


Bild 12: Zusammenfassung des Beitrags und Ausblick

Aus dem Unfallgeschehen ging ebenso hervor, dass Motorradfahrer oft durch andere Fahrzeugführer – vorrangig PKW-Fahrer – nicht gesehen/wahrgenommen oder falsch eingeschätzt werden. Hier steigt aufgrund aktueller Entwicklungen der Handlungsbedarf in Hinblick auf einen Partnerschutz für motorisierte Zweiräder.

Im Zuge der aktuellen Entwicklung und Einführung von intelligenten Verkehrssystemen (engl. Cooperative Intelligent Transport Systems, kurz C-ITS) fanden sich im Rahmen des Connected Motorcycle Consortiums (CMC)⁵ neben BMW Motorrad weitere internationale Motorradhersteller zusammen. Hier engagiert sich die TU Dresden als wissenschaftlicher Partner, um Gemeinsam mit allen Partnern Standards für derartige Systeme zu identifizieren und zu kommunizieren. Gerade hier finden sich neue Potentiale für neue Assistenzsysteme, sowohl für den PKW als auch für Motorräder der Zukunft.

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesamt, Statistisches: Fachserie 8 Reihe 7, Verkehr – Verkehrsunfälle 2016. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2017
- [2] Beanland, V., Lenné, M. G., Fu-essl, E., Oberlader, M., Joshi, S., Bellet, T. & Yannis, G. (2013). Acceptability of rider assistive systems for powered two-wheelers. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 19, 63-76
- [3] Bjørnskau, T., Nævestad, T. O., & Akhtar, J. (2012). Traffic safety among motorcyclists in Norway: A study of subgroups and risk factors. *Accident Analysis & Prevention*, 49, 50-57.
- [4] Dick, M. (2002). Auf den Spuren der Motive, Auto zu fahren.
- [5] Donges, E. (1982). Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *AUTOMOB-IND* 27(2), 183–190.
- [6] Getz, N. H. (1995). Dynamic inversion of nonlinear maps with applications to nonlinear control and robotics. Ph. D. thesis, University of California at Berkeley.
- [7] Hans S., Krehel M., Köbe M., Prokop G. (2016). A Cascaded Model-Predictive Approach To Motorcycle Safety, AVEC'16, 13th Symposium on Advanced Vehicle Control, Munich, 13-16. September 2016
- [8] Huth, V., & Gelau, C. (2013). Predicting the acceptance of advanced rider assistance systems. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 51-58.
- [9] Mai M., Tüschen T., Prokop G.: „A physiological based Driver Model for longitudinal Vehicle Guidance and its Challenges in Validation“ – 3rd International Symposium on Future Active Safety Technology Towards zero traffic accidents (FAST-zero), Göteborg, 09.-11. September 2015.

⁵ <http://www.cmc-info.net/>

- [10] Mai M., Wang L., Helmer T., Prokop G.: „Numerical driver behaviour model for stochastic traffic simulation for the evaluation of driver assistance systems and automated driving functions“ – 7. Tagung Fahrerassistenz, München, 25.-26. November 2015.
- [11] Mai M., Wang L., Prokop G.: „Advancement of the car following model of Wiedemann on lower velocity ranges for urban traffic simulation“ – The Driving Simulation Conference 2016 VR, Paris, 07.-09. September 2016.
- [12] Mai M.: „Simulation der sensorischen Wahrnehmung des Fahrers als Teil eines Fahrerverhaltensmodells zur Entwicklung und Bewertung warnender Fahrerassistenzsysteme“ – 9. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit, Berlin, 20.-21. November 2013.
- [13] Mai, Marcus: Fahrerverhaltensmodellierung für die prospektive, stochastische Wirksamkeitsbewertung von Fahrerassistenzsystemen der Aktiven Fahrzeugsicherheit, Dissertation, Schriftenreihe des Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik der TU Dresden (Band 4), Dresden, 2017
- [14] Mannerling, F. L., & Grodsky, L. L. (1995). Statistical analysis of motorcycleists' perceived accident risk. *Accident Analysis & Prevention*, 27(1), 21-31
- [15] Prokop, G. (2001). Modeling human vehicle driving by model predictive online optimization. *Vehicle System Dynamics* 35 (1), 19–53.
- [16] Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* 3, 257–266.
- [17] Ring, P.; Wang, L.; Fahrenkrog, F.; Jung, O.; Prokop, G.: "Modelling Cognitive Driver Behavior In The Context Of Prospective Safety Assessment " - 26. Aachener Kolloquium, Aachen, 10.10.2017.
- [18] SARTRE4 (Social Attitudes to Road Traffic Risk in Europe). (2012). European road users' risk perception and mobility – The SARTRE 4 survey
- [19] Schönhammer, R. (1991). In Bewegung: zur Psychologie der Fortbewegung. Quintessenz-Verlag.
- [20] Tunnicliff, D., Watson, B., White, K. M., Lewis, I., & Wishart, D. (2011). The social context of motorcycle riding and the key determinants influencing rider behavior: a qualitative investigation. *Traffic injury prevention*, 12(4), 363-376
- [21] Yi, J., Y. Zhang, &D. Song (2009). Autonomous motorcycles for agile maneuvers, part i: Dynamic modeling. In Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on, pp. 4613–4618. IEEE.

Können ITS-Systeme das Sicherheitsniveau von motorisierten Zweirädern erhöhen?

Dr.-Ing. **Matthias Kühn**, Dipl.-Ing. (FH) **Mike Lindenau**,
Unfallforschung der Versicherer, Berlin

Kurzfassung

Ziel der Studie war es, das theoretische Potential künftiger intelligenter Kommunikationstechnologien (ITS) im Unfallgeschehen motorisierter Zweiräder (MZR) zu quantifizieren, um Empfehlungen für zukünftige Entwicklungsrichtungen geben zu können. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden unter ITS intelligente Sicherheitssysteme verstanden, die u. a. mit der Umwelt Informationen austauschen können, um die Sicherheit von MZR zu erhöhen. Unter MZR sind hier alle motorisierten Zweiräder, vom Mofa bis zum Motorrad zusammengefasst. Für die vorliegende Studie wurden, ausgehend vom Unfallgeschehen der amtlichen Statistik, detailliert die Unfälle der Unfalldatenbank der Versicherer analysiert. In einem weiteren Schritt wurden generische, intelligente ITS-Sicherheitssysteme definiert und den Schwerpunkten des Unfallgeschehens per Einzelfallanalyse zugeordnet. Abschließend erfolgte eine Bewertung der vielversprechendsten Systeme für MZR. Zu den bewerteten Systemen gehören u.a. ein Linksabbiegeassistent, ein Kurvenwarner sowie ein Kreuzungs- und Querverkehrsassistent.

Das zugrunde liegende Unfallmaterial aus den Jahren 2002 bis 2012 umfasst insgesamt mehr als 800 Unfälle mit motorisierten Zweirädern. Bei diesen Unfällen handelt es sich um MZR-Alleinunfälle sowie um MZR-Unfälle mit zwei Beteiligten, jeweils mit Personenschaden und einem Schadenaufwand von 15.000 Euro und mehr.

Es zeigt sich, dass die definierten ITS-Systeme für motorisierte Zweiräder in der Lage sind, das Unfallgeschehen motorisierter Zweiräder positiv zu beeinflussen. Die ersten vier Systeme im Ranking adressieren mehr als zwei Drittel aller Unfälle mit Beteiligung von MZR. Für die Alleinunfälle zeigt sich, dass ein Kurvenwarner mehr als 50% der Unfälle adressieren würde. Bei der Bewertung der Unfälle mit zwei Beteiligten, die der MZR-Fahrer nicht verursachte, dominieren der Kreuzungs- und Querverkehrsassistenten sowie der Linksabbiegeassistent.

Bei der Entwicklung von ITS-Systemen für motorisierte Zweiräder ist es entscheidend, der Mensch-Maschine-Schnittstelle eine besondere Bedeutung zukommen zu lassen, um Ablenkung etc. zu vermeiden und eine hohe Akzeptanz beim Fahrer zu erreichen.

1. Einleitung

Fahrer von motorisierten Zweirädern (MZR) sind im Straßenverkehr besonders gefährdet. Die UDV hat in mehreren Projekten das Unfallgeschehen von MZR untersucht und dabei festgestellt, dass die technischen Möglichkeiten, Mofa-, Moped- und Motorradunfälle zu verhindern oder abzuschwächen, bislang sehr begrenzt sind.

Deshalb hat die UDV untersucht, welche zukünftigen technischen Entwicklungen sich positiv auf das Unfallgeschehen auswirken könnten. In der Fachwelt wird in diesem Zusammenhang von Intelligenten Verkehrssystemen (IVS), Intelligent Transport Systems (ITS) oder auch Vehicle-to-X (V2X) Systemen gesprochen. Darunter versteht man alle Systeme der Informations- und Kommunikationstechnologie im Straßenverkehrssektor, die einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Umweltleistung, der Effizienz und der Straßenverkehrssicherheit leisten. Im Rahmen dieser Untersuchung werden darunter intelligente Sicherheitssysteme verstanden, die u. a. mit der Umwelt Informationen austauschen können, um die Sicherheit von MZR zu erhöhen. MZR sind hier alle Arten von motorisierten Zweirädern, vom Mofa über das Moped bis zum Motorrad. Hierzu werden ausgehend vom Unfallgeschehen der amtlichen Statistik die Unfälle mittels der Unfalldatenbank der Versicherer detailliert auf ihre Schwerpunkte hin analysiert. In einem nächsten Schritt werden denkbare intelligente Sicherheitssysteme definiert und den Unfallschwerpunkten per Einzelfalluntersuchung zugeordnet. Abschließend erfolgt eine Bewertung der vielversprechendsten Systeme für MZR.

Stellt man die Getötetenstatistik nach Wahl des Verkehrsmittels aus den Jahren 1996 und 2016 gegenüber (Bild 1), so wird klar, dass der relative Anteil der getöteten MZR-Nutzer um nahezu 70 % stieg. Bei den getöteten Pkw-Nutzern hat sich der Anteil im gleichen Zeitraum um etwa 15 Prozentpunkte verringert. Betrachtet man die absolute Anzahl der Getöteten beider Gruppen, so kann man bei den Pkw-Nutzern einen Rückgang von 73 % verzeichnen, während bei MZR-Nutzern ein Rückgang von nur 38 % registriert werden kann.

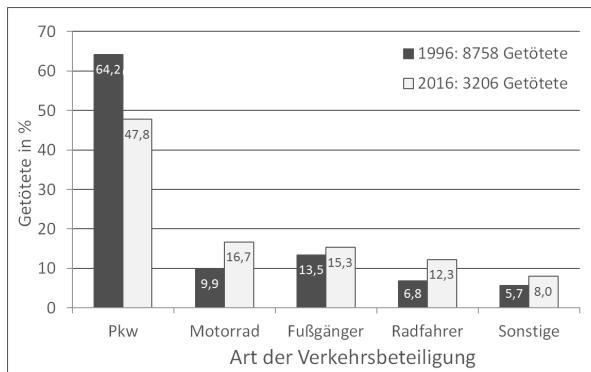


Bild 1: Getötetenanteil nach Art der Verkehrsbeteiligung 1996 und 2016
[Quelle: Statistisches Bundesamt 1997 und 2017].

2. Unfallgeschehen

Betrachtet man Hauptverursacher und Beteiligte in der amtlichen Statistik 2016 bei Unfällen mit MZR-Beteiligung (Bild 2), so kann man erkennen, dass von allen Unfällen 28 % auf Alleinunfälle und 66 % auf Unfälle mit zwei Beteiligten entfallen. Von den Unfällen mit zwei Beteiligten wurde bei etwa einem Drittel aller Unfälle der MZR-Fahrer als Hauptverursacher benannt.

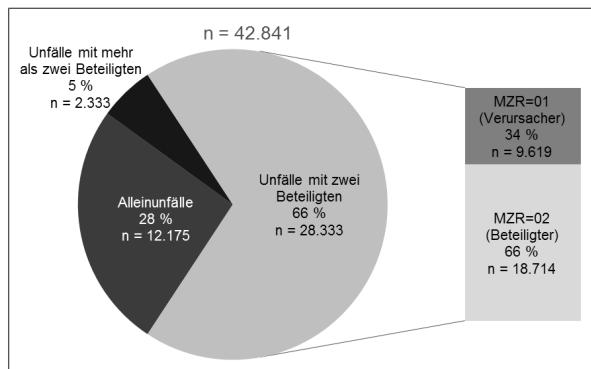


Bild 2: MZR-Unfälle mit Personenschaden nach Hauptverursacher und Beteiligten, Amtliche Statistik 2016 [Quelle: Statistisches Bundesamt 2017]

Addiert man die Alleinunfälle und die Unfälle mit zwei Beteiligten, die durch den MZR-Fahrer verursacht wurden, so lässt sich die Aussage ableiten, dass 54 % aller Unfälle mit Personenschaden und nicht mehr als zwei Beteiligten durch den MZR-Fahrer verursacht wurden. Weiterhin kann man der amtlichen Statistik 2016 entnehmen, dass 61 % aller Unfälle mit Getöteten und nicht mehr als zwei Beteiligten durch den MZR-Fahrer verursacht wurden.

Zum Auffinden der häufigsten Unfallszenarien wurden im Folgenden die Alleinunfälle sowie die Unfälle mit zwei Beteiligten, unterteilt nach Hauptverursachung, aus der Unfalldatenbank der Versicherer (UDB) analysiert. Die Analyse basiert auf den im Forschungsbericht FS03 „Fahrerassistenzsysteme“ aus dem Jahre 2011 [1] vorgestellten Ergebnissen sowie der Unfallforschung kompakt Nr.45 aus dem Jahre 2014 [2] und wurde 2017 aktualisiert.

Das zugrunde liegende Unfallmaterial aus den Jahren 2002 bis 2012 umfasst 1179 Unfälle mit motorisierten Zweirädern, davon 69 % Motorräder, 20 % Mofa/Moped und 11 % Leichtkrafträder mit 50 bis 125 ccm, aus denen die Hauptunfallszenarien abgeleitet wurden, um die Schwerpunkte bei Unfällen mit MZR aufzuzeigen.

Im UDB-Unfallmaterial befinden sich Kraftfahrzeug-Haftpflichtschäden mit Personenschaden und einem Schadenaufwand von mindestens 15.000 Euro. Hieraus ergibt sich systembedingt eine unterrepräsentierte Anzahl von Alleinunfällen, da diese nur dann im Unfallmaterial auftauchen, wenn ein Dritter (z. B. Sozus) geschädigt wurde.

Für die Analyse der Alleinunfälle standen in der UDB 116 Unfälle zur Verfügung. Es zeigte sich (Bild 3), dass 47 % aller Alleinunfälle durch einen Sturz auf die Fahrbahn, typischerweise durch Kontrollverlust über das Motorrad auf verunreinigter, unebener oder nasser Fahrbahn, entstehen.

An zweiter und dritter Stelle folgen das Abkommen von der Fahrbahn nach rechts mit 36 % und das Abkommen von der Fahrbahn nach links mit 16 %. Diese beiden Szenarien werden geprägt durch nicht angepasste Geschwindigkeit in Kurven und bei ungünstigen Witterungsbedingungen.

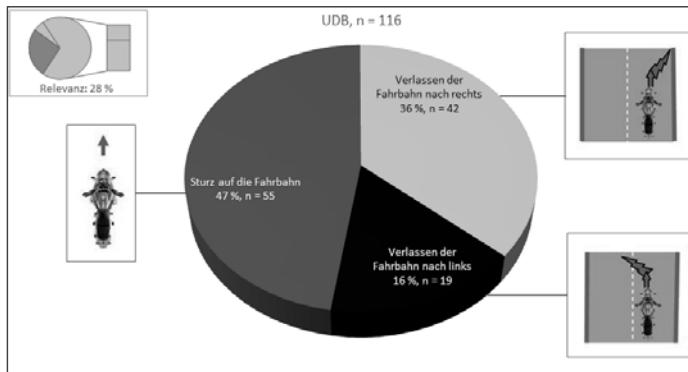


Bild 3: Häufigste Szenarien von MZR-Alleinunfällen, basierend auf UDB-Analysen

Bei den Unfällen mit zwei Beteiligten, bei denen der MZR-Fahrer Hauptverursacher war, standen in der UDB 420 Unfälle zur Verfügung (Bild 4). Am häufigsten trat das Szenario des Zusammenstoßes mit einem entgegenkommenden Fahrzeug mit 41 % auf, gefolgt vom Zusammenstoß mit einem in gleicher Richtung fahrenden Fahrzeug mit 22 % und vom Zusammenstoß mit einem von rechts kommenden Fahrzeug mit 14 %.

Weitere Szenarien waren der Zusammenstoß mit einem stehenden, parkenden oder verkehrsbedingt haltenden Fahrzeug mit 10 % sowie der Zusammenstoß mit einem von links kommenden Fahrzeug mit 8 %.

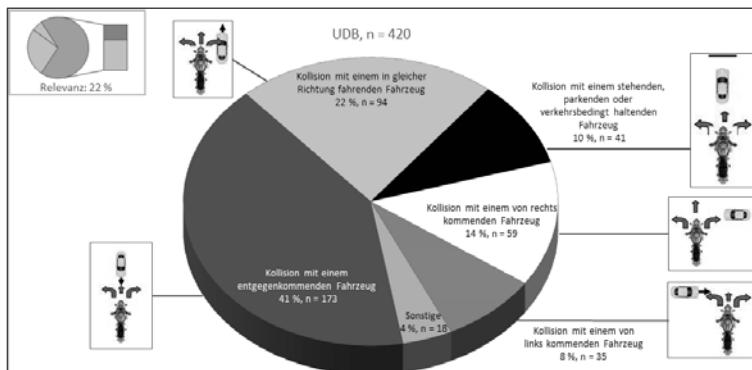


Bild 4: Häufigste Szenarien von durch MZR verursachte Unfälle, basierend auf UDB-Analysen

Die Auswertung der Unfälle mit zwei Beteiligten, bei denen der MZR-Fahrer Unfallbeteiligter war, konnte mit 643 Unfällen aus der UDB durchgeführt werden (Bild 5). Aus Sicht des Hauptverursachers waren die beiden häufigsten Szenarien der Zusammenstoß mit einem von links kommenden MZR mit 30 % und der Zusammenstoß mit einem entgegenkommenden MZR mit ebenfalls 30 %. Gefolgt werden diese Szenarien vom Zusammenstoß mit einem in gleicher Richtung fahrenden MZR mit 21 % und dem Zusammenstoß mit einem von rechts kommenden MZR mit 16 %.

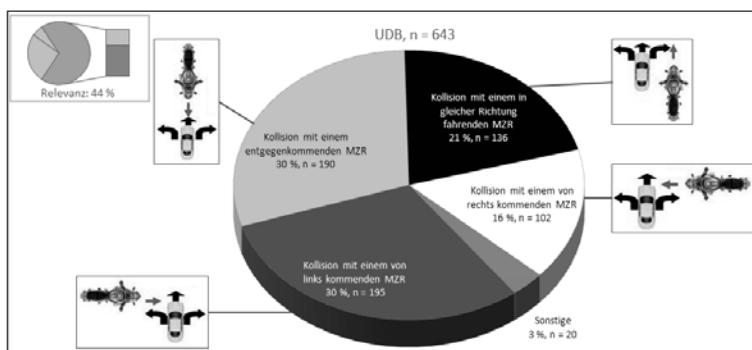


Bild 5: Häufigste Szenarien von nicht durch MZR verursachte Unfälle, basierend auf UDB-Analysen

2. Ganzheitliche Betrachtungen der Maßnahmen

Die Maßnahmen zur Erhöhung der MZR-Sicherheit können wie in Tabelle 1 in die Kategorien der aktiven und passiven Sicherheit sowie jeweils in die Teilbereiche Fahrzeug, Fahrer und Straße unterteilt werden. Der Einsatz neuer Fahrwerkskonzepte wie z. B. dem dreirädrigen Fahrwerk könnte den Fahrer durch die Verringerung der Sturzgefahr und die Erhöhung der übertragbaren Bremskräfte unterstützen.

Das seit 2016/2017 gesetzlich vorgeschriebene ABS für Motorräder über 125 ccm ist für Leichtkrafträder mit 50 bis 125 ccm derzeit nur bei namhaften Herstellern verfügbar [3]. Für Mofa/Moped bis 50 ccm ist ABS überhaupt nicht im Angebot.

ABS für Motorräder wird seit Mitte der 2000er Jahre verstärkt angeboten. Ein kurventaugliches ABS kam jedoch erst im Jahr 2014 mit dem MSC von Bosch auf den Markt [4].

Tabelle 1: Möglichkeiten zur Erhöhung der Sicherheit unter Einbindung von Fahrzeug, Fahrer und Straße

	Aktive Sicherheit	Passive Sicherheit
Fahrzeug	Fahrwerk, Bremse, Beleuchtung, FAS, ITS-Kollisionswarner, HMI <ul style="list-style-type: none"> ▪ Neue Fahrwerks-Konzepte (z.B. „Dreirad“ Piaggio MP3) ▪ Dynamische Traktionsregelung mit Schräglageerkennung ▪ ABS mit Kurvenbremsung ▪ Verbesserte Lichtsysteme (Xenonlicht, Tagfahrlicht) ▪ Speed Limit Information ▪ Assistenzsysteme im Längsverkehr (Überholassistent, Auffahr- und Kurvenwarnung, Linksabbiegeassistent) ▪ Assistenzsysteme im Querverkehr (Kreuzungsassistent, Querverkehrsassistent) ▪ Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation (simTD) ▪ Beachtung der Schnittstelle zum Fahrer (HMI) 	Rückhaltesysteme, ITS <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sicherheitszelle und Gurt (siehe BMW C1) ▪ Airbag ▪ Automatische Sturzerkennung und Notruf
Fahrer	Training <ul style="list-style-type: none"> ▪ e-Learning ▪ GermanSafetyTour (im Realverkehr) ▪ Neue Erkenntnisse abgeleitet aus Naturalistic Riding Studies 	Schutzkleidung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktive Schutzkleidung und Helm
Straße	Entschärfung von Unfallschwerpunkten durch Straßenführung und ITS <ul style="list-style-type: none"> ▪ Merkblatt zur Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Motorradstrecken (MVMot) ▪ Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation (simTD) 	Seitenraumentschärfung durch motorradfreundliche Schutzeinrichtungen <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutzplanken mit Unterfahrschutz (MVMot) ▪ Erdwälle als Alternative

Das in Bild 6 gezeigte Beispiel eines neuen Fahrzeugkonzepts beinhaltet bereits zukunftsweisende ITS-Systeme zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit. Im Bereich der aktiven Schutzkleidung werden etwa seit dem Jahr 2000 Airbag-Jacken und Airbag-Helme angeboten. Die Marktdurchdringung dieser intelligenten Schutzkleidung ist allerdings noch gering.

Für die Verbesserung der straßenseitigen Sicherheit ist das Merkblatt zur Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Motorradstrecken (MVMot) [6] hervorzuheben. In Zukunft könnte diese noch durch die Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation verbessert werden.



Bild 6: Beispiel für ein neues Fahrzeugkonzept: Das BMW Motorrad Advanced Safety Concept [5]

3. Grundlagen

Zur Bewertung von ITS-Technologien werden folgende generische Sicherheitsanwendungen definiert:

- Die **Dynamische Stabilitätskontrolle** beinhaltet ein erweitertes ABS und kurventaugliche Stabilitätsprogramme, die auch Bremsen und Beschleunigen in Schräglage zulassen.
- Der **Kurvenwarner** warnt vor einer Kurve, wenn die Geschwindigkeit zu hoch für eine sichere Kurvendurchfahrt ist und gibt einen situationsangepassten Richtwert an.
- Der **Überholassistent** warnt beim beabsichtigten Spurwechsel oder beim Linksabbiegen vor einem gerade überholenden Beteiligten in gleicher Fahrtrichtung.
- Der **Gegenverkehrwarner** warnt beim Überholen vor einem herannahenden, entgegenkommenden Beteiligten.
- Der **Wendeassistent** warnt beim Wenden vor einem überholenden oder entgegenkommenden Beteiligten.
- Der **Auffahrwarner** warnt vor dem Auffahren auf einen in gleicher Richtung vorausfahrenden oder stehenden Beteiligten.
- Der **Kreuzungs- und Querverkehrsassistent** warnt an einer Kreuzung/Einmündung/Einfahrt vor einem kreuzenden Beteiligten auf Kollisionskurs, der möglicherweise noch nicht zu sehen ist.

- Der **Linksabbiegeassistent** warnt beim Linksabbiegen vor einem entgegenkommenden Beteiligten, mit dem ein Zusammenstoß stattfinden könnte.

Um die Relevanz der Sicherheitsanwendungen zu evaluieren wird eine Einzelfall-Analyse der im Kapitel 1 als Schwerpunkte erkannten 1179 Unfälle durchgeführt. Da im Einzelfall mehrere der genannten Systeme wirksam sein können, wird die Festlegung getroffen, dass pro Unfall nur ein System wirken kann, auch wenn mehrere Systeme den Unfall adressieren würden. Es wird das System gewählt, das die höchste Wirksamkeit verspricht. Der Einfluss des Fahrerverhaltens wurde nicht untersucht.

Anschließend wird eine Bewertung der meistversprechenden Systeme vorgenommen, die die Häufigkeit der Nennung der wirkenden Systeme über die einzelnen Unfallszenarien zur Grundlage hat. Da die Alleinunfälle in der UDB unterrepräsentiert sind, da eine Meldung an die Versicherung nur bei Schädigung Dritter erfolgt, hat dies auch insofern Auswirkungen auf die Bewertung der Systeme, als dass die bei Alleinunfällen relevanten ITS-Systeme ebenfalls unterrepräsentiert sind.

Der Nutzen von ITS wurde bereits in verschiedenen Projekten belegt.

So konnte im Projekt SAFERIDER die Wirksamkeit von ITS durch Assistenzsysteme für motorisierte Zweiräder sowohl in der aktiven als auch in der passiven Sicherheit deutlich herausgestellt werden (z. B. Kurvenwarner und eCall) [7]. Das nationale Forschungsprojekt simTD konnte durch einen groß angelegten Feldversuch und unter Einbeziehung der Infrastruktur sowie verschiedenster Fahrzeuge, darunter auch Motorräder, belegen, dass die Fahrzeug-zu-X Kommunikation praxistauglich ist (z. B. Kreuzungs- und Querverkehrsassistent). So zeigte der Linksabbiegeassistent zum Schutz von Motorradfahrern bereits das Potenzial zur Vermeidung vieler Unfälle [8]. Im Projekt MOSAFIM wird der Sturzerkennung mit automatischer Notruf-Absetzung ein großer Nutzen attestiert [9].

4. Bewertung der ITS-Technologien

Die in Kapitel 1 aufgeführten Schwerpunkte von Unfällen wurden per Einzelfallanalyse auf positive Beeinflussbarkeit durch die definierten, generischen ITS-Systeme geprüft. Ein System wurde als wirksam in dem speziellen Szenario erachtet, wenn es in der Lage ist, den Unfall zu vermeiden oder die Unfallfolgen zu reduzieren.

Für den Bereich der **Alleinunfälle** zeigte sich (Bild 7), dass 59 % aller Alleinunfälle in erster Linie durch einen Kurvenwarner hätten adressiert werden können. An zweiter Stelle folgt mit 18 % die dynamische Stabilitätskontrolle. Für die verbleibenden 23 % konnte keine der in Kapitel 3 definierten Anwendungen mit Sicherheit zugeordnet werden.

Aktuell ist auch als weiteres ITS-System, der automatische Notruf (**eCall**) für Motorräder, in der Diskussion [10]. Dieser soll helfen, die Zeit bis zum Eintreffen von Polizei oder Rettungskräften zu verkürzen, wenn der Fahrer nicht mehr in der Lage ist, den Notruf selbst zu wählen. Gerade bei Alleinunfällen könnte dieses System hilfreich sein. Allerdings kann nur von einer eindeutig positiven Systemwirkung ausgegangen werden, wenn kein anderer Verkehrsteilnehmer vor Ort einen Notruf absetzen kann. In diesem Zusammenhang hat die UDV in einem Forschungsprojekt eine Wirksamkeit von eCall in Höhe von 15 %, bei Verletzungen mit MAIS 3+, bis 35 %, bei leichteren Verletzungen, bezogen auf alle Alleinunfälle ermittelt [11]. Entsprechend der amtlichen Statistik (siehe Bild 2) würde dies eine Wirksamkeit des automatischen Notrufs von etwa 4 bis 10 % bezogen auf alle Unfälle mit Personenschäden in Deutschland im Jahr 2016 bedeuten. Diese Wert entspricht in etwa den im EU-Projekt I_HeERO als relevant eingestuften 310 von 4052 Unfällen (7,7 %) [12].

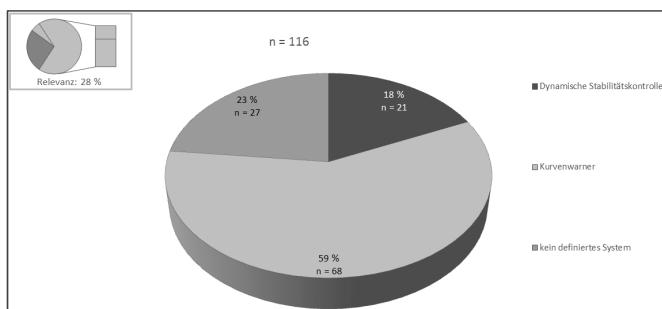


Bild 7: Positive Beeinflussbarkeit von MZR-Alleinunfällen durch ITS-Systeme

Bei Unfällen mit zwei Beteiligten, bei denen der MZR-Fahrer Hauptverursachter war (Bild 8), wurde dem Kurvenwarner mit 23 % das höchste Potenzial attestiert. Gefolgt wird das System vom Kreuzungs- und Querverkehrsassistenten mit 19 %, dem Überholassistenten mit 15 %, dem Auffahrwarner mit 13 % sowie dem Gegenverkehrwarner mit 12 %. Der dynamischen Stabilitätskontrolle konnten in 7 % der Fälle die höchste Wirksamkeit zugeschrieben werden. Weitere Potenziale ergaben sich durch den Linksabbiegeassistenten mit

5 % und den Wendeassistenten mit 1 %. Für die verbleibenden 6 % der Unfälle wurde keines der analysierten ITS-Systeme als sinnvoll erachtet.

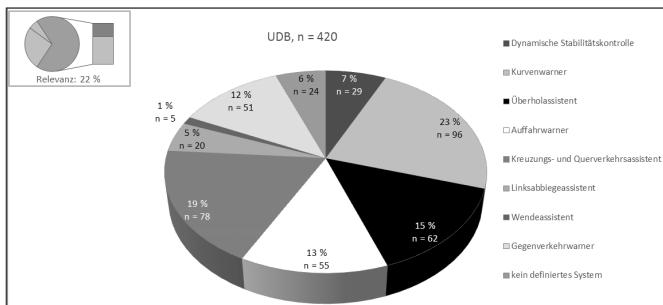


Bild 8: Positive Beeinflussbarkeit von durch MZR verursachten Unfällen durch ITS-Systeme

Die Bewertung der **Unfälle mit zwei Beteiligten, bei denen der MZR-Fahrer Unfallbeteiligter war** (Bild 9), ergab ein Potenzial von 37 % für den Kreuzungs- und Querverkehrsassistenten. In 23 % der Unfälle hätte der Linksabbiegeassistent einen Unfall positiv beeinflussen können, gefolgt vom Überholassistenten mit 15 %. Weitere positive Beeinflussbarkeit ergab sich durch den Wendeassistenten und den Auffahrwarner mit jeweils 5 %, den Gegenverkehrswarner sowie die dynamische Stabilitätskontrolle mit jeweils 3 % und den Kurvenwarner mit 1 %.

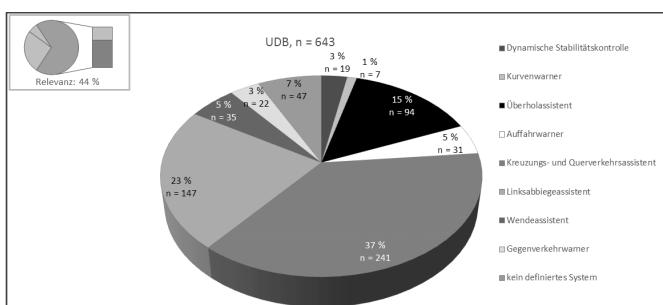


Bild 9: Positive Beeinflussbarkeit von nicht durch MZR verursachten Unfällen durch ITS-Systeme

5. Rangfolge der vielversprechendsten Systeme

Die definierten Systeme werden im Folgenden entsprechend der Häufigkeit ihrer Nennung bezogen auf alle untersuchten 1179 UDB-Unfälle platziert. Das Unfallgeschehen spiegelt sich hierbei in den Systemen wider.

Bild 10 ist zu entnehmen, dass Systeme, die vor kreuzendem Verkehr warnen, die meisten der betrachteten Unfälle positiv beeinflussen können. Der Kurvenwarner entwickelt sein höchstes Potenzial bei Alleinunfällen und bei von MZR verursachten Unfällen mit zwei Beteiligten. Da die Alleinunfälle in dieser Untersuchung unterrepräsentiert sind, wird dieses System im realen Unfallgeschehen eine noch größere Bedeutung haben. Der Linksabbiegeassistent, der bereits in simTD prototypisch realisiert wurde, und der Überholassistent zeigen hier ebenso ihre hohe Relevanz im Schadengeschehen. Die genannten vier Systeme sollten also möglichst schnell umgesetzt werden. Die dynamische Stabilitätskontrolle würde die meisten Szenarien positiv beeinflussen. Aufgrund des Bewertungsansatzes, bei dem nur das voraussichtlich wirksamste System pro Unfall ausgewählt wurde, sind die Vorteile jedoch nicht klar herausstellbar.

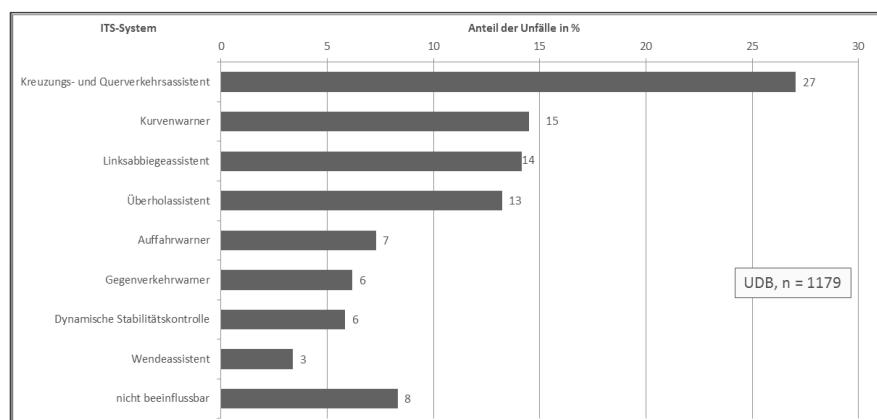


Bild 10: Rangfolge der vielversprechendsten Systeme

Bei einer Unterteilung der MZR in kleine MZR bis 125 ccm (Mofa/Moped+Leichtkraftrad) und große MZR über 125ccm (Motorrad) zeigt sich, dass für große MZR die ersten vier Systeme von gleich hoher Bedeutung sind. Der Gegenverkehrswarner ist hier auch ein wichtiges System (Bild 11). Bei kleinen MZR hingegen kommt dem Kreuzungsassistenten eine überragende Rolle zu. Der Überholassistent mit weniger als der Hälfte der positiv beeinflussbaren Un-

fälle findet sich an zweiter Stelle. Dies ist ein Abbild der unterschiedlichen Nutzung und damit auch des unterschiedlichen Unfallgeschehens.

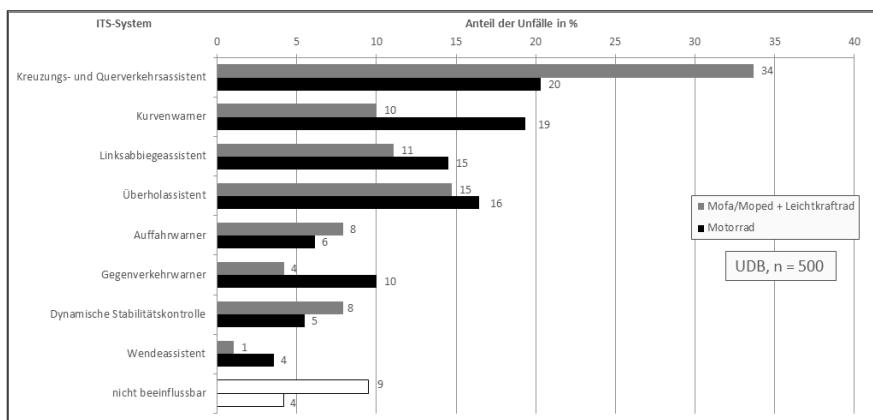


Bild 11: Rangfolge der vielversprechendsten Systeme, unterteilt nach MZB-Art

6. Zusammenfassung der Ergebnisse

In der Untersuchung wurde auf einer theoretischen Ebene analysiert, ob Unfälle mit motorisierten Zweirädern durch den Einsatz von ITS-Systemen positiv beeinflussbar wären und dadurch die Sicherheit im Straßenverkehr erhöht werden könnte.

Es zeigt sich, dass die definierten ITS-Systeme für motorisierte Zweiräder in der Lage wären, die Sicherheit positiv zu beeinflussen. Die ersten vier Systeme im Ranking adressieren mehr als zwei Drittel aller Unfälle. Das sind der Kreuzungs- und Querverkehrsassistent, der Kurvenwarner, der Linksabbiegeassistent sowie der Überholassistent. Um den Sicherheitsgewinn dieser vielversprechenden Systeme genauer beziffern zu können, sind weitere, vertiefende Untersuchungen notwendig. Dies gilt insbesondere für die in dieser Untersuchung unterrepräsentierten Alleinunfälle.

Bei der Entwicklung von ITS-Systemen für motorisierte Zweiräder ist es entscheidend, der Mensch-Maschine-Schnittstelle eine besondere Bedeutung zukommen zu lassen, um Ablenkung etc. zu vermeiden und die Akzeptanz beim Fahrer zu erhöhen. Es müssen die Beson-

derheiten des Zweiradfahrens berücksichtigt werden, da sich das Fahren eines Einspurfahrzeugs deutlich vom Führen eines Pkws unterscheidet.

7. Literaturangaben

- [1] Hummel, T., Kühn, M., Bende, J., Lang, A.: Forschungsbericht FS03 Fahrerassistenzsysteme – Ermittlung des Sicherheitspotenzials auf Basis des Schadengeschehens der Deutschen Versicherer. Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV), Berlin, 2011, ISBN 978-3-939163-37-4
- [2] Lindenau, M., Kühn, M.: Intelligente Systeme zur Verbesserung der Motorradsicherheit. Unfallforschung der Versicherer, Unfallforschung kompakt Nr. 45, Berlin, 2014
- [3] VERORDNUNG (EU) Nr. 168/2013 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 15. Januar 2013 über die Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen. In: Amtsblatt der europäischen Union L60, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013R0168&from=DE>
Aufruf am 18.09.2017
- [4] http://www.bosch-motorcycle.com/de/de/fahrsicherheit_fuer_zweiraeder/sicherheitssysteme_fuer_zweiraeder/motorrad_stabilitaetskontrolle/motorcycle_stability_control.html
Aufruf am 18.09.2017
- [5] <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0114536EN/bmw-motorrad-innovation-day-2011-bmw-motorrad-connectedride-advanced-safety-concept>
Aufruf am 18.09.2017
- [6] http://www.passco.de/fileadmin/contents/news/2007/10/10_motorradfahrerschutz.pdf
Aufruf am 18.09.2017
- [7] http://www.saferider-eu.org/assets/docs/news/SAFERIDER_ICT_2010_Press_Release_ud.pdf
Aufruf am 18.09.2017
- [8] http://www.simtd.de/index.dhtml/deDE/backup_publications/Informationsmaterial.html
Aufruf am 18.09.2017
- [9] https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/projects_sources/mosafim_final_report.pdf
Aufruf am 18.09.2017
- [10] http://www.acem.eu/images/stories/doc/safety/d_ConsultationeCall_ACEM_31993.pdf
Aufruf am 18.09.2017

- [11] Priester, J., Wilhelm, B., et al.: Forschungsbericht Nr. 30 Unfälle mit Krafträdern im Saarland. Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV), Berlin, 2015, ISBN 978-3-939163-58-9
- [12] Mörbe, M.: Ecall for Powered Two Wheeler Status after 90% of the I_HeERO Project. Robert Bosch GmbH, unveröffentlichte Präsentation, Brüssel, 15. September 2017

Sicherheit Lithium-Ionen-Batterien in Kfz – Risiken und Gefährdungen, Crashverhalten, Weiterbetrieb nach Crash und numerische Simulation

Dipl. Ing. **Lars Hollmotz, Silvio Kott**,
Strategic Support DL UG, Potsdam;
Dr.-Ing. **Oliver Schoeneich**, IAT mbH, Berlin

Zusammenfassung

Ein mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbares Sicherheitsniveau von Lithium-Ionen-Batterien in Kraftfahrzeugen ist eine Grundvoraussetzung für die Akzeptanz von Hybrid- und Elektrofahrzeugen im Markt. In der Entwicklung von elektrischen Energiespeichern sind eine große Anzahl von Spezifikationen zu erfüllen, welche sich an den Anforderungen konventioneller Fahrzeuge orientieren und teilweise darüber hinausgehen.

Dieser Vortrag gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik und den Risiken in Bezug auf die Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien, welche durch Einflüsse wie kalendari- sche und zyklische Alterung, Temperatur sowie Beschleunigungen/Intrusion z.B. aufgrund von Unfällen auftreten können.

Ein weiterer Fokus liegt im Bereich der Crashabläufe in einer Batterie sowie deren Auswirkungen auf einen potentiellen Weiterbetrieb. Dieser erscheint grundsätzlich möglich, allerdings ist auf bestimmte Randbedingungen und Auslegungskriterien insbesondere im Entwicklungspro- zess zu achten.

Weiterhin werden einige Effekte, welche in einer Einzelzelle auftreten, anhand eines selbst erstellten Simulationsmodells (prismatische Einzelzelle) für verschiedene Crashszenarien auf- gezeigt. Es wurden Prinzipuntersuchungen zu der Beschleunigungswirkung für Front-, Seiten- und Heckcrashkonfigurationen sowie für einen 150g-Sinuspuls durchgeführt. Zusätzlich wur- den zwei Ladezustände der Batterie (geladen und entladen) für diese Szenarien betrachtet. Der Unterschied zwischen den Zuständen „geladen“ und „entladen“ besteht in dem Volumen des Zellwickels, welcher im geladenen Zustand größer ist. Dadurch werden die Kinematik und die Kontaktkräfte innerhalb der Zelle zwischen Wickel und Gehäuse beeinflusst.

1. Motivation

Das Thema Elektromobilität und damit die Entwicklung und Nutzung von Elektro- und Hybridfahrzeugen ist auch in Zusammenhang mit der aktuellen Dieselmotivatik ein bedeutendes Thema. Die ersten Serienfahrzeuge sind schon einige Zeit am Markt verfügbar, die Entwicklung von Nachfolgefahrzeugen ist in vollem Gange.

Aus Sicht der Fahrzeugsicherheit sind wesentliche Themen in der Entwicklung gelöst. Die Risiken sind prinzipiell bekannt. Das erreichte Sicherheitsniveau von Fahrzeugen mit elektrifiziertem Antriebstrang entspricht dem von konventionellen Fahrzeugen. Maßnahmen werden sowohl auf der Fahrzeugseite als auch auf der Batterieseite umgesetzt.

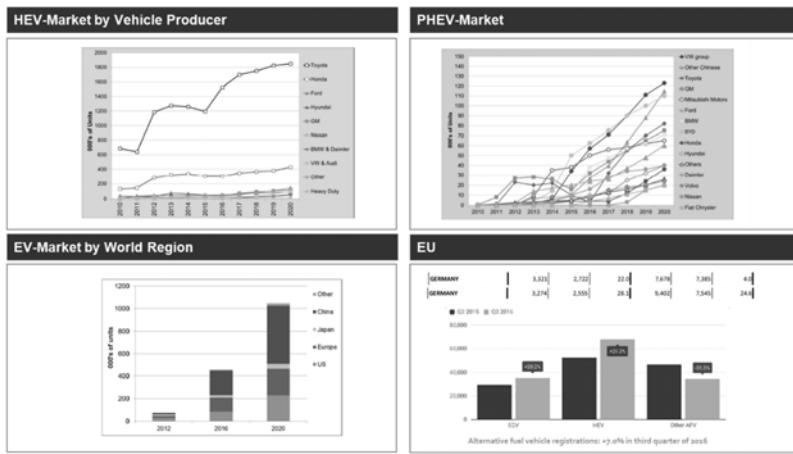
Allerdings gibt es sicherheitsrelevante Themen, die noch intensiver beleuchtet werden sollten. Beispielsweise besteht die Frage des Weiterbetriebes einer Batterie nach einem Fahrzeugunfall. Wie ist die Auswirkung von Alterungsmechanismen auf die Crashsicherheit innerhalb der Zellen? Welche Vorgehensweisen gibt es, wenn z.B. das Batteriepaket des Fahrzeugs getroffen wurde? Da es keine Informationen zur Art und Schwere der Beschädigung gibt, ist es notwendig, dass die gesamte Batterieeinheit ersetzt wird. Dies führt zu Kosten, die möglicherweise vermeidbar sind.

Innerhalb einer Fahrzeugentwicklung ist es nicht möglich, sämtliche, potentiell auftretenden, Szenarien zu überprüfen. Über Versuche kann z.B. nicht sichtbar gemacht werden, welche Vorgänge innerhalb einer Batteriezelle während eines Crashes ablaufen und welche Auswirkungen dieser auf die Zelle hat. An dieser Stelle wird der Einsatz von numerischen Simulationswerkzeugen wichtig und unabdingbar.

Die Verfügbarkeit von nutz- und einsetzbaren Simulationstools für die Berechnung von Batterien und Zellen ist im Moment sehr übersichtlich, wobei eine Konzentration auf thermische und leistungsspezifische Aspekte vorherrscht. Es besteht im Moment wenig Wissen über die praktische Anwendbarkeit und die Potentiale der Simulation. Diesbezüglich soll hier ein wenig Licht in das Dunkel gebracht werden.

2. Elektromobilität

Die momentanen Verkaufszahlen sowie die Prognosen für zukünftige Produktionszahlen von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebsträngen zeigen einen ansteigenden Trend. Damit wird zudem klar, dass die benötigten Stückzahlen von Lithium-Ionen-Batterien für diese Fahrzeuge ebenfalls ansteigen werden.



Quelle: M. Anderman; AABC 2016; ACEA

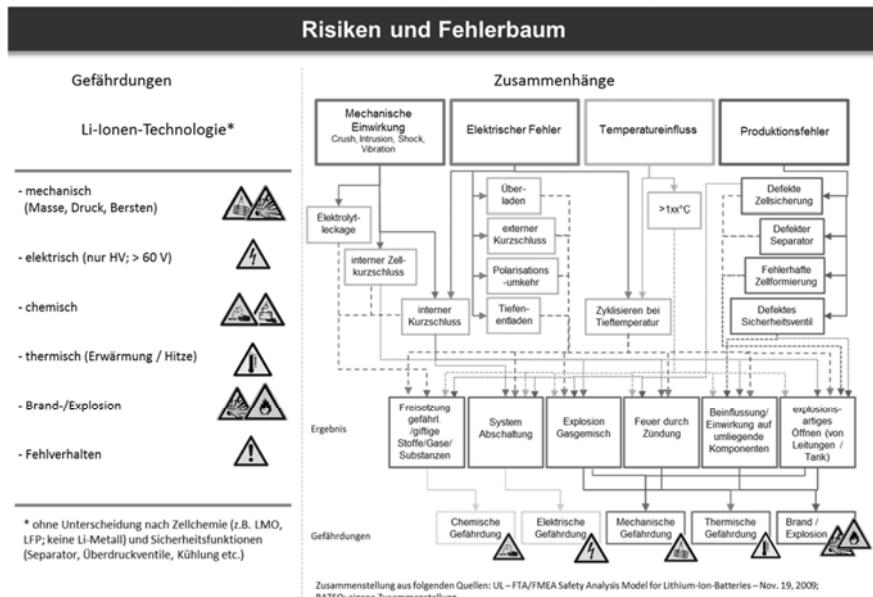
Grafik 1: Prognose der Produktionszahlen elektrisch angetriebener Fahrzeuge [1]

Allerdings ist der absolute Anteil von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebsträngen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen deutschland- sowie weltweit sehr gering.

3. Lithium-Ionen-Batterien – Risiken

Lithium-Ionen-Batterien zeichnen sich durch eine hohe Energiedichte, eine im Vergleich zu anderen Batterietechnologien hohe Leistungsfähigkeit und insbesondere dem nicht-vorhandenen Memory-Effekt aus.

Allerdings existieren auch Risiken. Dazu zählen chemische, mechanische, elektrische und thermische Risiken. Diese Risiken können separat oder in Kombination miteinander auftreten. Tritt infolge eines Fehlers ein schädliches Ereignis ein, so kann es zu Rauch, Feuer, Verbrennungen oder elektrischem Schlag kommen.



Grafik 2: Übersicht Fehlerbaum

Eine der bekanntesten Effekte ist der „Thermal Runaway“, bei in einer Zelle eine sehr starke Hitzeentwicklung auftritt, welche sich dann auf andere Zellen übertragen kann und in diesen dann Folgereaktionen verursacht. Ein ausgelöster „Thermal Runaway“ ist schwer zu stoppen.

4. Sicherheit von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebsträngen

Das Sicherheitsniveau von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebsträngen muss identisch mit der Sicherheit von konventionellen Fahrzeugen sein. Bei Neufahrzeugen ist dieser Zustand gegeben.

Ein Vergleich der Unfallzahlen von elektrifizierten und konventionell angetriebenen Fahrzeugen ist aufgrund der aktuell kleinen Fallzahlen statistisch nicht sehr aussagekräftig. Allerdings sind bezogen auf die Zulassungszahlen derzeit keine Unterschiede erkennbar.

Bei der Beschreibung der Sicherheitsmaßnahmen und Technologien für Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien hat sich eine Ebenen-Betrachtung bewährt.

Die Kernaussage besteht darin, dass auf diesen verschiedenen Ebenen verschiedene Maßnahmen umgesetzt werden können, damit insgesamt gesehen ein angestrebtes Sicherheitsniveau erreicht wird. Man könnte z.B. die Batterie in einem Bereich im Fahrzeug verbauen, der eine hohe Sicherheit gegen Intrusion bietet und darüber hinaus sicherstellt, dass kein Kurzschluss in einer Zelle durch eindringende Teile verursacht werden kann. Für diesen Fall könnte man bei der Zellform und -chemie eine etwas risikobehaftetere Variante wählen.



Grafik 3: Betrachtungsebenen

Auf Komponentenebene darf ein Hazardlevel von 4 nicht überschritten werden, was bedeutet, dass in Komponentenversuchen kein Feuer, Flammen, Bersten oder explosionsartiges Bauteilöffnen auftreten darf.

5. Wiederinbetriebnahme nach Crash

Ein bisher weniger beachteter Fall ist die Wiederinbetriebnahme von Batterien nach einem Unfall. Die Frage besteht darin, ob eine Batterie, die deformiert oder der Wirkung von nicht zu vernachlässigenden Beschleunigungen durch einen Unfall ausgesetzt wurde, weiter genutzt werden darf, repariert werden kann oder getauscht werden muss. Zudem besteht dann die Frage, welche Grenzwerte für Beschleunigung und Deformationsgrad genutzt werden sollen.

Ein weiteres Problem besteht in diesem Zusammenhang darin, dass der Besitzer der Batterie meistens der Fahrzeugeigentümer ist und dieser damit entscheiden kann, wie weiter mit der Batterie zu verfahren ist. Um diesbezüglich eine Empfehlung seitens der Hersteller abgeben zu können, sollte im ersten Schritt eine Risikobetrachtung durchgeführt werden. Das Risiko

Im Gegensatz dazu könnte auch eine sehr sichere Zellchemie ausgewählt werden. Dann wäre es unter Umständen möglich, die Batterie in einem weniger crashgeschützten Bereich im Fahrzeug anzudrucken. Auf Fahrzeugebene sind alle relevanten Crashversuche durchzuführen.

der Nutzung einer Batterie nach Wiederinbetriebnahme darf nicht größer sein als das Risiko einer neuen Batterie. Wird davon ausgegangen, dass ein Risiko sich zusammensetzt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit, dem Schadenausmaß und der Beherrschbarkeit (nach ISO 26262), so ist besonderes Augenmerk auf die Eintrittswahrscheinlichkeit zu richten.

Die Beherrschbarkeit und das Schadensausmaß sollten ähnlich sein. Zudem sind Einflüsse wie Alterung, Beschädigungen und Wahrscheinlichkeiten für einen Folgecrash zu beachten. Im Ergebnis sind sowohl die Grenzwerte für Intrusion und Beschleunigung zu definieren. Weiterhin wird eine Vorgehensweise für eine Bewertung benötigt und es sind Prozesse für die Entwicklung zu definieren und umzusetzen. Es ist z.B. zu empfehlen, dass in den Entwicklungsphasen gecrashte Batterien auf „Wiederinbetriebnahmefähigkeit“ - z.B. durch eine Daueraufprüfung - getestet werden. Final ist noch die Schulung von Mitarbeitern zu dieser Thematik sicherzustellen.

Einige exemplarische Beispiele dafür sind im folgenden Bild aufgeführt.



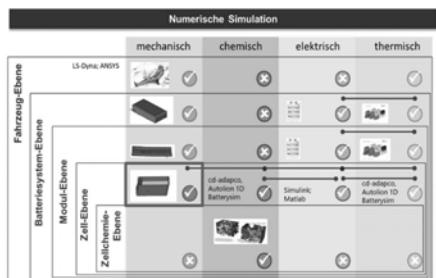
Grafik 4: Beispiele Unfälle mit Relevanz für eine Wiederinbetriebnahme

Bei einigen dieser verunfallten Fahrzeuge sollten die Batterien durchaus weiterverwendet werden können.

6. Simulation

6.1. Allgemeines

Am Markt sind aktuell einige Anbieter präsent, die sich allerdings auf verschiedene Bereiche fokussieren. Grob lassen sich die Bereiche in thermische, elektrochemische und mechanische Problemstellungen und -lösungen unterscheiden. Teilweise sind Programme auch in der Lage,



Grafik 5: Übersicht Simulationsanwendungen

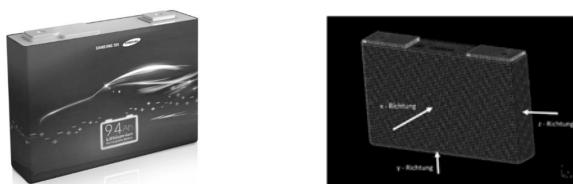
gekoppelte Berechnungen durchzuführen. Das betrifft z.B. chemische und elektrische Simulationsrechnungen.

Mit dem ausgewählten Finite-Elemente-Solver LS-DYNA können Simulationen bezüglich des Verhaltens einer Zelle bei Intrusion und Beschleunigungseinwirkung durchgeführt werden. Außerdem bietet der Solver die Möglichkeit, die Modelle in einem weiteren Schritt auch auf thermische und elektrische Antworten aufgrund einer mechanischen Belastung zu erweitern.

Von einem Aufbau einer eigenen Rechnerinfrastruktur wurde aufgrund des Aufwandes abgesehen. Die Berechnungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Simulationsdienstleister IAT mbH durchgeführt. Die Vorteile liegen in der vorhandenen Soft- und Hardware-Infrastruktur in Kombination mit der langjährigen Erfahrung der Mitarbeiter auf dem Gebiet der Crash-Simulation.

6.2. Modellerstellung

Für die Untersuchungen wurde ein Modell einer prismatischen Lithium-Ionen Zelle erstellt. Die Maße und Seitenverhältnisse wurden anhand öffentlichen zugänglicher Quellen abgeschätzt. Der Modellaufbau hat sich an einer Zelle orientiert, wie sie in der folgenden Abbildung beispielhaft dargestellt ist; daneben befindet sich zum Vergleich das fertige Simulationsmodell.



Grafik 6: Samsung SDI prismatische Zelle [2]

Der Außenhülle, den Anschlüssen und dem Deckel wurde in der Simulation Aluminium als ideal-elastisches Materialmodell zugewiesen. Für die Schweißverbindungen (MIG-Schweißverfahren) wurden Beam-Elemente mit der Materialkarte „Spotweld“ verwendet. Für die Modellierung der Elektroden dienten andere Simulationen als Vorlage [3], [4].

Für die Anode, die Kathode und den Separator wurden Materialeigenschaften verwendet, welche u.a. in [5], [6] und [7] veröffentlicht sind.

Da das Zellpaket während der Lade- und Entladevorgänge gewisse Ausdehnungen erfährt, wurde das Verhalten einer Batterie sowohl im entladenen als auch geladenen Zustand berechnet. Letzterer wurde umgesetzt, indem die Kontaktdicke der Batteriezelle soweit vergrößert wurde, dass sie an möglichst allen Seiten der Außenhülle anliegt. Anders als beim entladenen Zustand wurden in diesem Fall die Anschlüsse des Zellpaketes zum Deckel aufgrund der zu erwartenden sehr geringen Relativbewegungen weggelassen.

Für beide Szenarien wurden diverse Lastfälle simuliert. Um die Komplexität gering zu halten, wurden nur Verbindungen zwischen den Elektrodenanschlüssen und dem Deckel modelliert. Ein Modell besteht aus etwa 45000 Knoten und 38000 Elementen bei einer Elementgröße von zirka 2 Millimetern. Die Berechnungen erfolgten auf 8 Prozessorkernen und dauerten etwa 45 Minuten pro Lastfall. Beispielhaft beträgt die Größe einer Ergebnisdatei ca. 500 – 600 Megabyte. Die Berechnung umfasst bei allen Lastfällen eine Zeitdauer für den Crash von 100ms. Das Modell wurde nicht anhand von Hardwarebauteilen validiert.

6.3. Lastfälle

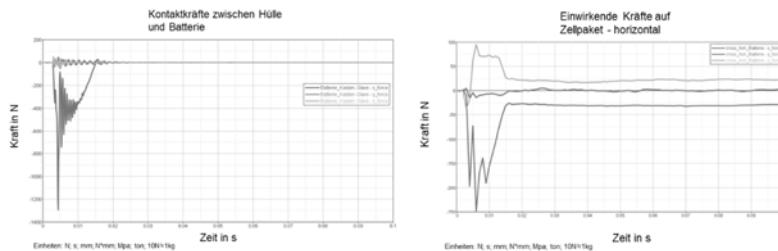
Für die Berechnungen wurden vier verschiedene Szenarien gewählt, von denen drei reale Crashversuche (Front-, Seiten- und Heckcrash) abbilden. Der vierte Lastfall ist ein 150g-Sinuspuls. Die Pulse wurden synthetisch erstellt und auf Basis von Erfahrungswerten so definiert, dass sie der Charakteristik eines durchschnittlichen Mittelklassefahrzeugs entsprechen.

Der Frontcrash ist der einzige Lastfall, in dem das Objekt eine Anfangsgeschwindigkeit (56 km/h) besitzt. Bei allen weiteren Simulationen war die Batterie in Ruhe. Die Belastungen wurden separat in jeder Raumrichtung auf das Batteriemodell aufgebracht, so dass sich insgesamt 24 Simulationsläufe ergaben. (4 Crasharten, 3 Raumrichtungen, 2 Ladezustände)

6.4. Ergebnisse

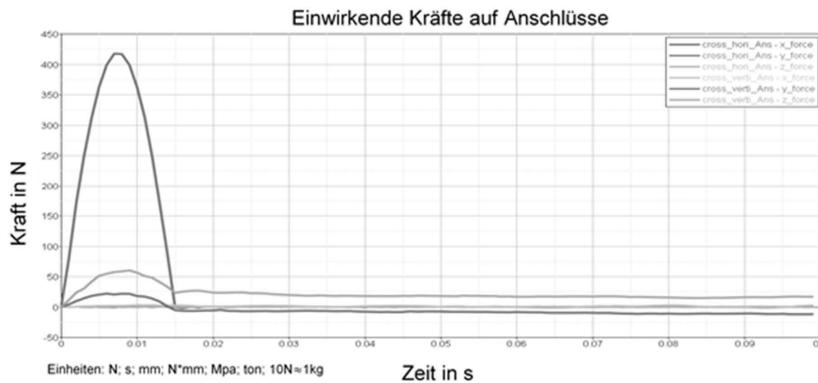
Im Zuge der Berechnungen wurden Kräfte und Beschleunigungen in der Zelle für die verschiedenen Richtungen betrachtet. Dazu mussten horizontale und vertikale Schnittebenen für das Zellpaket und die Anschlüsse erstellt werden, an denen diese Werte ermittelt wurden. Des Weiteren wurden Kontaktkräfte ausgegeben, die zwischen dem Zellpaket und der Hülle entstehen. Alle ausgegebenen Kräfte sind über die jeweiligen Flächen gemittelte Werte. Aufgrund der geringen Werte der Momente, wurden diese nicht weiter betrachtet.

Der 150g-Sinuslastfall stellt den interessantesten dar, bei dem die höchsten Kräfte auftreten. Die Kontaktkräfte, die zwischen der Aluminiumhülle und dem Zellpaket auftreten, sind teilweise größer als 700 N.



Grafik 7: Sinuspuls Wirkrichtung y Zellmodell „geladen“

Die reine Krafteinwirkung im Sinuslastfall beträgt teilweise über 200 N. Die Belastungen auf die Anschlüsse liegen z.T. bei über 400 N.



Grafik 8: Sinuspuls z geladen, Anschlüsse

Ein weiterer interessanter Lastfall betrifft die geladene Batterie mit Belastungen in y-Richtung. Auf das Zellpaket wirken teilweise über 400 N. Die auftretenden Kontaktkräfte zwischen der Hülle und dem Zellpaket liegen stellenweise über 100 N.

Erfährt die entladene Batterie eine Belastung aus der x-Richtung, sind Bewegungen des Zellpaketes erkennbar. Für den Sinuslastfall kann davon ausgegangen werden, dass zudem hohe Belastungen an den Berührungs punkten des Zellpaketes mit der Hülle auftreten. Die Anschlüsse lassen nur Bewegungen in die x-Richtung zu.

6.5. Schwächen des Modells

Allerdings sind auch einige Schwächen des Modells erkennbar. Die Komplexität ist vergleichsweise gering. Die modellierten Anschlüsse lassen nur Bewegungen in x-Richtungen zu. In y- und z-Richtung sind die Anschlüsse starr, weshalb keine Bewegungen des Zellpaketes in diese Richtungen erfolgen können. Das Zellpaket wurde als Kasten angenommen. Die Kombination von mehrschichtigen Folienpaketen wurde aufgrund der hohen Komplexität nicht dargestellt, wodurch eine exakte Lokalisierung der Belastungen innerhalb des Zellpaketes nicht möglich ist.

Der betrachtete Bereich des Zellpaketes, auf den Kräfte einwirken können, erwies sich als zu klein. Die auftretenden Belastungen sind nicht vollumfänglich darstellbar.

7. Ausblick

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass es offene Fragen und Problemstellungen zu Lithium-Ionen-Batterien gibt, welche mittels der numerischen Simulationen teilweise bearbeitet werden können und zukünftig einen deutlich höheren Stellenwert erhalten werden.

Zum Beispiel für den Fall von Verunreinigungen oder Vorschädigungen können Effekte und Wirkungen innerhalb einer Zelle sehr gut dargestellt werden. Auch das Verhalten an Ecken und Kanten sowie in den Faltradien des Anoden-/Kathoden-Pakets könnten durchaus wertvolle Erkenntnisse liefern. Durch eine maßvolle Komplexitätserhöhung des Modells könnten realitätsnähere Ergebnisse erzielt werden.

Eine Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf weitere Zellarten, wie der Pouch- oder der Rundzelle, erscheint mit überschaubarem Aufwand möglich und ist geplant.

Die Einschätzung, ob eine Batterie nach einer Belastung weiter betrieben und damit wieder verwendet werden kann, ist nur auf Basis der Simulation nicht möglich, kann aber dadurch sehr gut unterstützt werden. Für die Entscheidung einer Weiternutzung müssen die Belastungsgrenzen der Batterien bekannt sein und in den entsprechenden Lastenheften verankert werden. Grundsätzlich sollte ein Weiterbetrieb aber möglich sein, gerade bezogen auf Unfälle mit geringen Beschleunigungen und ohne Intrusionen.

Die im Simulationsmodell berechneten Kräfte und Belastungen können durchaus groß genug sein, um einen Weiterbetrieb einer Zelle mit „Nicht sicher“ bewerten zu müssen. Insbesondere für den Fall, dass kleinste Partikel, Dendriten oder Vorschädigungen z.B. aufgrund von Alterung vorliegen, ist es denkbar, dass schon durch Kräfte im Bereich von unter 1 kN aufgrund der sehr kleinen Wirkflächen in den Zellen zu Schäden und im worst case zu einem internen Kurzschluss führen können. Bei einer solchen Bewertung sind jedoch weitere Randbedingungen zu beachten, wie z.B. weitere umgesetzte Sicherheitsmaßnahmen, Dicken von Separator, Anode und Kathode, genutzte Zellchemie sowie Einsatzort und Nutzungsart.

8. Quellen

- [1] M. Andermann, AABC 2016, ACEA
- [2] http://www.tesvolt.com/images/press/Prismatische_Batteriezelle_Samsung_SDI
- [3] „Journal of The Electrochemical Society, 163 (10) A2494-A2496 (2016) Communication—Indentation of Li-Ion Pouch Cell: Effect of Material Homogenization on Prediction of Internal Short Circuit; A. Kumar, *,z S. Kalnauš, S. Simunovic, S. Gorti, S. Allu, and J. A. Turner“
- [4] „Software CAEBAT OAS/VIBE; 3/2/2015 PRODUCTION RELEASE v1.1; Document detailing the updated release to users (3/2/2015) of CAEBAT OAS and VIBE. Contains software description, installation and run instructions and examples“; S. Kalnauš, S. Pannala, S. Allu, W. El Wasif, S. Simonovic, J. J. Billings, A. Bennett, A. Kumar, J. Turner
- [5] „Journal of The Electrochemical Society, 163 (10) A2494-A2496 (2016) Communication—Indentation of Li-Ion Pouch Cell: Effect of Material Homogenization on Prediction of Internal Short Circuit“
- [6] <http://www.goodfellow.com/G/Lithium.html>
- [7] <http://www.vergleichsspannung.de/glossar/e-modul/>

Sicherheitskonzept für Leichtkraftfahrzeuge mit Karosseriestrukturen aus Sandwichmaterial

J. Holtz M.Sc, TU Berlin, Berlin;

Lothar Zink, Dipl.-Ing., ZF Friedrichshafen AG, Alfdorf

Mikkel Steen Pedersen, ECOmove GmbH and Shanghai Jiangte

Intelligent Automotive Technology Co.Ltd.

Kurzfassung

Der Trend zu elektrifizierten Leichtkraftfahrzeugen erfordert neue Fahrzeugkonzepte in Struktur und Materialauswahl. Im Rahmen des EU-Projektes BEHICLE wurde ein solches Fahrzeug entwickelt. Die strukturelle Basis des Fahrzeuges sind Sandwichpaneelle. Es wurden insgesamt 5 Prototypen für Crashversuche nach Euro NCAP aufgebaut. Zwei dienten der Validation des FE-Modells für das Gesamtkonzept zu Beginn des Projektes (ODB und MDB). Die anderen dienten der finalen Euro NCAP Bewertung des entwickelten Prototyps (ODB, MDB und Pfahl).

In diesem Paper werden die strukturellen Maßnahmen hervorgehoben, die durch den Einsatz von Sandwichpaneelen in den Karosseriestrukturen entwickelt wurden um den Insassen des Leichtkraftfahrzeuges einen vergleichbaren Schutz zu bieten, wie ein konventionelles M1-Fahrzeug. Durch die Sandwichbauweise mit zusätzlicher Verstärkung durch Aluminiumbleche und -profile an hochbelasteten Bauteilen (A- und B-Säulen, Fahrwerksaufnahmen, Dachrahmen und Tür) wurde eine steife Fahrgastzelle realisiert. Das Deformationsverhalten wurde beispielsweise für den Pfahlaufprall genutzt um durch Deformationszonen der Sandwichpaneelle in den Schwelleren Energie umzusetzen, so dass die seitliche Türintrusion geringer ist, als bei dem seitlichen Barrierenaufprall (MDB). Das umfangreiche Rückhaltesystem adressiert mehrere konzeptbedingte Herausforderungen. Einerseits den großen Abstand zwischen Fahrer und der Tür im Seitencrash und andererseits die großen Fahrzeugverzögerungen des Leichtkraftfahrzeugs, da das Fahrzeug durch die geringe Masse von 650 kg, kurze Energieabsorptionselemente und steife Fahrgastzelle höhere Fahrzeugverzögerungen im Vergleich zu konventionellen Kleinwagen erfährt. In den abschließenden Crashtests konnten durch die umgesetzten Maßnahmen eine Bewertung auf Grundlage der Dummymesswerte auf 5 Sternenniveau erzielt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass Fahrzeugstrukturen aus Sandwichpaneelen eine Lösung für Leichtkraftfahrzeuge sein können um einerseits Leichtbauziele zu erreichen und andererseits ein hohes Crashsicherheitsniveau zu bieten.

1. Einleitung

Leichtbau und Elektromobilität sind zwei Schlagworte, die nicht voneinander zu trennen sind. So steigt die Materialvielfalt in der aktuellen Fahrzeugpopulation weiter an. Ein interessanter Leichtbauansatz sind Sandwichpaneelle, die je nach Materialzusammensetzung zu hohen Steifigkeiten bei niedrigem Gewicht führen können. Bisher kamen solche Materialien vor allem in Nutzfahrzeugen und Wohnmobilen zum Einsatz. Im Rahmen des EU-Projektes BEHICLE¹ wurde die Einsatzmöglichkeit von Sandwichpaneelen für Leichtkraftfahrzeuge analysiert.

Das Ziel war es ein Fahrzeug zu entwickeln, welches einerseits dynamische Vorgaben erfüllen kann (z.B. Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h), Verbrauchsvorgaben einhält (z.B. eine Reichweite von 150 km) und eine Euro NCAP Bewertung von 4-5 Sternen gemäß dem Stand von 2013 erzielt. Ein Zielgewicht von 550 kg inklusive Batterien und einem Insassen wurde angestrebt. Die Projektlaufzeit von 42 Monaten startete im November 2013.

2. Methoden

Es wurden insgesamt fünf Fahrzeuge aufgebaut mit denen Euro NCAP Crashversuche durchgeführt wurden. Zu Beginn des Projektes wurden zwei Ausgangsfahrzeuge aufgebaut um die grundlegende strukturelle Bauweise des Fahrzeugs zu prüfen. Damit wurden ein 64 km/h ODB-Frontalcrashtest sowie ein 50 km/h MDB-Seitencrashtest durchgeführt, mit denen das FE-Modell des Fahrzeugs validiert wurde als Ausgangsbasis für den späteren Optimierungsprozess. Im folgenden Projektverlauf wurde das Fahrzeug weiter optimiert. Strukturell wurden vor allem folgende Punkte in den Vordergrund gestellt: Strukturelle Integrität, geringe Fahrzeugverzögerung, Schutz der Batterie und kontrollierte Deformation der Bauteile. Es wurde ein Rückhaltesystem entwickelt, welches die Anforderungen der mittig angeordneten Fahrerposition adressiert. Abgeschlossen wurde das BEHICLE Projekt mit drei Euro NCAP Crashtests (ODB, MDB und Pfahl) in denen die finalen Prototypen untersucht wurden.

Für das Projekt wurden die Euro NCAP Protokolle aus dem Jahr 2013, die zu Beginn des Projektes galten, herangezogen. Nichtsdestoweniger, wurden zusätzlich zu den Crashtests weitere Lastfälle virtuell abgesichert, unter anderem FWDB, starre Wand und AE-MDB. Des Weiteren wurde auch eine Kompatibilitätsanalyse durchgeführt.

¹ BEHICLE – Best in class vehicle

3. BEHICLE – Fahrzeug

Im Rahmen des EU-Projektes BEHICLE wurde das hier vorgestellte gleichnamige Fahrzeug entwickelt. Das batterieelektrisch angetriebene Fahrzeug, bei dem die Batterien in einem Zwischenboden unter dem Fahrgastraum platziert sind, hatte sowohl dynamische (Beschleunigung von 0 auf 100 km/h in unter 10 s, v_{max} von 120 km/h), ökologische (Verbrauch von 80 Wh/km in realer urbaner Umgebung, 150 km Reichweite), als auch sicherheitsrelevante Zielvorgaben (4 bis 5 Sternebewertung nach Euro NCAP). Herausfordernd war vor allem alle Vorgaben mit der Zielmasse von 550 kg inklusive Fahrer und Batterien zu vereinen. Die Zielmasse wurde nicht erreicht und mit 670 kg um 120 kg verfehlt. Hervorzuheben bei diesem Fahrzeugkonzept ist auch die Sitzkonfiguration mit drei Sitzplätzen, bei der die Fahrerposition mittig im Fahrzeug angeordnet ist und die Mitfahrer seitlich nach hinten versetzt sind und ihre Beinen neben dem Fahrersitz positionieren. Vor allem durch den großen Abstand zwischen Fahrer und Tür können die Erkenntnisse und die dafür entwickelten Lösungsansätze in der Rückhaltesystementwicklung auf das Far-Side-Impact Szenario angewandt werden.



Bild 1: Prototyp des BEHICLE-Fahrzeugs, Links: Prototyp für den MDB-Aufprall, rechts: CAD-Modell

Als Novum wird in dieser Veröffentlichung vor allem die Konstruktion der tragenden Fahrzeugstruktur aus Sandwichpaneelen untersucht. Die Paneele haben eine Wandstärke von 30 mm. Der Kern besteht aus einem 28 mm PET-Hartschaum mit 60 kg/m³. Die jeweils 1 mm dicken Deckschichten bestehen aus vier Lagen Glasfaser Matten unterschiedlicher Spezifikation, diese wurden mit Vinylester gehärtet. Um das Problem der Delamination zwischen Deckschicht und Kern zu verringern, sind die verwendeten Sandwichpaneelle in Dickenrichtung mit einer zugfesten Aramidfaser vernäht (Bild 2). Insgesamt kommt das benutzt Sandwichmaterial auf eine Dichte von 8,9 kg/m³. [1]

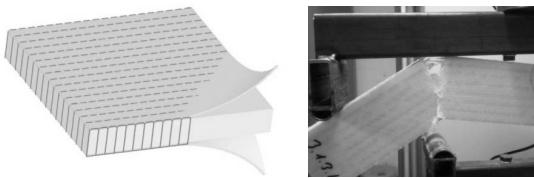


Bild 2: Sandwichpaneel für das Chassis des BEHICLE, Links: Aufbau mit Kern- und Deckschicht in Dickenrichtung vernäht [1], Rechts: Bruchverhalten im 4-Punktbiege-Versuch zur Validierung des FE-Modells

Die zugeschnittenen Sandwichplatten werden zu einem Chassis mittels Steckverbindungen verbunden, alle Kontakte zwischen den einzelnen Sandwichkomponenten werden mit Kleber verstärkt. Zusätzlich werden an hochbelasteten Verbindungen die Paneele mittels sog. Q-Joints miteinander verschraubt (Bild 3, links). Außerdem werden an hochbelasteten Bauteilen wie Radaufhängungen, A- und B-Säulen, Dachrahmen oder Fahrersitz- und Gurtanbindung die Sandwichpaneelle mit Alublechen verstärkt (Bild 3, rechts).

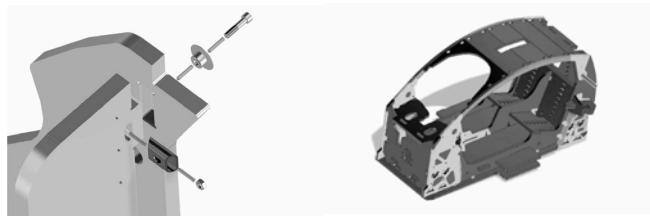


Bild 3: Chassis des BEHICLE (rechts) mit Formschlüssiger Verbindung der einzelnen Paneele mittels sog. Q-Joints (links)

4. Lastfälle und Bewertung

Der Insassenschutz des BEHICLE Prototypen wurde gemäß Euro NCAP Protokoll aus dem Jahr 2013 für M1-Fahrzeuge bewertet und zusätzlich wurden die Protokolle für Leichtkraftfahrzeuge herangezogen [2, 3]. Folgende Vollfahrzeugversuche wurden durchgeführt:

- ODB: Frontalaufprall mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 64 km/h gegen eine deformierbare Barriere (ODB) bei 40 % Überlappung. Das Fahrzeug wurde besetzt mit einem Hybrid III 50-perzentil Dummy auf der Fahrerposition und je einem Q3- und Q1,5-Kinderdummy auf den beiden hinteren Sitzplätzen.
- MDB: Seitenaufprall mit einer mobilen deformierbaren Barriere (MDB), die mit 50 km/h das Fahrzeug trifft. Das Fahrzeug wurde besetzt mit einem ES-2 Dummy auf der

Fahrerposition und je einem Q3- und Q1,5-Kinderdummy auf den beiden hinteren Sitzplätzen.

- Pfahl: Seitlicher Pfahlaufprall bei dem das Fahrzeug den Pfahl mit 29 km/h trifft. Das Fahrzeug wurde besetzt mit einem ES-2 Dummy auf der Fahrerposition.

Zusätzlich wurden folgende Lastfälle mittels FEM-Simulation analysiert:

- AE-MDB: Ähnlich dem MDB-Aufprall allerdings mit schwerer (1500 kg anstatt 950 kg) und steiferer Barriere. Es wurden nur die Belastungswerte des Erwachsenendummym analysiert.
- Pfahl: Anstatt mit 29 km/h trifft das Fahrzeug mit 32 km/h den Pfahl in einem Winkel von 15°.
- Starre Wand: Mit 50 km/h fährt das Fahrzeug frontal gegen eine starre Wand, analysiert wurde ein Hybrid III 5-perzentil Dummy auf der Fahrerposition.
- FWDB: Frontalaufprall mit 50 km/h auf eine deformierbare Barriere mit voller Überdeckung, analysiert wurde ein Hybrid III 50-perzentil Dummy auf der Fahrerposition.
- Kompatibilität: Zur Analyse der Kompatibilität des BEHICLE-Prototyps wurden FE-Simulationen durchgeführt mit verschiedenen Unfallpartnern vom Kleinwagen bis zum Geländewagen. Außerdem wurden die PDB und MPDB-Lastfälle betrachtet. In der Kompatibilitätsanalyse wurden anstatt Dummywerte nur die Fahrzeugverzögerung und strukturelles Verhalten bewertet.

5. Entwicklungsfortschritt

In Bild 4 ist das Design des Ausgangschassis und des finalen Chassis dargestellt. Hauptänderungen waren die Verschiebung der Spritzwand nach vorne, das Dach wurde ebenfalls aus Sandwichpaneelle anstatt aus Aluinumblechen gefertigt, des Weiteren wurde durch Materialeinsparung die Masse verringert. Eine wichtige Änderung die Pfahl- und MDB Aufprall adressieren sollen sind die Änderungen des Schwellers (Bild 4, mitte). Einiges wurden hier zusätzliche Trittstufen integriert, die den Einstieg komfortabler machen, diese sind allerdings so gestaltet, dass diese als Deformationszonen für einen Pfahlaufprall dienen. Andererseits wurde der Schweller verbreitert durch eine rechteckige Anordnung von Sandwichpaneelen, die dadurch den Überlappungsbereich zwischen Tür und Schweller erhöhen und den Abstand zwischen Tür und Schweller verkleinern. Diese Maßnahmen sollen verhindern, dass die MDB Barriere den Schweller überfährt und dadurch die Tür in den Innenraum eindringt.

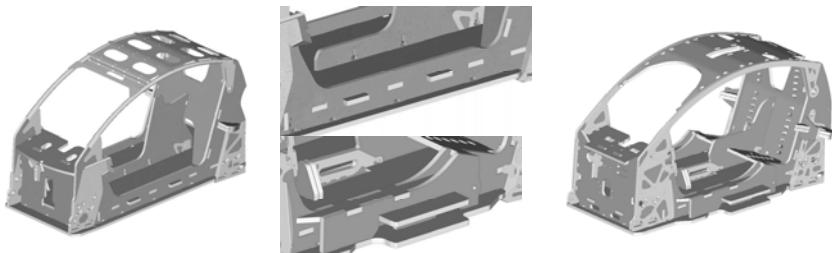


Bild 4: BEHICLE Ausgangschassis (links), finales Chassis (rechts) und Detailsausschnitt der Schweller mit den Trittstufen die außerdem beim Pfahlaufprall als Deformationszone dienen (mitte)

5. Ergebnisse

Die Vollfahrzeugversuche der Prototypen haben gezeigt, dass die Sandwichkonstruktion mit Aluminiumversteifungen den auftretenden Lasten in den analysierten Crashfällen stand hält, mit Einschränkungen im ODB-Crashtest. Durch das Rückhaltesystem mit Airbags, Gurtstraffern und Gurtkraftbegrenzern konnte ein vergleichbares Schutzniveau zu konventionellen M1-Fahrzeugen erzielt werden.

ODB-Crashtest



Bild 5: BEHICLE vor und nach dem Euro NCAP ODB-Crashtest

Im ODB Lastfall nach Euro NCAP konnten insgesamt 8,997 von 16 möglichen Punkten erreicht werden (Bild 6, links), dieses Ergebnis wurde vor allem beeinflusst durch Punktabzug durch sog. Modifier. Ohne Punktabzug konnten nur durch die gemessenen Dummywerte 13,61 Punkte erzielt werden. Der Punktabzug wurde vor allem aufgrund struktureller Probleme gegeben. So öffnete sich eine Tür des Prototyps während des Versuches (-1), die Lenkradverschiebung war zu groß (-0,613), instabile Fahrgastzelle durch Bruch wichtiger struktureller Paneele (-1) und jeweils einen Punkt Abzug für variablen Kniekontakt und konzentrierte Kniebelastung je Knie (-2). Durch kleine Änderungen, die bei einer möglichen Markteinführung umgesetzt würden, wie beispielsweise einer Verkleidung

der Lenksäule, könnte die Bewertung auf 10,997 Punkte ansteigen. Die strukturellen Probleme müssten im Hinblick auf den Zielkonflikt zwischen Zielmasse und struktureller Integrität analysiert und verbessert werden. Die maximale Fahrzeugbeschleunigung lag bei 28 g und Delta-v bei 20,1 m/s (Bild 6, rechts). Strukturell haben bei dem ODB-Lastfall vor allem das Energieabsorptionsmodul bestehend aus Crashboxen und Querträger Energie umgesetzt bis diese komplett zerstört waren. Infolge dessen konnten die strukturellen Sandwichpaneele der Spritzwand, Bodenplatte, Seitenwand und der Batterieanschlagplatte den Crashlasten nicht standhalten und versagten plastisch (Bild 7).

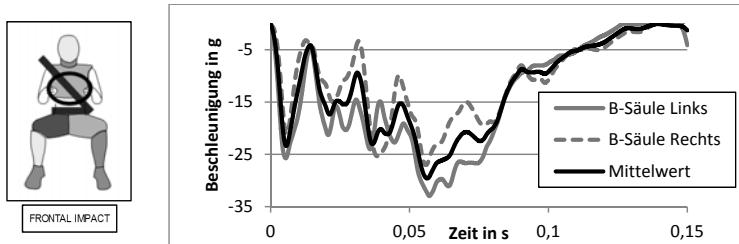


Bild 6: Dummybewertung aus dem ODB Euro NCAP Crashtest (links) und Fahrzeugverzögerung (rechts)



Bild 7: Bruch der Sandwichpaneele am strukturell wichtigen Übergang zwischen Seiten-, Boden- und Spritzwandpaneel an der unteren A-Säule

MDB-Crashtest

Im MDB Lastfall konnte ein sehr gutes Ergebnis erzielt werden (Bild 8). Die strukturelle Integrität der Fahrgastzelle war hier zu keinem Zeitpunkt beeinträchtigt (Bild 9). Durch das Rückhaltesystem, welches die große Lücke zwischen Dummy und Tür überbrückt konnten volle 16 Punkte erreicht werden (Bild 10), allerdings wurden 0,76 Punkte durch den Backplatemodifier abgezogen, da der Fahrersitz einen unsteten Übergang hatte zwischen Rückenlehne aus Sandwichpaneel und der Seitenwange aus EPP-Schaum.



Bild 8: Dummybewertung aus dem MDB Euro NCAP Crashtest

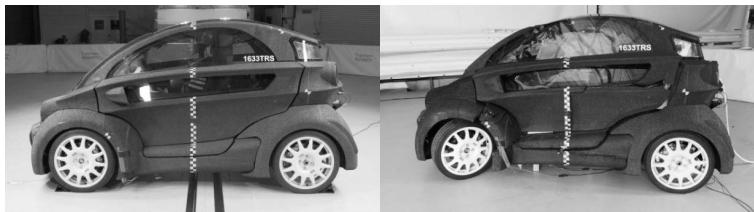


Bild 9: Geringe bleibende Deformation beim MDB Euro NCAP Versuch

Strukturell hat bei dem MDB-Lastfall vor allem die Tür und deren Überlappung mit der Fahrgastzelle Energie umgesetzt bzw. Intrusion vermieden, dadurch konnten auch auf der stoßzugewandten Seite die Tür nach dem Crash ohne höheren Kraftaufwand geöffnet werden (Bild 11). Neben den Deformationen an der stoßzugewandten Tür wurden an anderen tragenden Teilen des Chassis kein Bruch der Sandwichpaneelle festgestellt, da die MDB Barriere den Schweller überfuhr wurde ein Großteil der Last über die Tür in die Fahrgastzelle eingeleitet. Durch den Massenunterschied wurde im Versuch wenig Energie in bleibende Deformation umgewandelt, sondern das Delta-v des BEHICLE-Prototypen war sehr hoch bei 8,6 m/s.



Bild 10: 4-Punktgurt und voluminöse Seiten- und Curtainairbags überbrücken den großen Abstand zwischen Insassen und Tür durch die zentrale Sitzposition (links t=0 ms, rechts t=50 ms)



Bild 11: Durch die geringe bleibende Deformation ist die stoßzugewandte Tür ohne zusätzlichen Kraftaufwand zu öffnen

Pfahlaufprall

Im Pfahlaufprall waren die Ergebnisse vergleichbar mit denen des MDB-Crashtests. Auch hier wurde volle Punktzahl erreicht, allerdings wurden auch hier wieder durch den Backplatemodifier 0,34 Punkte abgezogen (Bild 12). Die seitliche Intrusion im Pfahlaufprall war geringer als im MDB-Lastfall, da der Pfahl sowohl mit Tür als auch mit dem Schweller interagiert hat und somit durch die Trittbretter aus Sandwichpaneelen vor dem Aufprall auf die Tür bereits Geschwindigkeit abgebaut werden konnte (Bild 13). Das Fahrzeug erfuhr ein Delta-v von 10,11 m/s bei einer maximalen Verzögerung von 16,8 g.



Bild 12: Dummybewertung aus dem Euro NCAP Pfahlcrashtest



Bild 13: Energieabsoption über die Sandwichpaneelle der Schwellerkonstruktion



Bild 14: Der Pfahl dringt nicht in die Fahrgastzelle ein und die Batterien bleiben geschützt, jeweils bei $t=0$ ms und $t=67$ ms (max. Pfahlintrusion)

AE-MDB und schräger Pfahlaufprall

Ähnlich zu den Ergebnissen aus den Realversuchen mit MDB und 2013er Pfahlaufprall konnte hier mittels FEM-Simulation nach Euro NCAP Protokoll von 2016 ebenfalls für beide laterale Lastfälle volle Punktzahl berechnet werden (Bild 15). Die Intrusion ist bei dem AE-MDB Lastfall höher als bei dem MDB Aufprall und durch den größeren Massenunterschied steigt die maximale Verzögerung auf 38 g (Bild 18, links). Beim veränderten Pfahlaufprall stieg durch den schrägen Aufprall die Verzögerung in X-Richtung auf 12 g an (Bild 18, rechts). Trotz der höheren Pulse wurden jeweils volle Punktzahl für die Dummybewertung berechnet. Strukturell hielt das Chassis auch den größeren Belastungen Stand, es kam zu keinem Bruch von strukturell wichtigen Sandwichpaneelen.

Lateral AEMDB		Lateral Pole	
Head assessment	4.000	Head assessment	4.000
Chest assessment	4.000	Chest assessment	4.000
Abdomen assessment	4.000	Abdomen assessment	4.000
Pelvis assessment	4.000	Pelvis assessment	4.000
Total Rating = 16.00		Total Rating = 16.00	

Bild 15: Euro NCAP Bewertung der zusätzlich analysierten lateralen NCAP Lastfälle (links AE-MDB, rechts Pfahlaufprall gültig seit 2016) [5]

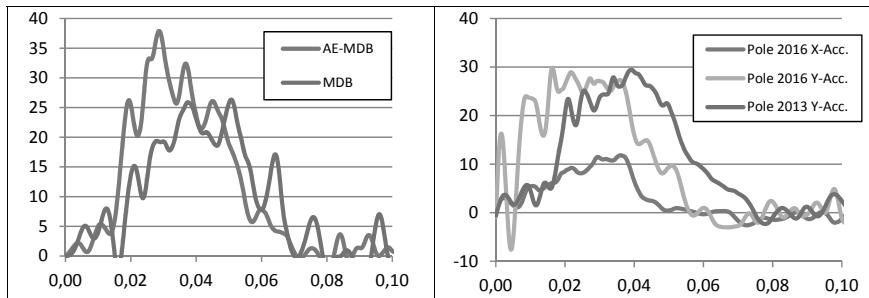


Bild 16: Fahrzeugverzögerung der zusätzlich analysierten lateralen NCAP Lastfälle

Starre Wand und FWDB

In den Simulationen für den starre Wand Aufprall wurden nach Euro NCAP Protokoll 2016 12,26 Punkte und im FWDB Test nach Euro NCAP Protokoll für Leichtkraftfahrzeuge 12 Punkte berechnet (Bild 17). Es sei bei diesen Lastfällen mit voller Überdeckung zu erwähnen, dass die gemessenen maximalen Fahrzeugverzögerungswerte mit 55 g (starre Wand) und 68 g (FWDB) sehr hoch waren (Bild 18). Strukturell konnte das Chassis den Belastungen standhalten. Durch die symmetrische Belastung auf beide Lastpfade konnte eine elastische Deformation der Fahrgastzelle gemessen werden, wodurch allerdings keines der Sandwichpaneele der Fahrgastzelle Schaden nahm.

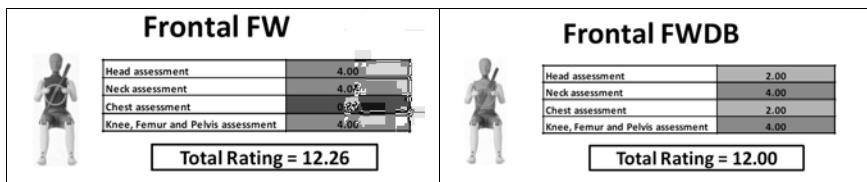


Bild 17: Euro NCAP Bewertung der zusätzlich analysierten frontalen NCAP Lastfälle (links Starre Wand, rechts FWDB) [5]

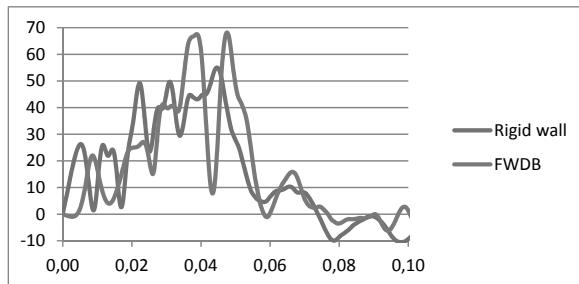


Bild 18: Fahrzeugverzögerung der zusätzlich analysierten frontalen NCAP Lastfälle

Kompatibilitätsanalyse

Die Analyse der Kompatibilität des BEHICLE Prototyps wurde mittels FEM-Simulation durchgeführt. Beeinflussender Faktor war hier die Masseninkompatibilität mit Massenverhältnissen bis zu 1:3. Es konnte gezeigt werden, dass das Fahrzeug nicht kompatibel ist und es zu schwerem strukturellen Versagen kommt. Sowohl Energieabsorptionsmodule und Steifigkeit der Fahrgastzelle waren für diese Belastung nicht ausgelegt. Außerdem ist anzunehmen, dass für die aufgetretenen Belastungen die Validität des FE-Modells nicht ausgelegt ist, daher kann die Belastung in diesem Fall unterschätzt

sein, da die starr definierten Batterien dem FE-Modell des Fahrzeugs bei zu großer Deformation zusätzliche Steifigkeit verleihen (Bild 19). Das Deformationsverhalten der Batterien konnte aufgrund fehlender Validierungsmöglichkeiten nicht modelliert werden.

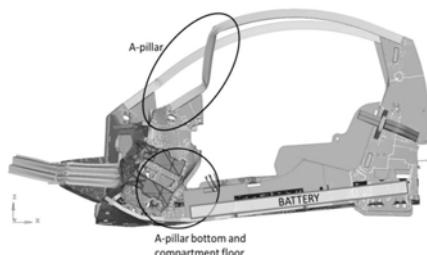


Bild 19: Starke Deformation und Brüche der Sandwichstrukturen im BEHICLE-Chassis bei Frontalaufprall mit einem Kompaktklassenfahrzeug mit 50 km/h und 50 % Offset

6. Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Fahrzeug mit einer Chassiskonstruktion aus Sandwichpaneelen und einem Leergewicht von 550 kg (exkl. Batterie und Fahrer) die geforderten Crashtests besteht und somit ein Sicherheitsvorteil gegenüber potentiellen Mitbewerberfahrzeugen hat. Strukturell hat das Design des Chassis die Erwartungen erfüllt mit Einschräkungen im ODB-Crashtest, das Deformations- und Bruchverhalten der Paneele konnte in den Simulationen gut vorausgesagt werden. Die gewählten Verbindungstechniken konnten den aufgetretenen Kräfte standhalten und nur einer von drei Q-Joints am A-Säulenboden konnte die Last nicht in den Verbund aus Sandwichpaneelen und Aluminiumblechen einleiten im ODB-Test mit 64 km/h und die Verbindung konnte nicht aufrechterhalten werden. Im Seitencrash konnte das Tür- und Schwellerdesign überzeugen durch geringe Intrusionswerte. Die große Lücke zwischen dem zentral angeordneten Fahrerplatz und der Türverkleidung wurde mittels großvolumigen Seiten- und Curtainairbags gefüllt und konnte so zusammen mit dem 4-Punktgurt den Insassen auf einem 5-Sterne Euro NCAP Niveau schützen. Die zusätzlich zu den Crashtests durchgeföhrten Simulationen haben gezeigt, dass auch aktuelle Euro NCAP Protokolle die guten Ergebnisse bestätigen konnten und die Bewertung dadurch kaum beeinflusst wurde. Die Kompatibilitätsanalyse wiederum hat gezeigt, dass die Masseninkompatibilität bei Fahrzeugen dieser Masse stets ein Problem ist und diese durch heutige Crashtests nicht adressiert wird. Ein Notbrems-

assistent kann hier durch Geschwindigkeitsreduktion die Unfallschwere reduzieren und so das strukturelle Versagen bei Massenverhältnissen von bis zu 1:3 verhindern.

Zusammenfassend haben die Ergebnisse des EU-Projektes BEHICLE gezeigt, dass die Konstruktion von Fahrzeugen mit Sandwichpaneelen prinzipiell möglich ist und dass auch dynamische, ökologische und sicherheitsrelevante Zielvorgaben konkurrenzfähig eingehalten werden können. Für einen möglichen Serieneinsatz müssten noch Themen wie Dauerfestigkeit und Modalanalyse hervorgehoben werden, da diese nicht Bestandteil des Projektes waren und aufgrund des spröden Materialverhaltens durchaus höhere Relevanz haben.

7. Danksagung

Die Autoren möchten der Europäischen Kommission ihren Dank für ihre finanzielle Unterstützung aussprechen für das Projekt BEHICLE: Best in class vehicle: Safe urban mobility in a sustainable transport value-chain. (Grant Agreement Nº605292). Im Rahmen dieses Seventh Framework Programme Projektes, THEME [GC.SST.2013-3.] wurden die hier vorgestellten Arbeiten durchgeführt. Die Autoren danken auch allen Mitgliedern des BEHICLE Projektkonsortiums für ihre Hilfe, Zusammenarbeit, offene Diskussion und kontinuierliche Unterstützung.

- [1] ACROSOMA® Panel. Technical Information; Lokeren (B), 2013.
- [2] Euro NCAP Protocol Heavy Quadricycles Frontal Test & Assessment Protocol V1.1, Brüssel (B), 2014
- [3] Euro NCAP Protocol Heavy Quadricycles Side Test & Assessment Protocol V1.2, Brüssel (B), 2014
- [4] Molinero-Fresnillo, R., Passive safety strategy for electric lightweight vehicles with multi-material body and centered driver position – opportunities and limitations, Proceedings ESV Conference Detroit, 2016

Verification of pre-crash information for a predictive activation of passive safety actuators

**Kilian Schneider, Gerald Joy Sequeira, Robert Lugner,
Alexander Kamann, Thomas Brandmeier,
CARISSMA, Technische Hochschule Ingolstadt, Ingolstadt;
Raimund Burgmeier, Continental, Regensburg**

Zusammenfassung

Um die Zahl der Verkehrstoten auf nahezu null zu senken, ist eine Weiterentwicklung gegenwärtiger Sicherheitssysteme unumgänglich. Einen Forschungsansatz stellt ein Auslösen von passiven Sicherheitssystemen zum Unfallzeitpunkt t_0 dar. Dafür muss jedoch bereits in der Pre-Crash-Phase der Auftreffpunkt der Kollisionspartner sowie die Überdeckung mit Hilfe der Umfeldsensorik ermittelt werden. Die während der Pre-Crash-Phase gewonnenen Sensordaten sind allerdings beispielsweise mit Winkelfehlern behaftet, weshalb sie unmittelbar beim Kontakt der Unfallpartner zu verifizieren sind. Ein Verifizierungssensor, beruhend auf der Änderung des elektrischen Widerstands, soll zu diesem Zweck eine redundante Absicherung der prädizierten Crashparameter realisieren. Gegenüber aktuellen Sicherheitssystemen wird dadurch ein Zeitgewinn von mehreren Millisekunden erreicht, was durch unterschiedliche Versuchsaufbauten bestätigt werden konnte.

Abstract

In order to achieve nearly zero fatalities in road transport, an enhancement of present safety systems is essential. One approach is to activate safety systems right at crash time t_0 . For this purpose, the point of contact with the collision partner and the overlap should be determined in the pre-crash phase with the help of forward-looking sensors. With the integration of the active and passive safety systems, it is most important to verify the sensor data obtained during the pre-crash phase in order to avoid the false activation of the safety systems. For this purpose, a contact-based verification sensor, which ensures robustness of the predicted crash parameters was developed. With this system, several milliseconds can be gained as compared to the present safety systems. Experiments performed on different testing setups including real crash scenarios confirmed the working and the feasibility of this sensor concept.

1. Motivation

Mit dem Programm Vision Zero verfolgt die EU den Plan die Zahl der Verkehrstoten bis 2050 auf nahezu null zu senken [1]. Um diesem Ziel einen Schritt näher zu kommen, ist eine Weiterentwicklung gegenwärtiger Sicherheitssysteme vor allem für Frontalunfälle unumgänglich. In Deutschland zählen Kollisionen dieser Art mit 7,13 Prozent aller Unfälle zu den selteneren Unfallszenarien, stellen mit einer Sterberate von 21,27 Prozent allerdings die folgenschwerste Unfallkonstellation dar [2]. Eine Möglichkeit, diese Quote zu verringern, ist der Einsatz von sanfteren und früher aktivierbaren integralen und passiven Sicherheitssystemen [3]. So können bei einer früheren Zündung größere oder mehrere Airbags verbaut werden, welche das Armaturenbrett vollständig abdecken und ein Abrutschen der Insassen vom Airbag unterbinden. Alternativ sind pyrotechnische Gurtstraffer möglich, die eine bestmögliche Anbindung an den Sitz erlauben, um den Crashimpuls auf die Insassen zu verringern [4], [5]. Darüber hinaus lassen sich Läsionen am Kopf- und Nackenbereich, hervorgerufen wegen eines zu aggressiven Aufblasens des Airbags, durch die gewonnene Zeit reduzieren. Die Grundlage für ein vorzeitiges Aktivieren solcher Sicherheitssysteme, bestenfalls vor der eigentlichen Kollision, bilden Umfelderfassungssysteme in Form von Radar-, Kamera- und Lidarsensoren. Aufbauend auf den so gewonnenen Informationen ist es möglich, die Trajektorien aller beteiligten Fahrzeuge zu ermitteln und die Crashparameter zu schätzen [6]. Hierzu zählen vor allem die Position der Kollision am Egofahrzeug sowie die Überdeckung. Infolgedessen können die Auslösenschwellen z.B. der Airbags in der Pre-Crash Phase herabgesetzt und möglichst früh ausgelöst werden. Theoretisch ist so bereits ein Zünden vor t_0 möglich, wird auf Grund von Unsicherheiten wie Winkelfehler in den Sensorsystemen oder Störeffekten durch Wettereinflüsse jedoch noch nicht durchgeführt. Sie müssen für solche sicherheitskritischen Einsätze nochmals verifiziert werden, um Fehlauslösungen durch Geisterobjekte oder Reflexionen zu verhindern [7]. In Kooperation mit Continental entwickelt CARISSMA (Center of Automotive Research on Integrated Safety Systems and Measurement Area) daher einen kontaktbasierten Verifizierungssensor, der eine redundante Absicherung der prädizierten Crashparameter sowie ein Aktivieren der genannten Sicherheitsaktuatorik nahezu direkt zum Kontaktzeitpunkt t_0 verwirklicht. Beim Kontakt wird der von der Umfeldsensorik angeforderte Zündbefehl durch den Sensor verifiziert und im Falle einer Bestätigung die angesprochene Sicherheitsaktuatorik ausgelöst, wodurch ein sicheres und frühzeitiges Aktivieren sichergestellt ist. In Summe soll auf diese Weise ein Zeitgewinn von mehreren Millisekunden erreicht werden. Als Motivation dahinter steht die Verringerung des Verletzungsrisikos für die Insassen sowie die Option, die aktive und passive Sicherheit weiter zu einem integralen Sicherheitssystem zu verknüpfen.

2. Aufbau des Verifizierungssensors

In Abbildung 1 ist der grundlegende Aufbau des Verifizierungssensors dargestellt. Da das Sensorkonzept auf den Eigenschaften des elektrischen Widerstands beruht, besteht er aus zwei Materialien mit unterschiedlicher Leitfähigkeit, die in einem Silikonschlauch eingebracht wurden. Hierbei repräsentiert das Schirmgeflecht das hoch leitfähige Material, der Widerstandsdrat dementsprechend den Schlechtleiter.

Das engmaschige Schirmgeflecht ist konzentrisch zur Schlauchachse orientiert und liegt mit dem gleichen Durchmesser wie der Schlauch an dessen Innenseite an. Entlang der Mittelachse verläuft sein Gegenstück, der Nickel-Chrom Widerstandsdrat. Um diesen in der Mitte des Schlauchs zu halten und ungewollten Kontakt mit dem Schirmgeflecht zu vermeiden, sind zylindrische Abstandshalter aus Schaum-Materialien ebenfalls Bestandteil des Verifizierungssensors. Zugleich sichert die Bauweise aus leicht nachgiebigem Schaum den schnellen Kontakt zwischen Widerstandsdrat und Schirmgeflecht und bringt den Widerstandsdrat auf Grund seiner Elastizität in der Rebound-Phase der Kollision zurück in die Zentralachse des Schlauchs. Der Zwischenraum zwischen den einzelnen Abstandshaltern beträgt jeweils fünf cm. Darüber hinaus zeigt Bild 1 die Abdeckungen an beiden Enden des Schlauchs, durch deren Mitte der Widerstandsdrat geführt wird. Abschließend ist an einer Seite des Schirmgeflechts ein elektrischer Kontakt angelötet, an welchem später die Messspannung U_{mes} abgegriffen wird.

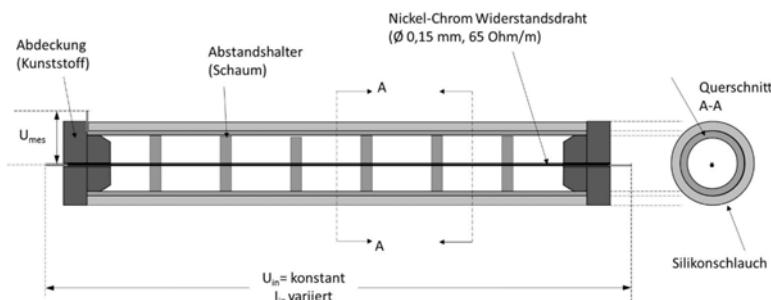


Bild 1: Darstellung des Sensoraufbaus

3. Darstellung des Sensorprinzips

Abbildung 2 zeigt die prinzipiellen Ersatzschaltbilder des Sensorkonzepts, wobei das kariert gemusterte Orthogon das Schirmgeflecht und das mit den vertikalen Linien das Widerstandsdrat symbolisiert. Der Widerstandsdrat ist mit einer konstanten Gleichspannung (U_{in}) versorgt. Vor dem Widerstandsdrat ist ein Shunt-Widerstand in Reihe mit geschaltet, an dem

der Eingangsstrom gemessen wird. Darüber hinaus werden folgende drei Signalwerte kontinuierlich ermittelt:

1. Eingangsspannung U_{in} - Die Differenz des elektrischen Potentials zwischen den Enden des Widerstandsdrahts.
2. Eingangsstrom I_{in} - Der Stromfluss durch den Widerstandsdrat, $I_{in} = U_{Strom} / R_{shunt}$.
3. Messspannung U_{mes} - Die Differenz des elektrischen Potentials zwischen dem Kontaktpunkt und der Erdung.

Während normalen Fahrbedingungen herrscht zwischen dem Schirmgeflecht und dem Widerstandsdrat keine elektrische Verbindung, wodurch die Messspannung (U_{mes}) null Volt beträgt (Abbildung 2a). Die Pfeile veranschaulichen die Stromflussrichtung.

Kommt es nun zu einer Kollision verformt sich der Sensor und das Schirmgeflecht berührt den Widerstandsdrat, wobei zwischen zwei Arten der Kontaktierung, dem Punktkontakt (Abbildung 2b.) und Linienkontakt (Abbildung 2c.) unterschieden wird. Auf diese Weise kann beispielsweise ein Fußgänger (Punktkontakt) von einem Fahrzeug (Linienkontakt) differenziert werden.

Beim Punktkontakt steigt die Messspannung (U_{mes}) von null zu einem Maximalwert. Der Eingangsstrom bleibt unverändert, weil der Gesamtwiderstand vom Widerstandsdrat gleichbleibt und der gesamte Strom durch den Widerstandsdrat fließt (vgl. Abbildung 2b). Der Gesamtwiderstand seinerseits kann weiter in zwei Teile aufgegliedert werden. Diese sind

- R_1 – der Teil des Widerstands von der positiven Seite der Spannungsquelle bis zum Kontaktspunkt
- R_2 – der Teil des Widerstands von der Erdung der Spannungsquelle bis Kontaktspunkt.

Der Wert der Messspannung ergibt sich aus dem zweiten Teil des Gesamtwiderstands R_2 multipliziert mit dem Eingangsstrom I_{in} . Durch Umformung der Gleichung berechnet sich R_2 bei bekannter Messspannung U_{mes} mit

$$R_2 = \frac{U_{mes}}{I_{in}} \quad (I)$$

und daraus die Position des Kontaktspunkts ausgehend von der Erdungsseite des Widerstandsdrähts zu

$$P = \frac{R_2}{\rho/A} = \frac{U_{mes}}{I_{in}} \cdot \frac{1}{\rho/A} \quad (II)$$

wobei die Variablen

- P die Position des Kontaktspunkts [mm]
- ρ/A die Resistivität ρ durch die Querschnittsfläche A [mm^2]

darstellen.

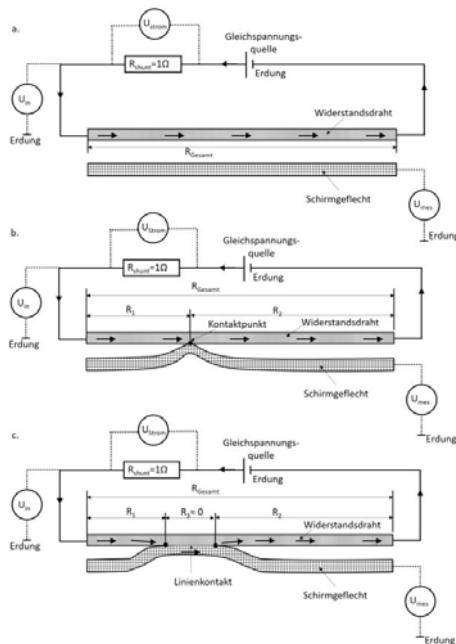


Bild 2: a. Sensor ohne Kontakt, b. Sensor mit Punktkontakt, c. Sensor mit Linienkontakt

Beim Linienkontakt erhöhen sich sowohl die Messspannung U_{mes} als auch der Eingangsstrom I_{in} (Strom in Reihenschaltung an allen Elementen gleich groß). Wie Abbildung 2c veranschaulicht, kann der Gesamtwiderstand hier ebenfalls differenziert werden in

- R_1 – der Teil des Widerstands vom Beginn des Widerstandsdrähts bis zur ersten Kontaktstelle
- R_2 – der Teil des Widerstands vom zweiten Kontakt bis zum Ende des Widerstandsdrähts
- R_3 – der Teil des Widerstands zwischen den beiden Kontaktstellen

Der Teilwiderstand R_3 setzt sich aus dem Widerstandsdräht und dem Schirmgeflecht zusammen. Da die Resistivität des Widerstandsdrähts deutlich größer als die des Schirmgeflechts ist und der Strom infolgedessen in diesem Bereich nahezu komplett durch das Schirmgeflecht fließt, kann der Teilwiderstand R_3 als annähernd null angenommen werden. Das heißt, dass der neue Gesamtwiderstand nicht mehr gleich dem Gesamtwiderstand des Widerstandsdrähts ist, sondern sich um den Betrag von R_3 reduziert.

Der neue Gesamtwiderstand R_g bestimmt sich dementsprechend aus

$$R_g = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{\rho}{A} \cdot (L - \ddot{U}) \quad (III)$$

mit $R_3 = 0$. Zusammen mit der Gleichung

$$R_g = \frac{U_{in}}{I_{in}} \quad (IV)$$

lässt sich daraus die Überdeckung der Unfallpartner ableiten:

$$\ddot{U} = L - \frac{U_{in}}{I_{in}} \cdot \frac{1}{\rho/A} \quad (V)$$

Hierbei entsprechen die Parameter

- \ddot{U} der Überdeckung (Abstand zwischen beiden Kontaktpunkten) in mm
- L der Länge des Widerstandsdrähts in mm.

Die Überdeckung ergibt sich also indirekt aus der Differenz der Gesamtlänge des Widerstandsdrähts sowie der Länge des Stromflusses durch die Abschnitte der Schaltung mit den Widerständen R_1 und R_2 .

Beim Linienkontakt kann die Position des rechten Kontaktpunkts mit derselben Formel wie mit der für den Punktkontakt bestimmt werden. Gibt es jedoch mehrere Kontaktpunkte, muss die Position der Kollision von dem mittigen Kontaktspur ausgehend berechnet werden. Zu diesem Zweck dienen die Formeln

$$P = \frac{R_2}{\rho/A} + \frac{\ddot{U}}{2} = \frac{U_{mes}}{I_{in}} \cdot \frac{1}{\rho/A} + \frac{\ddot{U}}{2} \quad (VI)$$

oder

$$P = \frac{U_{mes}}{I_{in}} \cdot \frac{1}{\rho/A} + \frac{L - \frac{U_{in}}{I_{in}} \cdot \frac{1}{\rho/A}}{2}, \quad (VII)$$

welche durch Aufsummierung der Länge von Widerstand R_2 und der halben Breite der Überdeckung die Position bestimmen.

4. Versuchsaufbauten

Crashversuche sind sehr zeitintensiv, teuer und binden viele Arbeitskräfte. Deswegen wurde der Sensor zuerst an vereinfachten Versuchsanlagen mit dem gleichen Grundprinzip getestet. In Folge waren dies Aufbauten an einem Pendelschlagwerk, in einem Fallturm und zuletzt ein realer Crashversuch zur endgültigen Überprüfung der Realisierbarkeit.

Pendelschlagwerksversuch

In Abbildung 3 ist der Aufbau am Pendel ersichtlich. Der Sensor ist in einer Schaumstoffhalterung (weiß) an der Pendelstruktur verbaut, um bereits hier eine möglichst reale Positionierung im Fahrzeug direkt hinter der Frontschürze anzunähern. Zusätzlich zum Eigengewicht wurden elf Kilogramm Zusatzgewicht an die Pendelstange integriert, wodurch die notwendige Mindestenergie zum Verformen einer Fahrzeugfront beim Einschlag gewährleistet wurde.

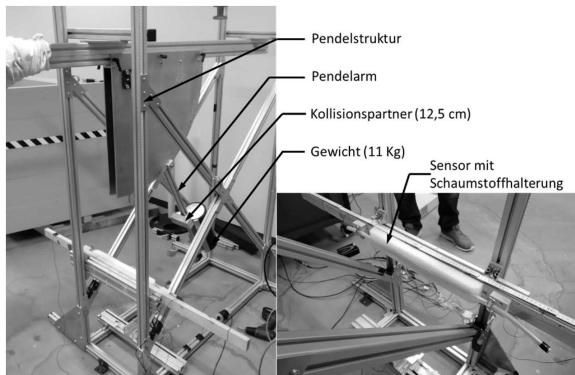


Bild 3: Versuchsaufbau am Pendelschlagwerk

In definierten Winkeln von bis zu 90° wurde der Pendelarm fallengelassen und schlug bei 0° auf den Sensor auf. Anhand einer Lichtschranke wurde die Messung so ausgelöst, dass der Erstkontakt mit dem Kollisionspartner Silikonschlauch zum Zeitpunkt t_0 erfolgte. Ein Datenerfassungssystem (Tasler LTT-24) versorgte sowohl die Lichtschranke als auch den Sensor mit 2V Gleichspannung, welches synchron dazu auch die Messparameter U_{in} , U_{mes} sowie U_{in} aufnahm. Damit die Positionsschätzung verifiziert werden konnte, wurden drei unterschiedliche Einschlagspositionen ausgewählt. Gleiches gilt für die Schätzung der Überdeckung, die durch zwei Holzblöcke mit einer Breite von 124 bzw. 300 mm als Simulation für einen Linienkontakt umgesetzt wurde.

Fallturnversuch

Für die Durchführung der Messungen am Fallturn wurde der vorbereitete Biegequerträger eines Altfahrzeugs wie in Bild 4 veranschaulicht mit Spanneisen auf der Grundplatte befestigt. Auf diesem wiederum lag der Sensor eingebettet in den Schaumstoff. Zum Zweck der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des Pendelschlagwerks wurden dieselben Holzblöcke zur

Positions-/Überdeckungsschätzung herangezogen, dafür änderten sich die Geschwindigkeiten und die Masse (Gewicht am Impaktor 31 kg) des Einschlags. Die Fallhöhe variierte zwischen 1 m bzw. 16 km/h und 5,9 m bzw. 39 km/h.

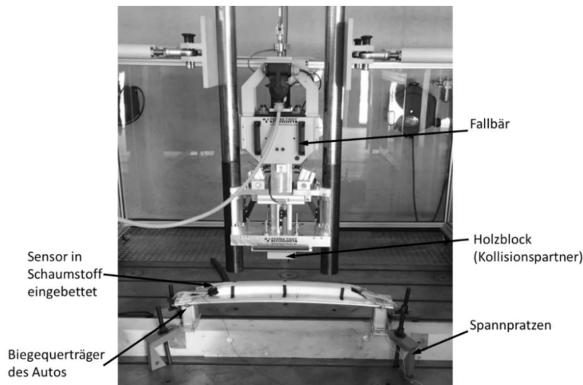


Bild 4: Versuchsaufbau am Fallturm

Crashversuch

Für den Crashtest auf der CARISSMA Indoor Anlage wurde der Prototyp hinter der Frontschürze montiert (siehe Bild 5a). Von dort ausgehend liefen die Verkabelungen zur Messtechnik im Kofferraum, sodass das Risiko einer Beschädigung und ein damit einhergehender Datenverlust minimiert wurde. Zur Datenaufzeichnung kam ebenfalls das LTT-24 System, gekoppelt mit einem ADMA Modul, zum Einsatz. Bild 5b zeigt zudem noch den Crashtest zum Zeitpunkt t0, also beim Anliegen der Fahrzeugfront an der Barriere noch ohne Deformation. Durchgeführt wurde der Crashtest mit 40 km/h sowie einem Frontalaufprall über die volle Breite gegen ein massives, unverformbares Hindernis.



Bild 5: Crashversuch

5. Auswertung der Ergebnisse

Während den Tests wurden die drei ausschlaggebenden Parameter U_{mes} , I_{in} und U_{in} kontinuierlich mit einer Abtastrate von 100 kHz gemessen. Die nachfolgende Bild 6 veranschaulicht anhand einer Beispieldmessung die erhaltenen Ergebnisse. Abbildung 6a verdeutlicht den steilen Anstieg von U_{in} beim ersten Kontakt zwischen dem Widerstandsdraht und dem Schirmgeflecht, der Anstieg von I_{in} über die Zeit repräsentiert den Anstieg der Überdeckung über die Zeit. Unter Verwendung der hergeleiteten Formeln (vgl. Kap. 2) lassen sich die gewonnenen Daten in die Positionsbestimmung sowie die Überdeckung umwandeln (6b). Die Abweichungen der unterschiedlichen Einschlagspositionen bei gleichbleibender Überdeckung von 124 mm am Pendel zeigt 6c. In der Legende stehen die realen Werte, die Resultate der Messung sind den jeweiligen Graphen zugeordnet. Gleiches gilt für 6d, wobei hier der Einschlagsort konstant bleibt und die Überdeckung differiert.

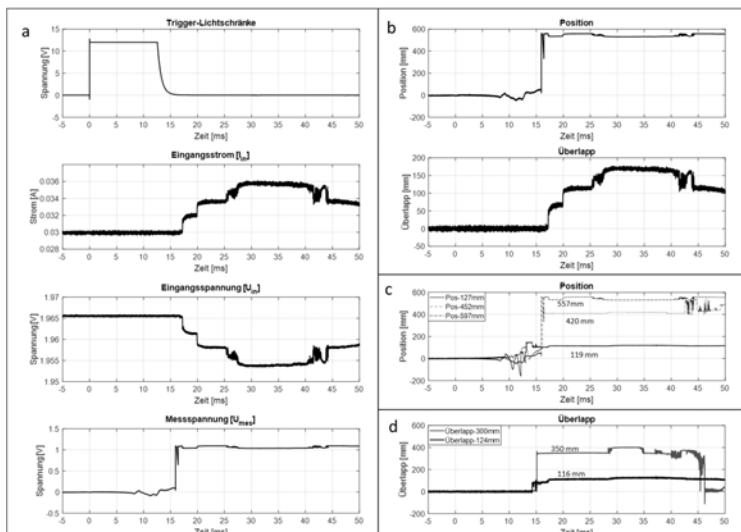


Bild 6: a. Mess-Signal und Trigger-Signal; b. Position- und Überlapp-Bestimmungssignale; c. Ergebnisse von verschiedenen Positionsbestimmungsversuchen; d. Ergebnisse verschiedener Überlappbestimmungsversuche

Im Sinne der Übersichtlichkeit sind alle Ergebnisse der Pendel- und Fallturmversuche in Tabelle 1 zusammengefasst. Wie zu erkennen ist, lieferten die Sensorprototypen durchwegs gute bis sehr gute Messresultate. Während beim Pendelschlagwerk auf Grund der geringen

Einschlaggeschwindigkeit die Detektionszeit rein physikalisch nicht unterhalb der angedachten fünf Millisekunden (gewählte Toleranzzeit für ein Zünden bei t_0) sein konnte, blieben beim Fallturm alle Zeiten für die Positionsbestimmung deutlich innerhalb des Grenzwerts. Gleicher gilt für die Überlappschätzung, die mit drei Millisekunden bei realen Auslösegeschwindigkeiten von über 30 km/h für Airbags ebenfalls das Ziel erfüllte. Beim zweiten wesentlichen Faktor, der Genauigkeit, sind keine Unterschiede zwischen den Versuchsaufbauten festzustellen. Die Positionsbestimmung gelingt unabhängig von Geschwindigkeit oder Referenzwert im Durchschnitt mit einer Übereinstimmung von über 94 Prozent. Auch die Überdeckung pendelt sich im Gesamten bei ca. 83 Prozent Genauigkeit mit den Referenzwerten ein. Die schlechteren Werte sowie die teilweise großen Abweichungen der Messwerte untereinander beruhen einerseits auf der prototypischen, per Hand durchgeföhrten Herstellung des Sensors, andererseits auf Vibrationen des Widerstandsrahts während der dynamischen Einschlagsphase.

Tabelle 1: Ergebnisse der Versuche am Pendelschlagwerk und Fallturm

Pendelschlagwerk								
Positionsbestimmung								
Referenzwert [mm]	Versuchs-Nr.	Geschwindigkeit [km/h]	Wert Sensor [mm]	Genauigkeit [%]	Detektionszeit nach t_0 [ms]			
127	1	7,35	119	93,7	15-17			
	2		134	94,5				
	1		420	92,9				
	2		411	90,9				
452	1	7,35	557	93,3	15-17			
	2		558	93,5				
	1							
	2							
Überlappbestimmung								
124	1	7,35	116	93,5	20-25			
	2		119	96,1				
	3		150	79,8				
	1		350	83,3				
300	2	7,35	353	82,3				
	3		357	81,2				
Fallturm								
Positionsbestimmung								
Referenzwert [mm]	Versuchs-Nr.	Geschwindigkeit [km/h]	Wert Sensor [mm]	Genauigkeit [%]	Detektionszeit nach t_0 [ms]			
500	1	15	510	98,1	2,5			
	2	39	476	95,2	1,9			
	1	5	473	94,6	2,5			
	2	39	479	95,8	1,9			
Überlappbestimmung								
124	1	15	151	78,2	7			
	2	39	129	96,1	3			
	1	15	381	73,8	7			
	2	39	410	63,3	3			

In Abbildung 7 ist das Ergebnis des Crashversuchs mit den vier ausschlaggebenden Zeitpunkten der Messung dargestellt. Zum Zeitpunkt t_0 berührt das Fahrzeug zum ersten Mal den Crashblock, es tritt jedoch noch keine Verformung dabei auf. Nach zwei Millisekunden kommt es zum Kontakt zwischen dem Schirmgeflecht und dem Widerstandsraht. Zu diesem Zeitpunkt steigt die Schätzung der Einschlagsposition auf ungefähr 510 mm an, was der mittleren Einschlagsposition und gleichzeitig der Fahrzeugmitte bezogen auf die Sensorbreite entspricht. Nach 4,3 ms ist die teilweise Überdeckung ermittelt, nach 6,3 ms die vollständige Überlappung. Dies liegt an der gekrümmten Frontstruktur des Fahrzeugs. Wie in Bild 7 klar zu erkennen, ist bei ungefähr vier Millisekunden nur der Bereich zwischen den Scheinwerfern deformiert und bei ungefähr sechs Millisekunden trifft das Fahrzeug mit voller Breite auf den Crashblock. Es ist also auch bei realen Unfallgeschehen möglich, die Überdeckung sowie die Position annähernd genau in der geplanten Detektionszeit zu ermitteln.

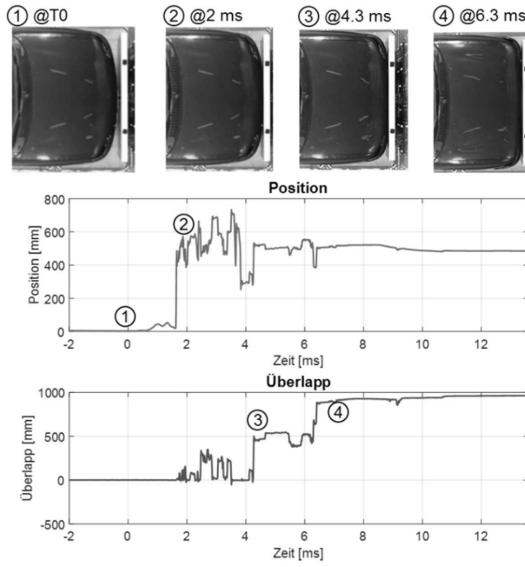


Bild 7: Ergebnisse des Crashversuchs

6. Zusammenfassung

Die durchgeföhrte Untersuchung beschreibt das Potential eines widerstandsbasierten Sensorkonzepts als Verifizierungsmethode für die Daten von vorausschauender Umfeldsensorik. Es konnte bewiesen werden, dass sich die Crashparameter Einschlagsort am Egofahrzeug sowie Überdeckung der Kollisionspartner, welche durch Radar, Lidar oder Kamera prädiziert werden, zu Beginn der Kollision ermitteln lassen. Dies geschieht zudem in einem Zeitraum von weniger als fünf Millisekunden, wodurch mehrere Millisekunden gegenüber heutigen Seriensensoren der passiven Sicherheit eingespart werden können. Auf diese Weise ist ein Auslösen von beispielsweise Airbags zum Zeitpunkt t_0 für das autonome Fahren realisierbar.

Bereits bei einfachen, prototypischen Untersuchungen hat sich eine durchschnittliche Genauigkeit von über 93 Prozent hinsichtlich der Positionsschätzung sowie über 82 Prozent bezogen auf die Überdeckungsschätzung heraustraktilliert. Diese Werte können durch den Einsatz von Maschinen während der Fertigung zur Optimierung der Prototypen durch exaktere Verarbeitung weiter gesteigert werden.

Darüber hinaus ist eine Optimierung des Konzepts in der Ausarbeitung, das Schwingungen und damit wiederholten Kontakt zwischen Widerstandsdräht und Schirmgeflecht unterbindet, um eine Verfälschung der Messergebnisse in folgenden Untersuchungen zu minimieren.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Deutscher Verkehrssicherheitsrat, *Schriftreihe Verkehrssicherheit - Vision Zero*, Bd. 16, Auguststraße 29, 53229 Bonn: Deutscher Verkehrssicherheitsrat, 2012.
- [2] Destatis Verkehr, „Fachserie 8, Reihe 7,“ Statistisches Bundesamt Deutschland, Wiesbaden, 2016.
- [3] M. Dr.-Ing. Kühn und J. Bende, *Accident statistics and the potential of driver assistance systems*, Wilhelmstraße 43/43G, Berlin, Berlin: German Insurance Association Insurers Accident Research, 2014.
- [4] X. Luo, W. Du und J. Zhang, *Safety benefits of belt pretensioning in conjunction with precrash braking in a frontal crash*, Bd. 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Seoul: Institute of Electrical and Electronics Engineers; Intelligent Transportation Systems Society; IEEE Intelligent Vehicles Symposium; IV, 2015.
- [5] X. Luo, W. Du, H. Li, P. Li, C. Ma, S. Xu und J. Zhang, *Occupant Injury Response Prediction Prior to Crash Based on Pre-Crash Systems*, Bd. SAE Technical Paper Series, WCX™ 17: SAE World Congress Experience: SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2017.
- [6] T. J. Dirndorfer, *Integrale Nutzung von Pre-Crash-Sensorik zur Ansteuerung frontaler Rückhaltesysteme im Fahrzeug - Möglichkeiten und Grenzen*, München, Bayern: CUVILLIER VERLAG Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, 2015.
- [7] A. Weitzel, H. Winner, C. Peng, S. Geyer, F. Lotz und M. Sefati, *Absicherungsstrategien für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung*, Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, 2014.

Reliable pre-crash detection and decision making for accident against oncoming traffic

Dr. **Heiko Freienstein**, Fachreferent, Corporate Research,
Vehicle Safety and Automated Driving

Dr. **H. Höpfner, F. Drews, T. Lich, Dr. F. Österle, Dr. W. Klier**,
Robert Bosch GmbH

Abstract

It is well known that the progress in active and passive safety of modern vehicles has succeeded in reducing the number of traffic fatalities and severely injured over the recent years. Still, official crash statistics in industrialized countries show a stagnating trend. Beside the safety against Vulnerable Road Users, it is observed that car occupants are still the majority which suffers from their injuries out from a crash event. According to national statistics from Germany in 2015 more than 215,000 car occupants were injured including 29,004 severe and 1,575 fatal injured. Within a special investigation of Bosch Accident Research it was found out that more than every 2nd severe or fatal car occupant (16,904 occupants) was injured during a crash against another oncoming vehicle or while their car was leaving the carriageway. Furthermore it is seen that 80% of these crashes occur in non-urban areas. For a more detailed analysis the GIDAS database (2001-2015) was used. For selected accidents with frontal impacts it is seen that those accidents happen mainly while overtaking or speeding. Nevertheless the result is a frontal impact with high relative collision speed against another car, truck or motorcycle causing mainly severe and fatal injuries. Several publications on integrated safety point out using the pre-crash phase for occupant protection show a significant improvement e.g. [5]. With this in mind the extraordinary challenge is the reliable detection of a pre-crash situation.

In this paper pre-crash technology to protect in accidents against oncoming traffic based on surround sensing systems is investigated, with the focus on both, achieving a high detection rate of crashes before contact and an extremely low rate of false positive detections. A decision fusion prototype consisting of a simplified and adapted state of the art advanced driver assistance sensing system (ADAS) and a new safety feature is analyzed. The safety feature is designed to be highly specific for a car-to car crash event and to be independent of the ADAS system also. Design and examination of the level of independence are presented in detail.

The system is evaluated by lightweight objects within a velocity range of 50 kph to 80 kph on the proving ground. The required activation time is 100ms before contact. As a result, the new

approach leads to an activation rate of 88%. Furthermore, the robustness against false-positive decisions is analyzed. An improved level of robustness of the new approach can be shown by theoretical considerations. On a theoretical base, the proposed decision fusion concept with an entirely independent algorithm path and a false-positive rate of 10^{-2} per hour (arbitrarily assumed) could reduce the false-positive rate per hour by up to five orders of magnitudes. Evaluations of experiments on extensive endurance run data collected for ADAS development are done as well. The statistical independency of the two paths is tested on decision level and also on feature level. No hints at common failure modes or dependencies were found, however the amount of data is not sufficient for a final quantification of the statistical independence level. The methods presented are a first step towards a reliable sensing and decision-making concept for pre-trigger functions that allows mitigating the crash severity for oncoming traffic accidents. As a next step a field based validation approach is recommended to collect data in order to achieve an evidence for the statistical independence and thus the level of robustness of a pre-trigger sensing function.

1. Problemstellung

Der Fortschritt sowohl bei der aktiven als auch passiven Sicherheit in modernen Fahrzeugen hat bekanntermaßen zu einer starken Verringerung der Anzahl der Toten und Verletzten im Straßenverkehr über die letzten Jahre geführt. Jedoch weisen die amtlichen Statistiken in den Industrieländern eine Stagnation in der Verkehrssicherheit auf [1]. PKW-Insassen stellen neben den ungeschützten Verkehrsteilnehmern (z.B. Fußgänger, Radfahrer) weiterhin die Mehrheit derer dar, die unter den Verletzungen leiden, die auf einen Verkehrsunfall zurückzuführen sind. Allein im Jahr 2015 wurden nach Angaben der amtlichen Verkehrsunfallstatistik mehr als 215.000 PKW-Insassen verletzt, darin inbegriffen sind 29.004 (2016: 29.834) schwer verletzte und 1.575 (2016: 1.531) tödlich verunglückte [2].

Eine vertiefende Studie der Bosch Unfallforschung mit Hilfe der GIDAS Datenbank (German In-depth accident study) im Jahr 2015 hat ergeben, dass mehr als jeder zweite schwere oder tödlich verunglückte Insasse (16.904 Insassen) auf einen Begegnungsunfall mit einem anderen Fahrzeug oder auf das Verlassen der Fahrspur zurückzuführen ist. Weiterhin stellt sich heraus, dass 80% dieser Kollisionen in nicht-urbanen Bereichen stattfinden [3]. Eine nähere Betrachtung dieser Fälle zeigt, dass hauptsächlich Frontalunfälle bei Überholmanövern und Geschwindigkeitsüberschreitungen erfolgen. Generell verursacht der Frontalunfall mit hoher Relativgeschwindigkeit gegen PKW, LKW, Motorrad oder Objekt hauptsächlich die diskutierten schweren und tödlichen Verletzungen.

Aus der Literatur sind verschiedene Untersuchungen bekannt, die die Wirksamkeit der Auslösung der irreversiblen Rückhaltemittel (Gurt und Airbag) vor Kontakt in Hochgeschwindigkeitsunfällen belegen [5-9]. Im Folgenden wird die pre-crash Auslösung irreversibler Rückhaltemittel um die es in dieser Studie geht als Pre-Trigger bezeichnet. Gegenstand dieser Untersuchungen sind der Frontalaufprall gegen die starre Wand mit 50 km/h oder 56 km/h und der Aufprall gegen die deformierbare Barriere mit 56 km/h. In diesen schweren Hochgeschwindigkeitsunfällen, die im Feld z.B. den erwähnten Begegnungsunfällen auf Landstraßen entsprechen, werden Belastungswerte durch eine Auslösung vor Kollision von Gurt und Airbag signifikant reduziert (im Bereich von 20% bis 40%). Die physikalischen Wirkprinzipien beruhen zum einen auf der Nutzung der gewonnenen Zeit und des gewonnenen Raums, die in ein weniger aggressives Verhalten der Rückhaltemittel übersetzt werden. Das weniger aggressive Aufblasverhalten sowie niedrigere Rückhaltekräfte auf einem erweiterten nutzbaren Vorverlagerungsweg führen zu reduzierten Belastungswerten. Zum anderen kann der Insasse in der pre-crash oder frühen in-crash Phase vorbeschleunigt werden, sodass weniger kinetische Energie abgebaut werden muss [7,8, 9].

Da diese Rückhaltestrategien vor mechanischem Kontakt aktiviert werden, hat die Auslösung nicht basierend auf beschleunigungsbasierten Crashsensoren, sondern auf Umfeldsensorik zu erfolgen. Diese Umfeldsensorik ist für automatische Notbremsfunktionen sowie automatische Fahrfunktionen im Fahrzeug vorhanden und wird in Zukunft in immer mehr Fahrzeugklassen Verbreitung finden. Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, wie diese Auslöseentscheidung in relevanten Nutzenfällen robust auf Umfeldsensorik basierend getroffen werden kann und auch der Nachweis einer korrekt getroffenen Entscheidung erbracht werden kann.

2. Theoretische Überlegungen zu Detektion und Anforderungen an eine Pre-Trigger Funktion

Die wichtigen Anforderungen an ein vorauslösendes System, relativer Geschwindigkeitsbereich und Reichweite, lassen sich auf einfache Weise aus dem Arbeitspunkt ableiten. Legt man den Begegnungsunfall mit einer Crashschwere, die etwa den Crashtests mit hoher Geschwindigkeit (50 km/h) gegen die starre Wand entspricht, fest, ergibt sich eine maximale Relativgeschwindigkeit von etwa $v_{\text{rel}} = 100 \text{ km/h}$. Jedes reale System hat Latenzen bis zur Wirksamkeit (Sensierung, Aktivierung). Diese können für pyrotechnische Systeme als sehr kurz - etwa 100 ms - angenommen werden. Möchte man z.B. auf Basis von drei Messwerten auslösen, ergibt sich somit eine Reichweite von etwas über 10 m. Basierend auf diesen einfachen Annahmen können durch eine Prinzip-Simulation fundamentale Eigenschaften eines solchen Systems verdeutlicht werden und weitere Anforderungen für ein robustes System abgeleitet werden (Bild 1). Um den Einsatz von nicht-reversiblen Aktuatoren zu ermöglichen, wird eine Auslegung eines Auslösesystems angestrebt, das bei vermeidbaren Kollisionen möglichst keine Auslösung produzieren soll. Ein konkretes Aktuatorkonzept wird in dieser Studie also nicht zugrunde gelegt, aber die anzusteuernnde Aktuatorik sei für den Frontalaufprall unter dem Aufprallwinkel $+/30^\circ$ angenommen. Dieser ergibt bei Begegnungsunfällen mit hoher Geschwindigkeit beider Beteiligten auch näherungsweise einen Erfassungswinkel der Sensorik in dem Bereich $+/30^\circ$.

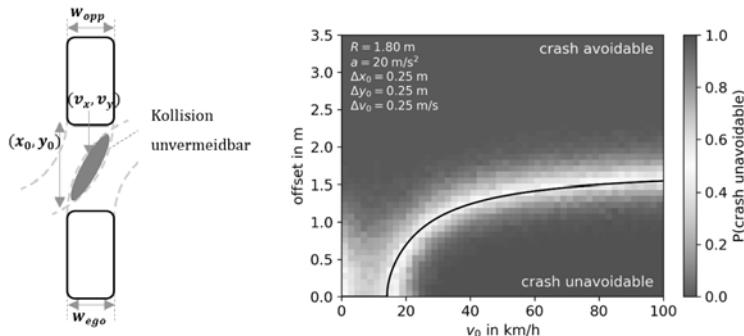


Bild 1: Links: Skizze eines Begegnungsunfalls. Rechts: Verdeutlichung der Eigenschaften realer Auslösesysteme anhand einer vereinfachten Simulation eines generischen Sensors. Für dieses Beispiel wurde ein willkürlicher Fehler in Ort und Geschwindigkeit sowie eine kooperative Ausweichbeschleunigung je Fahrzeug mit 10 m/s^2 simuliert. Untersucht wird die Unvermeidbarkeit der Fahrzeugkollision.

Man erkennt auf Bild 1 die Abhängigkeit der Erkennung von Offset und Annäherungsgeschwindigkeit. Unterhalb einer minimalen Geschwindigkeit von etwa 15 km/h ist eine Kollision bei kooperativem Verhalten vermeidbar. Diese minimale Geschwindigkeit erhöht sich mit dem Offset, da eine kleinere Distanz überwunden werden muss, um eine Kollision zu vermeiden. Theoretisch wird die Crash-vermeidbar Zone von der Crash-unvermeidbar Zone klar getrennt (schwarze Linie). Durch die Einbeziehung von Toleranzen¹, z.B. von Mess- und Prädiktionsunsicherheiten, in die Simulation ergibt sich im Diagramm rechts eine Zone (hell), in der nicht klar ist, ob es zu einer Kollision kommen wird. Je höher die Annäherungsgeschwindigkeit und je kleiner der Offset, desto klarer ist die Situation. Im Beispiel bedeutet dies, dass z.B. im hellen Bereich nicht ausgelöst werden kann, da hier auf Grund der Sensorfehler Vermeidbarkeit nicht ausgeschlossen werden kann. Niedrige Annäherungsgeschwindigkeiten und Unfälle mit sehr kleinen Überlappungen können also prinzipiell mit realen Systemen nur dann erkannt werden, wenn vermehrte Falschauslösungen in Kauf genommen werden können. Die Diskussion dieser Prinzip-Simulation zeigt, wie wichtig das Wissen über die Mess- und Prädiktionsfehler des Sensiersystems sind, da sie sich direkt auf die robust erkennbaren Nutzenfälle auswirken. Abschätzungen der Fehlerverteilung sind eine Herausforderung, da die Objekt-Eigenschaften und Übertragungswege sehr stark variieren.

Eine Anforderung eines robusten Systems mit Fokus auf geringe Falschauslösungen sollte also eine Mindestgeschwindigkeit und einen maximalen Offset mit Abstand zur theoretischen Grenze sein (z.B. höher als 50 km/h und mehr als 40 % Überlapp).

Zusammenfassend ergibt sich folgende Zusammenstellung der Anforderungen an eine Funktion als Arbeitshypothese (Tabelle 1).

Eine Größe, die hier noch nicht behandelt wurde ist die Falsch-Positiv-Rate, also unbeabsichtigte Auslösungen. Diese hängt von der Ausprägung des Aktuators ab, jedoch ist zu erwarten, dass sie für sehr leistungsfähige pyrotechnische Aktuatorik weit herausfordernder als die einer heutigen AEB ist und sich in einem Bereich bewegt, den auch Systeme des automatischen Fahrens erreichen. Eine Validierung durch Absicherungsfahrten, wie für heutige Systeme, ist dann nicht mehr durchführbar [13].

¹ In der Simulation (Bild 1, rechts) wurden keine realen Fehlerverteilungen zugrunde gelegt.

Tabelle 1: Zusammenstellung der abgeleiteten high-level Anforderungen

Nutzenfälle	Frontalunfälle im Begegnungsverkehr mit hoher Geschwindigkeit, Crashschwere ähnlich zu den Crashtest
Verfügbarkeit	Auslösung in sicher detektierbaren Fällen, Basis-Schutz wie bisher basierend auf Crash-Kontaktsensorik
Crashgegner	PKW
Relativgeschwindigkeit	50 km/h ... 100 km/h
Überlapp	$\geq 40\%$
Field of View	Reichweite ~10m, Erfassungswinkel $>+/- 30^\circ$

4. Überlegungen zum Design einer robusten Auslöselogik in Bezug auf die Falsch-Positive-Rate

Aus der Literatur beispielsweise bei Skutek [11] kann man entnehmen, dass man durch ein bestimmtes Design, z.B. über die Auswahl der Sensoren, als auch die Auswahl und Verknüpfung der Merkmale, einen großen Einfluss auf die Robustheit einer Detektion hat. Die abstrakten Vorteile einer diversitär redundanten Sensorik kombiniert mit einer einfachen *UND*-Verknüpfungs-Logik (Decision Fusion) wird zum Beispiel bei Ruser [12] diskutiert. Diese Prinzipien sind auch seit langem bei bestehenden, sehr robusten Systemen, wie z.B. dem Airbag-System in der Anwendung [10]. Wie mächtig das Konzept ist, zeigt eine Beispielrechnung: Ein Algorithmus mit einer Falsch-Positiv-Rate von $FPR_{PP} = 10^{-2}/h$ stellt für sich genommen keine große Wirksamkeit dar.

Wird jedoch in einer Decision-Fusion mit einem Hauptpfad eine Auslösung in derselben Sekunde ($\tau_{event} = \frac{1}{3600} h$) gefordert, so kann die Falschauslöserate des Gesamtsystems in der Theorie um 5 Größenordnungen gesenkt werden (eq. 1).

$$P(FP_{total}) = P(FP_{HP} \cap FP_{PP}) \xrightarrow{\text{unkorr.}} P(FP_{HP}) \cdot P(FP_{PP}), \quad P(FP) = FPR \cdot \tau_{event}$$

$$FPR_{total} = \frac{P(FP_{total})}{\tau_{event}} = FPR_{HP} \cdot FPR_{PP} \cdot \tau_{event} \quad (\text{eq. 1})$$

Die sehr herausfordernde Bedingung ist, dass dieser Algorithmus statistisch unabhängig vom Hauptpfad sein muss. Weicht man von diesen Prinzipien ab, z.B. durch einen Fusionsalgorithmus, welcher dynamisch die aktuelle geschätzte Genauigkeit berücksichtigt (z.B. Value Fusion), so ergibt sich eine deutlich komplexere Situation: Aus den quantifizierten Eigenschaften von Teilsystemen kann nicht mehr in einfacher Weise auf das Gesamtverhalten geschlossen werden.

Eine Value-Fusion ist natürlich nicht grundsätzlich zu verwerfen, denn z.B. die Detektionsrate kann durch eine solche Fusion durchaus stark verbessert werden. Jedoch ist bei einem Design, welches sich aus Teilsystemen in einfacher Weise zusammensetzt und somit auch Teil für Teil gut zu analysieren ist in Hinblick auf die Robustheit ein Vorteil zu sehen. Der Vorteil für eine Pre-Trigger-Auslösung wird durch die Darstellung einer einfachen Prinzip-Simulation in Bild 2 motiviert.

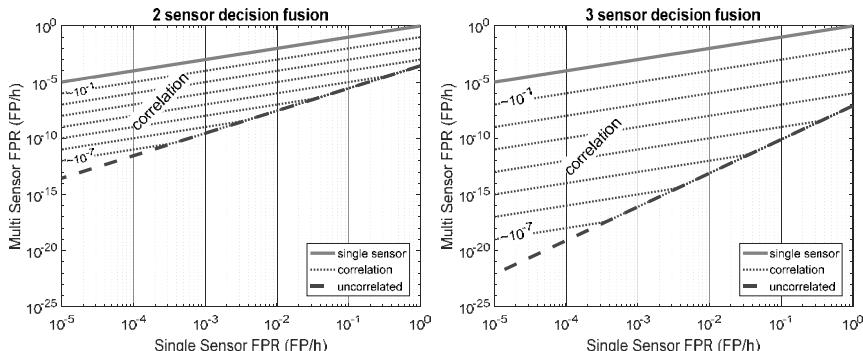


Bild 2: Schematisches Verhalten der Falschauslöserate eines Fusionssystems bestehend aus zwei bzw. drei Sensoren in Abhängigkeit der Korrelation der Falschauslösungen. Zugrunde liegt hier die Forderung der Koinzidenz einer Entscheidung auf unterschiedlichen Sensoren innerhalb derselben Sekunde.

Die Und-Verknüpfung von weitgehend unabhängigen Sensorsystemen kann die Falsch-Positiv-Rate sehr drastisch verringern. Beispielsweise kommt man bei einer Und-Kombination von zwei komplett unabhängigen Sensoren (linkes Diagramm) mit jeweils 10^{-4} Falschauslösungen pro Stunde theoretisch auf eine Falsch-Positiv-Rate von ca. $10^{-12}/h$, wenn die gleichzeitige Auslösung in einem Intervall von maximal einer Sekunde erfolgen soll (Einzelner Sensor: durchgezogen, fett; Kombiniert gestrichelt, fett). Rechtes Diagramm: Bei drei Sensoren mit jeweils 10^{-4} Falschauslösungen pro Stunde (durchgezogen, fett) ergibt sich analog zum ersten Fall eine Falsch-Positiv-Rate von ca. $10^{-19}/h$ (gestrichelte Linie, fett). Bei der Kombination der FPR des Hauptpfades und des Plausibilitätspfades ist die Koinzidenzzeit τ_{event} zu berücksichtigen gemäß der Formel (eq 1).

Tabelle 2: Einfache, wirkungsvolle Design-Prinzipien für eine robuste Pre-Trigger Auslöselogik.

Diversitär redundante Sensoren	Sensoren mit unterschiedlichen physikalischen Messprinzipien, die auf unabhängiger Auswertung die PreTrigger-Auslösungsentscheidung erlauben
Decision Fusion	Und-Verknüpfung der Auslöseentscheidungen mehrerer Pfade
Zeitliche Koinzidenz	Decision Fusion erfüllt eine Forderung nach zeitlicher Koinzidenz mit kurzer Zeitbasis
Anforderung an die Teilsysteme	Geringe oder bekannte Korrelation der Teilsysteme

Eine etwas tiefergehende Betrachtung zeigt jedoch die Herausforderung: Vollständig unkorrelierte Sensoren sind nicht realistisch. Liegt eine gewisse Korrelation der Einzelsensoren vor, erhöht sich die Falsch-Positive Rate gemäß der Definition der bedingten Wahrscheinlichkeit:

$$P(FP) = P(FP_1 \cap FP_2) = P(FP_1) \cdot P(FP_2|FP_1) \quad (\text{eq. 2})$$

Für die in Bild 2 dargestellte Prinzip-Simulation wurde der Korrelationsfaktor als bedingte Wahrscheinlichkeit modelliert. Die punktierten Linien in Bild 2 zeigen, wie sich die Falschauslöserate erhöht, wenn die Sensorpfade eine Korrelation aufweisen. Selbst wenn man weitgehend diversitär redundante Sensorik einsetzt und eine Decision Fusion als Logik wählt, bleibt die Aufgabe, die Korrelation der Einzelsensoren durch Tests oder theoretische Überlegungen abzuschätzen. Tabelle 2 fasst die erläuterten Prinzipien zusammen.

Entsprechend der dargestellten Prinzipien wurde ein einfaches Design (2-Pfad-System) festgelegt (Bild 3), welches in besonderem Maße Wert auf hohe Robustheit der Auslösealgorithmitik legt.

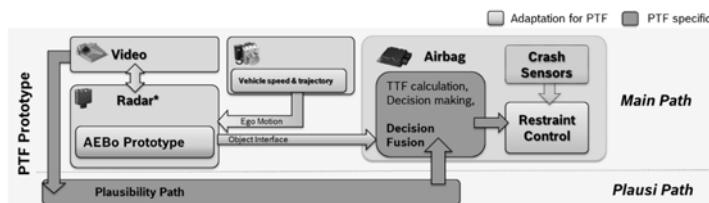


Bild 3: Prototypen-Design: Pre-Trigger-Sensierung basiert auf einem klassischen Sensierungspfad und wird durch einen dedizierten Plausibilitätspfad zusätzlich abgesichert.

Als erster Pfad wurde eine vereinfachte, angepasste AEB-Funktion zugrunde gelegt. Es wurde für den Prototyp an einigen Stellen stark adaptiert, einige Konzepte sind jedoch „proven-in-use“ und konnten übernommen werden. Dieser Pfad wird im Folgenden als Hauptpfad bezeichnet. Bild 3 weist darüber hinaus einen Plausibilitätspfad (Plausibility Path) auf. Die geforderte Randbedingung der geringen Korrelation der beiden Pfade ist oft schwierig nachzuweisen. In der vorliegenden Arbeit wird versucht, die Korrelation durch die Gestaltung des Plausibilitätspfads durch bewusste Auswahl eines Merkmals zu minimieren. Ziel ist also ein Plausibilitätspfad, der möglichst wenige Gemeinsamkeiten mit dem bisherigen System aufweist. Damit werden gemeinsame Fehlerquellen bereits beim Design des Systems vermieden. Einige wichtige Eigenschaften von möglichen Merkmalen, die ausschlaggebend für ein robustes Gesamtsystem sind:

- Diversität zum bisherigen System:
Merkmal ist im bisherigen System nicht enthalten
- Spezifisch für Anwendungsfall:
Merkmal ist auf den Anwendungsfall zugeschnitten, da nur im Nahbereich vorhanden
- Mehrere Analyseebenen:
Merkmal kann auf mehreren logischen Ebenen analysiert werden
- Redundanter Auslösepfad:
Merkmal erlaubt die Umsetzung einer Kollisionsvorhersage, ohne dass zusätzliche Informationsquellen nötig sind
- Umfangreiche Evaluierbarkeit:
Merkmal kann aus bereits gesammelten Daten extrahiert werden. Damit ist es möglich, die Qualität des Merkmals schnell und umfänglich zu evaluieren.

Mehrere Kandidaten für den Plausibilitätspfad wurden erwogen und die Wahl fiel auf einen Algorithmus basierend auf einer Nummernschilderkennung, die die geforderten speziellen Eigenschaften in der vorhergehenden Aufzählung aufweist. Ein Nummernschild ist ein normiertes, auf Sichtbarkeit optimiertes Merkmal mit überprüfbarer Syntaxregeln. Ausschlaggebend ist jedoch auch die schnelle Realisierbarkeit z.B. mittels existierender Bibliotheken. Ein Nummernschild als normiertes, auf Sichtbarkeit optimiertes Merkmal mit klaren Syntaxregeln erlaubt ein redundantes Decision Making inklusive eigenem PKW-Klassifikation und Tracking. Für die Umsetzung des Plausibilitätspfads wurden gängige zeitliche und logische Plausibilitätsmechanismen verwendet um einen Zusammenstoß vorherzusagen.

Der Plausibilitätspfad wurde mit neuen Methoden separat innerhalb einer Studie im Rahmen der Forschungsplattform i-protect ausgiebig getestet. Es wurde zusammen mit dem Ernst-

Mach-Institut der Fraunhofer Gesellschaft eine neue Methodik, eine Kombination von Szenarienanalyse und Fehlerreinspeisung, angewandt, um mögliche Schwachstellen des Designs im Vorfeld aufzuzeigen.

Besonders positiv bei videobasierten Merkmalen ist, dass bereits für die Vorentwicklungsphase genug Videodaten aus Erprobungsfahrten für eine Evaluierung vorliegen. Diesen Vorteil, dass auf mehrere tausend Stunden Erprobungsfahrten zugegriffen werden kann, kann direkt genutzt werden, um bereits in einer Vorentwicklungsphase die Aussage über die Korrelation der Pfade des Prototyps zu treffen.

5. Vorstellung und Diskussion experimenteller Ergebnisse eines Beispielsystems

Die Herausforderung bei der Stellung der Nutzenfälle ist die hohe Relativgeschwindigkeit. Um den Nutzen zu überprüfen, wurden auf der Erprobungsfläche Tests mit leichten Objekten (Balloon cars, kleine Schaumstoff-Targets), die Radar- und Videomerkmale aufweisen, durchgeführt. In 88% dieser Fälle erfolgte 'signal unlocking' durch den Plausibilitätspfad (V_{rel} im Bereich von 50 km/h bis 80 km/h und eine Gesamtaktivierungsentscheidung mindestens 100 ms vor Kontakt). Ein Beispiel ist in Bild 4 dargestellt. Die Radarobjekte des Hauptpfades werden schon bei großen Abständen erkannt (Kreise). Der videobasierte Plausibilitätspfad kann aufgrund der Bildauflösung das gewählte Merkmal erst bei direkter Annäherung erkennen (Dreiecke). Gleichzeitigkeit der Entscheidungen innerhalb eines Zeitfensters von ca. 100 ms wird als erfolgreiche Auslösung gezählt. Ein frei gezogenes leichtes Target mit 100 km/h Relativgeschwindigkeit ist allerdings meist zu instabil, um realistische Trajektorien darzustellen. Mit einer geeigneten Führung sind jedoch auch diese höheren Geschwindigkeiten mit diesem Target im Prinzip ohne Risiko für die Durchführenden zu realisieren.

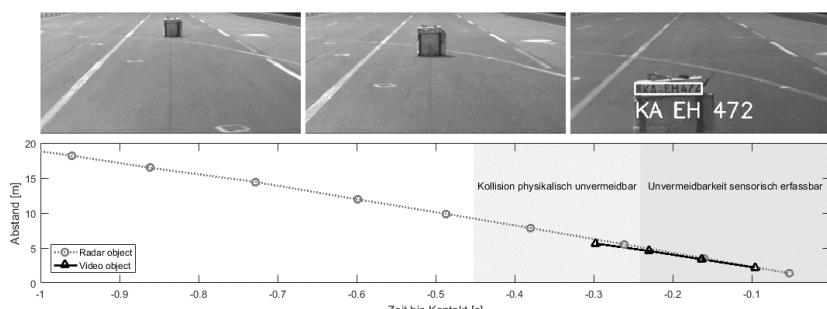


Bild 4: Erprobung der Funktion auf dem Erprobungsgelände.

Für den Test in einer Crashumgebung wurden auch Versuche im Labor durchgeführt (Bild 5). Eine solche Umgebung stellt keine ideale Umgebung dar. Radarsysteme müssen mit Clutter und Reflexionen zureckkommen, sodass die Trennung von Objekt und Hintergrund erschwert wird. Video-Systeme könnten durch die Crashbeleuchtung gestört werden. Für eine mögliche Testbarkeit eines Gesamtsystems ist es interessant, ob auch in einem Crash-Szenario ein Gesamtsystem ohne externe Triggereinrichtung eingesetzt werden könnte. Um dies zu überprüfen, wurde die entsprechende Sensorik auf einem Trolley befestigt. Mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h wurde der Trolley an einen Crashblock herangefahren und innerhalb von ca. 50 cm gestoppt, um zerstörungsfrei messen zu können. Für das Video-System wurde ein Bild eines Fahrzeugs auf dem Crashblock angebracht.



Bild 5: Erprobung der Funktion unter den herausfordernden Lichtverhältnissen einer Crashhalle.

Das Ergebnis dieser Experimente ist, dass der Hauptpfad in 11 von 20 Anfahrten rechtzeitig ausgelöst wurde. Überraschenderweise ergab sich für den Plausibilitätspfad keine Einschränkung durch die schwierigen Beleuchtungsverhältnissen (20 Auslösungen in 20 Anfahrten). Mit diesem ersten Experiment konnte gezeigt werden, dass das System selbst unter den herausfordernden Bedingungen einer Crashhalle keine prinzipiellen Probleme aufweist.

Im vorigen Abschnitt wurde eine geringe oder zumindest bekannte Korrelation der Teilsysteme als high-level Anforderung identifiziert. In dieser Studie wurde versucht, den Prototyp entsprechend auszulegen. Im Folgenden wird an verfügbaren Daten getestet, ob die Anforderung auch erfüllt ist.

Bereits der Hauptpfad des Prototyps ist so ausgelegt, dass es in den vorliegenden Datenbasen, keine Falsch-Positiv-Entscheidungen gibt. Für eine Analyse auf Anzeichen einer möglichen Korrelation wurde ein neues Merkmal TTE (Time-To-Encounter) auf den Merkmalen des Hauptpfades gebildet und zur Analyse ausgeleitet. TTE einspricht einer relevanten nahen Begegnung bzw. Vorbeifahrt und ist noch keine kritische Situation im Sinne eines notwendigen Triggers. So kann auch auf verhältnismäßig geringen Datenmengen eine statistisch bewertbare Ereignismenge gefunden werden.

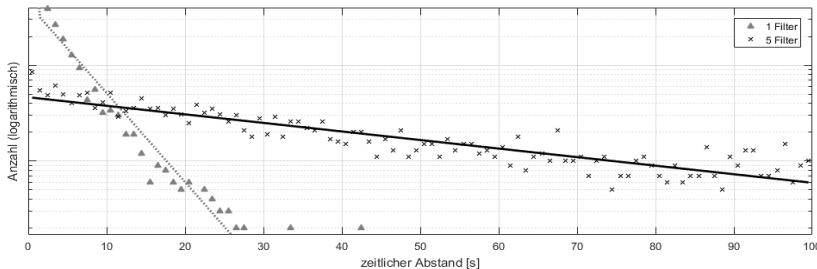


Bild 6: Analyse der zeitlichen Verteilung von Ereignissen des Hauptpfades und des Plausibilitätpfades.

Bild 6 zeigt den zeitlichen Abstand der Haupt- und Plausibilitätpfadereignisse (TTE und verschiedene Plausibilitätpfadfilter) als Histogramm mit entsprechend angepassten Exponentialverteilungen. Es zeigt sich für den Fall von einem aktiven Filter im Plausibilitätpfad (Dreiecke) eine Zeitkonstante von 5 s (gepunktete Linie), während für mehrere (hier beispielhaft 5, Kreuze) aktivierte Filterstufen eine Exponentialverteilung mit einer Zeitkonstanten 73 s ergibt (durchgezogene Linie). Die Verteilung ist nur schwach abhängig von der Anzahl der aktiven Filterstufen, solange mindestens 2 Filter aktiv sind.

Eine verbesserte Analyse kann durchgeführt werden, wenn es möglich ist, wichtige interne Merkmale der beiden Pfade auf Korrelation zu untersuchen. Voraussetzung dafür ist, dass Detailinformationen über beide Pfade zur Analyse vorliegen. Hier ist es von sehr großem Vorteil, wenn Sensoren oder zumindest die Algorithmen der beiden Pfade aus einer Hand stammen.

Eine solche zweite Analyse ist beispielhaft in Tabelle 3 durchgeführt: Korrelationskoeffizienten des zeitlichen Abstands zwischen Haupt- und Nebenpfadereignissen und verschiedenen Merkmalen, die für die entsprechenden Hauptpfadereignisse extrahiert wurden. Die relativ starke Korrelation mit der Messzeit ist durch die Aufteilung in Abschnitte bedingt, innerhalb derer Ereignisse gesucht werden. Die Korrelation mit der Kritikalität, die im Hauptpfad bestimmt wird, ist für knappe Vorbeifahrten – insbesondere bei vielen aktivierte Filtern – zu erwarten und auch erwünscht. Bei weiteren Merkmalen der Hauptpfadereignisse zeigt sich keine nennenswerte Korrelation. Die Korrelation wurde auch für weitere, hier nicht dargestellte Merkmale untersucht, dabei zeigte sich jedoch durchweg eine noch schwächere Korrelation.

Tabelle 3: Korrelationen von Merkmalen des Hauptpfades (10 Merkmale) und des neuen Plausibilisierungspfades (ein aktiver Filter bis 6 aktivierte Filter).

	1 Filter	2 Filter	3 Filter	4 Filter	5 Filter	6 Filter
Messzeit	0,02	0,19	0,24	0,33	0,06	0,44
Kritikalität	0,02	0,04	0,05	0,07	0,09	0,40
Merkmal 3	0,00	0,03	0,02	0,02	0,02	0,23
Merkmal 4	0,00	0,04	0,09	0,12	0,15	0,21
Merkmal 5	0,02	0,05	0,09	0,09	0,08	0,20
Merkmal 6	0,04	0,00	0,04	0,05	0,05	0,18
Merkmal 7	0,03	0,00	0,05	0,07	0,10	0,15
Merkmal 8	0,04	0,00	0,04	0,06	0,07	0,13
Merkmal 9	0,01	0,06	0,08	0,09	0,03	0,13
Merkmal 10	0,03	0,01	0,04	0,05	0,07	0,12

Es wurde beschrieben, wie bereits in der Vorentwicklung Überlegungen zu robuster Detektion und Auslöselogik angestellt wurden. Ein zweipfadriger Prototyp basierend auf einem Hauptpfad und einem Plausibilitätspfad wurde nach einfachen Robustheitskriterien aufgebaut.

Dieser wurde im vorherigen Abschnitt auf umfangreichen Daten (entsprechend eines Dauerlaufs heutiger Notbremssysteme) analysiert. Eine situationsbedingte Zunahme der Korrelation (Kritikalität zu Filter des Plausibilitätspfades) wurde wie erwartet beobachtet. Ansonsten zeigt die beobachtete zeitliche Koinzidenz die Eigenschaften der Kombination zweier unabhängiger Zufallsprozesse. Dieses Ergebnis ist notwendig, aber nicht hinreichend für ein sicheres System. Es ist ein Indikator, dass das Zweipfad-Design des Prototyps so geschickt gewählt wurde, dass keine Auffälligkeiten oder systematische Fehler gefunden werden konnten. Insbesondere ‚Unknown Unknowns‘, also bisher unbekannte Situationen, die zum gleichzeitigen Versagen beider Pfade führen, konnten nicht identifiziert werden. Die nur schwach ausgeprägte Korrelation der Merkmale des Hauptpfades mit den Filterstufen des Plausibilitätspfades zeigt allerdings aber auch an, dass in den Testdaten noch zu wenige Ereignisse vorkamen, um eine Schätzung der Korrelation final durchführen zu können. Weitere Analysen mit verfeinerten Verfahren und deutlich höheren Realdaten werden notwendig sein.

6. Field-based Validation als Schlüssel zur robusten Auslöseentscheidung

Pre-Trigger ist eine Sicherheitsfunktion, die bei einer ungerechtfertigten Auslösung ggf. ein gewisses Verletzungsrisiko birgt. Aus diesem Grund werden für Pre-Trigger sehr geringe Falschauslöseraten gefordert, die vergleichbar mit den Anforderungen eines autonomen Fahrzeugs sind. Um diesen Anforderungen nachzukommen, wird bereits beim Systementwurf eine redundante Entscheidungslogik vorgesehen, die gemeinsamen Fehlerquellen entgegenwirkt. Zudem wird systematisch mithilfe verschiedener Analysemethoden und Systemexperten nach weiteren Fehlerquellen gesucht und diese in geeigneter Weise adressiert. Jedoch kann auch dieses Vorgehen nicht sicherstellen, dass alle Fehlerquellen, die zu Falschauslösungen führen können, entdeckt werden oder in ihrer Auftretenshäufigkeit korrekt bewertet werden.

Für den Nachweis, dass keine relevanten Fehlerquellen übersehen wurden und das System damit der geforderten Falschauslöserate genügt, ist es nötig, das System auf einer repräsentativen Menge an Realdaten zu testen. Die benötigte Datenmenge für einen solchen Nachweis ist jedoch so groß, dass es unwirtschaftlich wäre, diese abzuspeichern. Daher ist ein flottenbasiertes Ansatz vielversprechend, um das System im Feld zu erproben und nur relevante Daten abzuspeichern und zu übertragen. Dabei ist es wichtig, dass über das System eine obere Schranke für die Falschauslöserate bekannt ist, die sicherstellt, dass die zu erwartende Datenmenge in einem handhabbaren Bereich liegt. Dabei muss neben dem Aufwand für das Anonymisieren, Abspeichern und Analysieren der Daten auch deren Übertragung vom Fahrzeug an einen zentralen Server betrachtet werden.

Mobilfunkanbindungen gehören immer mehr zur Standardausstattung neuer Fahrzeuge. Eine solche Mobilfunkanbindung auf Basis von LTE erreicht Uploadraten von 1-50 Mbit/s. Selbst bei einer Uploadrate von lediglich 1 Mbit/s ist es möglich, bis zu 450 MB an Daten pro Stunde an einen Server zu übertragen. Dies entspricht in etwa einem unkomprimierten Video einer Länge von 15 Sekunden bei einer Auflösung von einem Megapixel. Selbst wenn nur ein Zehntel dieser Bandbreite zur Verfügung steht, könnte pro Fahrzeug innerhalb von 10 Stunden ein solches Video übertragen werden. Es kann erwartet werden, dass ein Ereignis, das eine Übertragung erforderlich macht (vor allem durch die Nutzung von proven-in-use Elementen) dabei um mehrere Größenordnungen seltener auftritt.

Damit ist es möglich den Nachweis der zu erzielenden Falschauslöserate im Feld zu erbringen und dazu nur ein Bruchteil der Daten zu speichern.

Technisch ist ein Field-Based-Validation Ansatz also machbar. Trotzdem bedeutet dieser Ansatz zunächst Aufwand, der noch keinen unmittelbaren Nutzen für die Sicherheit des Fahrzeugs birgt. Wünschenswert ist, dass bereits bei der Erfassung der Daten der Insassenschutz erhöht werden kann. Ein solches Einführungsszenario ist möglich. Mit der sich stetig verbessernden Leistungsfähigkeit der Sensorik und des Umfeldmodells plant Bosch eine Reihe von Funktionen in zeitlicher Folge, die aufeinander aufbauen können [15]. Ein natürlicher Vorläufer einer Pre-Trigger Funktion ist die Integrated Crash Detection Funktion ICD. Umfeldinformationen von Radar und Video werden in dieser Funktion so verarbeitet, dass der Auslösealgorithmus basierend auf den Kontaktsensoren und den Umfeldsensoren arbeitet und so verbessert auf gewisse reale schwere Crash Szenarien, z.B. die als ‚weicher‘ Crash beginnen, schneller reagieren kann. Bild 7 zeigt ICD als einen möglichen Zwischenschritt. Wird diese Funktion geeignet ausgelegt, kann während der Pre-Trigger Validierungsphase im Feld bereits Nutzen aus den neuen Merkmalen gezogen werden. In diesem Einführungsszenario würde der umfeldbasierte Algorithmus mit dem kontaktbasierten Algorithmus abgeglichen und bei Abweichung der Auswertung kann ein geeignetes Datenpaket, wie beschrieben abgespeichert und übertragen werden.

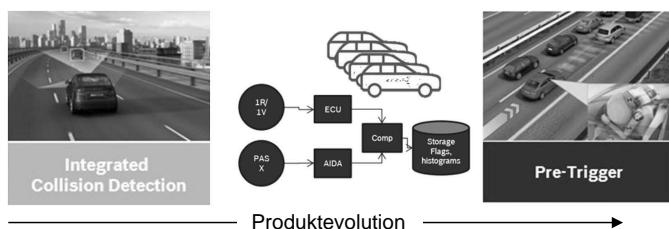


Bild 7: Mögliches Einführungsszenario, Nutzung einer früher eingeführten Funktion der Integralen Sicherheit, um eine Pre-Trigger Funktion der Zukunft zu validieren.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Für PreTrigger als Sicherheitsfunktion werden sehr geringe Falschauslöserraten gefordert, die vergleichbar mit den Anforderungen eines autonomen Fahrzeugs sind. In der vorliegenden Studie wurde ein Prototyp für ein Pre-Trigger-Sensiersystem vorgestellt. Bereits in der Vorentwicklungsphase wurde das Design auf eine robuste Vermeidung von Falschauslösungen ausgerichtet, insbesondere durch Nutzung von ‚Proven-In-Use‘-Komponenten sowie Ergänzung durch einen Absicherungsmechanismus mit beherrschbarer Komplexität. Für den sogenannten Plausibilitätspfad wurde eine weitgehend diversitäre Sensierung angestrebt, in Kombination mit einer Decision Fusion mit strenger zeitlicher Koinzidenzforderung konnten aus Analysen der Teilsysteme Erkenntnisse über das herausfordernde Gesamtsystem gewonnen werden. Besonders vorteilhaft ist, dass beide Pfade im Detail (interne Merkmals-Ebene) bekannt sind, was sich sowohl im Design, als auch in der Analyse und dem Test auf Abhängigkeiten als großer Vorteil erweist. Die präsentierten Analysen führen zu dem Schluss, dass das System grundsätzlich sehr robust ist. Um den Nachweis zu erbringen, dass keine relevanten Fehlerquellen mehr vorhanden sind und das System damit der geforderten Falschauslöserate genügt, ist es nötig, das System auf einer repräsentativen Menge an Realdaten zu testen. Die Aufwände für einen sogenannten ‚Field-based Validation‘ Ansatz, also das Erfassen, Anonymisieren, Übertragen, Abspeichern und Analysieren der Daten werden für die Pre-Trigger Funktion als handhabbar abgeschätzt, insbesondere, da durch die ‚Proven-in-use‘-Komponenten bereits eine gute Funktionsgrundlage zur Verfügung steht. Als möglicher, vielversprechender nächster Schritt, um eine Pre-Trigger Funktion langfristig sicher ins Feld zu bringen wird in dieser Studie eine Integration von Bausteinen in eine Vorläufer-Funktion der Integralen Sicherheit im Feld vorgeschlagen.

Literatur

- [1] Klier, W. et.al: Strategie zur Integration Sicherheitssystemen Status und Ausblick. VDI Tagung Berlin 2015
- [2] DESTATIS Fachserie 8, Reihe 7 Verkehrsunfälle, 2015 und 2016 (www.destatis.de)
- [3] German In-depth accident study (GIDAS) Jahrgang 2001-2015, Unfälle gewichtet und repräsentativ für Deutschland, (www.gidas.org), 2016
- [4] Wohllebe, T. et al.: Potential of Pre-Crash Restraints in Frontal Collisions. 8th International Symposium and Exhibition on Sophisticated Car Occupant Safety Systems, Karlsruhe 2006
- [5] Gstrein G. et al: IMPROVEMENT OF AIRBAG PERFORMANCE THROUGH PRETRIGGERING. ESV Conference 2009
- [6] Gstrein G. et al.: Reduktion des Verletzungsrisikos für Fahrzeuginsassen durch eine Aktivierung von Rückhaltesystemen vor to. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit. Innovativer Kfz-Insassen- und Partnerschutz. Düsseldorf: VDI Verlag GMBH, 2009, Vol. 2078, p. 213-225
- [7] Adomeit, D. et al.: Das hohe Schutzniveau eines Pre-Crash-Rückhaltesystems und seine breitbandige Wirkung. 7. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit, Berlin, 22. und 23. Oktober 2009
- [8] Bauman, R. et al: PRE-SAFE Pulse, die Erweiterung des Insassenschutzes durch Nutzung der Vorunfallphase. VDA, Technical Congress 2010
- [9] Schöneburg, R. et al: From a preventive to a pre-impacting restraint system. 24th Enhanced Safety of Vehicles Conference 2015
- [10] Bosch Kraftfahrttechnisches Taschenbuch. 25., aktualisierte und erweiterte Auflage, Wiesbaden 2003, S. 1040
- [11] Skutek M.: Ein PreCrash-System auf Basis multisensorieller Umgebungserfassung. Dissertation, TU Chemnitz 2006
- [12] Ruser, H.: Ultraschall-Mikrowellen-Sensorsystem zur Geschwindigkeits- und Abstandsmessung mit diversitär-redundanter Auswertung der Phasensignale. Dissertation, Universität der Bundeswehr München 2003
- [13] Becker, J.: Toward Fully Automated Driving. Automated Vehicle Symposium, 2014
- [14] Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik Jahresbericht 2016/2017. Ernst-Mach-Institut, EMI 2017
- [15] Klier, W. et al.: Integration Strategy of Safety Systems - Status and Outlook. SAE Technical Paper 2016-01-1499, 2016, <https://doi.org/10.4271/2016-01-1499>

Wirkpotentiale von PRE-SAFE® Impuls Seite am Beispiel eines schweren Kreuzungsunfallszenarios

Effectiveness Potential of PRE-SAFE® Impulse Using the Scenario of a Major Accident at an Intersection as an Example.

**Sebastian Heine, Prof. Dr. Rodolfo Schöneburg,
Michael Fehring, Dr. Julien Richert, Daimler AG, Sindelfingen**

Zusammenfassung

Aufgrund der steigenden Marktpenetration und der hohen Wirkungsgrade von automatischen Notbremsystemen zeichnet sich ein erster Trend in Richtung Reduzierung der Unfallzahlen bzw. der Unfallschwere in Längsverkehrsszenarien ab. Demnach kommt in Zukunft insbesondere dem Seitenauftreff und den dort beobachteten hohen Verletzungsrisiken zunehmende Bedeutung zu.

Moderne Fahrerassistenzsysteme adressieren die Fahrerunterstützung und Maßnahmen zur Unfallvermeidung und –schwereminderung des eigenen Fahrzeugs. Doch gerade der Aufprall in die eigene Fahrzeugseite ist bislang über Assistenzsysteme des eigenen Fahrzeugs kaum beeinflussbar. Hier gelingt eine Verbesserung nur über die Erweiterung des Unfallschutzes.

Mercedes-Benz hat mit der Markteinführung der neuen E-Klasse in 2016 erstmals ein zusätzliches Seitenschutzsystem realisiert, welches auf Basis moderner umgebungserfassender Systeme bereits vor einer möglichen Kollision Maßnahmen zum erweiterten Unfallschutz einleitet. PRE-SAFE® Impuls erkennt über seitlich angeordnete Radarsensoren die Unfallgefahr und bewegt den Insassen moderat unmittelbar vor Kollisionsbeginn über eine Luftblase in der seitlichen Sitzwange in Richtung Fahrzeugmitte. Der Effekt des zusätzlichen Abstands und der reduzierten Kontaktgeschwindigkeit beim eigentlichen Aufprall lässt sich in allen Fahrzeug-Fahrzeug Seitenauftreffkonfigurationen beobachten.

In dieser Studie wurde eine besonders schwere Aufprallkonfiguration in Full Scale Crashversuchen erprobt und analysiert. Hierzu wurden Crashversuche mit jeweils zwei Fahrzeugen durchgeführt. Dabei hatte das Bulletfahrzeug eine Stoßgeschwindigkeit von 65 km/h, das Targetfahrzeug jeweils 50 km/h Eigengeschwindigkeit. Das Targetfahrzeug war in jeweils einem Versuch mit PRE-SAFE® Impuls und im anderen ohne das präventive Schutzsystem ausgerüstet. Der Kollisionswinkel der beiden Fahrzeuge lag bei 105°. Der Auf treffpunkt des Bulletfahrzeug in die Seite des Targetfahrzeugs lag mittig des Fahrgastraums.

Im Vortrag wird die Unfallkonstellation vorgestellt inklusive der Auswirkungen auf Struktur und Insassenverhalten. Die Unterschiede der Dummykinematik als auch der Effekte auf die Belastungsgrößen der Dummies werden dargestellt. Der Effekt des präventiven Schutzsystems PRE-SAFE® Impuls wird analysiert. Ergänzend wird erweitertes Material zur Betrachtung von Real-Life Insassenkonstellationen mit Methoden von Menschmodellsimulationen dem Versuch mit Dummies mit und ohne PRE-SAFE® Impuls gegenüber gestellt.

Abstract

Research Question/Objective

As automatic emergency braking systems are increasingly penetrating the market and their efficiency is improving, initial trends show a reduction in the number and severity of accidents in longitudinal traffic scenarios.

For the future, the focus will therefore increasingly be on side impacts in particular and the accompanying risks of injury observed.

Most of the modern driver assistance systems only address driver assistance and measures for avoiding or mitigating accidents in longitudinal traffic. However, the one area where assistance systems have limited influence so far are side impact scenarios. Improving this area can mostly be achieved by extending the protection available in the event of an accident.

Methods and Data Sources

The launch of the new E-Class in 2016 marks the first time that Mercedes-Benz has implemented an additional side protection system that uses modern systems that monitor the surroundings to initiate measures for enhanced protection in an accident slightly before the predicted collision occurs.

PRE-SAFE® Impulse Side can detect the danger of an accident via radar sensors fitted on both sides of the front bumper. It can rotate the occupant's upper body moderately towards the center of the vehicle just before the imminent collision by inflating a pyrotechnical bladder in the side seat cushion. The effect of the additional distance and the reduced contact speed at

the time of the actual impact can be observed in all vehicle-to-vehicle side impact configurations.

In this study, a particularly severe impact configuration was tested and analyzed in full-scale crash tests. For this purpose, crash tests were performed with two vehicles in each case. In the tests, the bullet vehicle was traveling at 65 km/h, while the target vehicle had a vehicle speed of 50 km/h. The target vehicle was equipped with PRE-SAFE® Impulse in one test and did not have the preventative protection system in the other test. The collision angle of the two vehicles was 105°. The point of impact of the bullet vehicle in the side of the target vehicle was the center of the passenger compartment.

INTRODUCTION

Due to improved structure, seat belts and airbags, the safety level of modern vehicles has reached a very high standard. Even small cars offer an impressive degree of protection.

Further improvement of occupant protection, even implementing modern restraint systems such as adaptive airbags and switchable belt force, is only possible to a certain extent.

To date, occupant protection systems have only been actively deployed after t0, so after the point of impact. The enhancement of sensor technology offers a chance to detect accidents in advance. In other words, the available time to initiate actions increases dramatically. This, in turn, leads to great potential for further improvement of occupant protection in a passenger car.

In the future, Advanced Driver Assistance Systems will largely contribute to reduce the number of injured occupants by avoiding or mitigating crashes, mainly in longitudinal traffic. Therefore, the growing market penetration of ADAS will lead to an increased relevance of crossroads collisions [3]. Indeed, potential lateral collision partners are often hidden and cannot be properly seen i.e. tracked by the car sensors until the collision is unavoidable. At least, when the subject vehicle is stationary, driver assistance systems are incapable of minimizing the intensity of the accident. In that case, the severity of the side impact is directly linked to the proactive measures undertaken by the colliding vehicle partner. Integral safety means combining both active (i.e. driver assistance systems) and passive (i.e. restraint systems) safety systems, offering a great chance to also improve crossroad scenarios.

In this paper, a solution will be proposed that shows to what extent the pre-accident phase can be taken into account to prepare the occupant for a side impact.

OPERATIVE MECHANISM

Mechanisms of action in a side impact depend on the distance between occupant and vehicle structure as well as on the intrusion or contact speed of the vehicle structure to the occupant. Compared to frontal impact there is less absorption way and time to protect the occupant in side impacts. There are only limited distance between the occupant and the struck side of the vehicle as well as short time between the beginning of the collision and the moment when the occupant is loaded by the impact of the door/B-pillar.

The vehicle's dimensional design usually limits the distance between the occupant and the vehicle structure. Potentials to reduce the intrusion velocity have been primarily achieved through structural measures. Present airbags for side protection are designed and dimensioned to be activated shortly after the beginning of the impact. Involving the occupant in the sequence of an accident event earlier or even prior to a collision has not been considered till now.

PRE-SAFE® IMPULSE SIDE

The PRE-SAFE® Impulse Side protection system demonstrates how a pre-impacting system could work. PRE-SAFE® Impulse Side is the very first of a new generation of pre-impacting restraint systems whose field of action will be extended prior to the collision due to the integration of active and passive safety.

Occupant Impact as Operative Mechanism

At a certain time slightly before the side impact, the occupant of a vehicle is laterally displaced by a movement of the backrest side bolster. This small impulse moves the occupant towards the center of the vehicle before the impact occurs.

Actively moving the occupant towards the center of the vehicle increases the distance between the upper body of the occupant and the door panel, which can also be beneficial for the deployment of thorax-pelvis side airbag in real-life situations.

The contact time between intruding structure and occupant also occurs later and therefore with reduced intrusion speed. In addition, the occupant is already moving at a certain speed in the direction of the impact. His or her relative velocity relative to the intruding structure is smaller and, therefore, less kinetic energy has to be dissipated by the contact with the restraint system and/or the car structure. PRE-SAFE® Impulse Side, like all other PRE-SAFE® systems, acts as an additional measure that does not replace the conventional restraint system, but can enhance it in realistic accident scenarios.

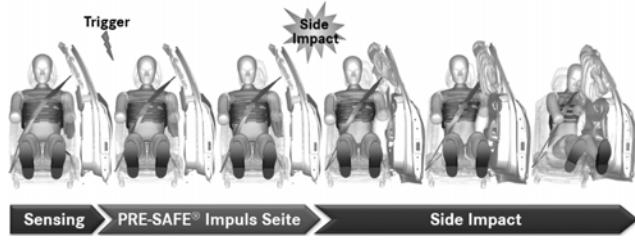


Fig. 1: Occupant interaction due to PRE-SAFE Impulse activation Sensor Systems

PRE-SAFE® Impulse Side Actuator

For PRE-SAFE® Impulse Side, an actor was necessary that could provide the impulse without interfering with other systems in the seat during normal operation. The use of already available comfort bladders in the seat backrests did not show the wanted effect. Therefore, an additional component was integrated in the outboard side of the driver and passenger seat rest. The "pyrotechnical bladder" is designed of an unfolded airbag fabric with an external cold gas inflator, which can be replaced after a deployment without replacing other seat components.



Fig. 2: Schematic view of PRE-SAFE® Impulse Side main components



Fig. 3: Location of radar sensors

The monitoring of car surroundings with radar sensors, cameras and ultrasonic sensors has established itself as an enabler for assistance systems in modern vehicles.

Figure 4 depicts the equipment fitted to a 2016 Mercedes-Benz E-Class Sedan that features a Driver Assistance Package Plus.

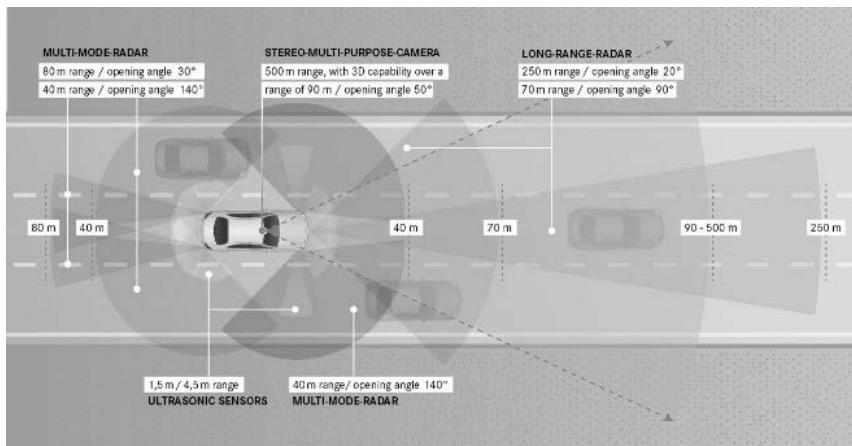


Fig. 4: Sensor equipment of 2016 Mercedes-Benz E-Class Sedan with Driver Assistance Package Plus

These sensors as used for driver assistance systems could also be used to develop spin-off applications that offer protection in an accident. Current Mercedes-Benz carlines equipped with a driver assistance package utilize targeted algorithms to detect an upcoming collision using forward-facing sensors and the sensor in the rear bumper.

For this purpose, special algorithms were created that analyze the sensor data to detect "collision objects". Such detection can be realized independently of the assistance functions and operating status of the vehicle. The overarching objective is to detect "objects on a collision course", whereby this detection refers to the vantage point of the respective sensor. From this perspective, a passing vehicle in oncoming traffic is just as much an "object on a collision course" as a bridge pillar that the appropriate vehicle is approaching. Potential collision objects can also be detected when the vehicle is stationary. In the event of an impending frontal or rear-end collision, graduated preventive safety measures are activated. These measures are up to now always reversible in line with the underlying idea of the PRE-SAFE® concept.

Areas of coverage

The relevant time frame for detecting collision objects begins nearly half a second before the impact. From this time onwards it is possible to accurately predict whether the collision is unavoidable or not. As a consequence, the short distance area to the vehicle (typically under 15 meters) must be covered by the sensor system for such functions. To realize the PRE-SAFE® Impulse Side function, sensors that monitor the side area near to the car are needed in order to detect objects on a collision course in the car environment. Therefore, it is mandatory to define areas of coverage that the sensor system has to monitor, in order to be able to address relevant use cases. In [5] and [6], an analysis of the pre-crash phase using the "Pre-Crash Matrix" of the GIDAS Database was done, showing the collision objects between 400 and 200 ms prior to side collision. The result of this analysis can be seen on figure 5. The area of coverage of the radar sensor implemented (blue lines) was overlaid to the rapprochement vectors showing that a very large majority of vehicle-to-vehicle side collisions can be detected through the system.

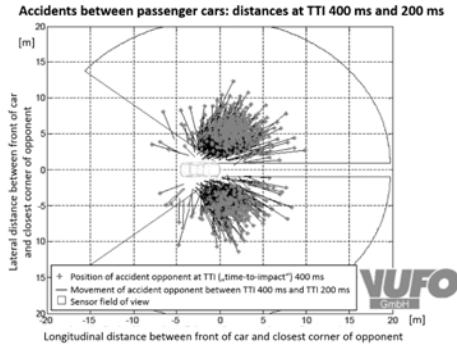


Fig. 5: Rapprochement of collision objects between 400 and 200 ms prior to side collision

Sensor Systems

The relevant areas of coverage for the PRE-SAFE® Impulse Side function were not monitored from already implemented sensors as one can see on Fig.4 (grey areas). As a consequence, two additional radar sensors were implemented (orange areas on fig.4). These sensors filled this gap in the sensor coverage achieving almost a 360° monitoring of the car surroundings.

CRASH SET-UP

In order to assess the potential of the PRE-SAFE® Impulse Side function, full scale crash tests were performed.

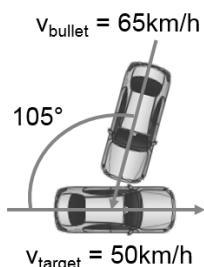


Fig. 6: Side collision set-up

The test set-up is shown on Fig. 6. The bullet vehicle (Mercedes-Benz C-Class) had an impact speed of 65 km/h, while the target vehicle (Mercedes-Benz E-Class) had a vehicle speed of 50 km/h. The target vehicle was equipped with PRE-SAFE® Impulse in one test and did not have the preventative protection system in the other test. The collision angle of the two vehicles was 105°. The point of impact of the bullet vehicle in the side of the target vehicle was the center of the passenger compartment. The E-Class is equipped with a 50th percentile World-SID ATD in order to assess the loading on the driver.

The purpose of the tests is to determine the potential of PRE-SAFE® Impulse in a real accident situation. The chosen situation was a severe side impact configuration of the kind that can easily occur at a road junction.

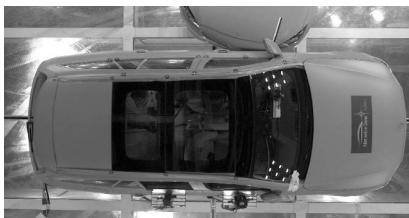


Fig. 7: collision position at time frame t=0ms



Fig. 8: collision position at time frame t=90ms

Fig. 7 shows the impact configuration at time $t=0$ ms, while Fig. 8 shows the same at time $t=90$ ms at the start of the phase of separation of the bullet vehicle. The two vehicles impact each other approximately at right angles, the bullet vehicle directly in the A- to C-pillar region during the energy transfer process.

KINEMATIC ANALYSIS

To begin with, the analysis of the measured data is to be preceded by an analysis of the occupant kinematics. Fig. 9 and 10 both present the occupant situation of the driver at the start of the impact situation at time $t=0$ ms. It can be clearly seen that, in Fig. 9, the dummy was pushed around 30-35 mm toward the center of the vehicle. Especially in the upper thoracic region, the distance between the dummy and the door pannel has increased by this amount. This effect has the greatest impact on the upper region of the dummy, because this region is propelled about the fulcrum of the hips. Moreover, at the time of the start of the collision, the dummy is still moving inward, with the result that the change of velocity through the collision impact is lower than in the test without the PRE-SAFE® Impulse system.



Fig. 9: Dummyposition @ 0ms with PRE-SAFE® Impulse



Fig. 10: Dummyposition @ 0ms without PRE-SAFE® Impulse

Fig. 11 and 12 show the dummy position and airbag deployment at $t=16\text{ms}$. Despite an identical ignition time, a more favorable side airbag deployment can be seen in the test with PRE-SAFE® Impulse on account of the improved spatial conditions. This effect is all the more pronounced, the more the situation immediately before the collision leads to a dynamic displacement of the occupants due to a corresponding change of direction or evasive maneuver.



Fig. 11: Dummyposition @ 16ms with PRE-SAFE® Impulse

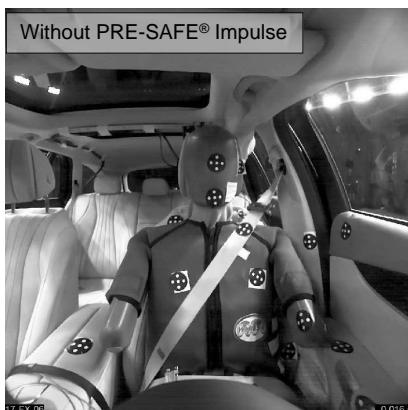


Fig. 12: Dummyposition @ 16ms without PRE-SAFE® Impulse

Fig. 13 and 14 both show the dummy position at $t=30$ ms. At the start of the absorption phase, there is likewise a discernible kinematic advantage in the test with PRE-SAFE® Impulse. Both upper torso and head are at a greater distance from the intruding door. In Fig. 13, especially the center axis of the body is less inclined at the same time in the test with PRE-SAFE® Impulse.



Fig. 13: Dummyposition @ 30ms with PRE-SAFE® Impulse



Fig. 14: Dummyposition @ 30ms without PRE-SAFE® Impulse

Fig. 15 and 16 show the occupant positions at $t=67$ ms at the end of the energy conversion phase. It can be seen that, in the test with PRE-SAFE® Impulse in Fig. 15, the impact on the shoulder rib is less pronounced than in Fig. 16, the test without PRE-SAFE® Impulse, as will be later apparent also in the measured data.

Overall, there is evidence of a more favorable kinematic configuration on the side away from the impact. Especially in driving situations that precede the crash, e.g. due to evasive driving maneuvers, driver and/or front passenger are exposed to these driving dynamics. This can

lead to situations in which the body of the driver or front passenger is in contact with the side door panel and the thorax airbag has a constrained deployment space. In such a situation, PRE-SAFE® Impulse can increase the distance between thorax and side door panel, thereby opening the deployment space of the thorax airbag.



Fig. 15: Dummy position @ 67ms with PRE-SAFE® Impulse



Fig. 16: Dummy position @ 67ms without PRE-SAFE® Impulse

ASSESSMENT SYSTEM PERFORMANCE

As already discussed in the kinematic analysis, the potential of PRE-SAFE® Impulse is discernible especially in the upper thoracic region. In this impact configuration, the shoulder region is especially at risk and can be better protected by a precisely timed Impulse.

Fig. 17 to 21 show the relevant loading measurements from the crash test dummy in a comparison of the two tests. The scaling of the measured data was normalized to 100% in the baseline test, i.e. without the PRE-SAFE® Impulse system (red dotted curves). In contrast, the

measured value from the test with PRE-SAFE® Impulse was plotted as a percentage (black curves).

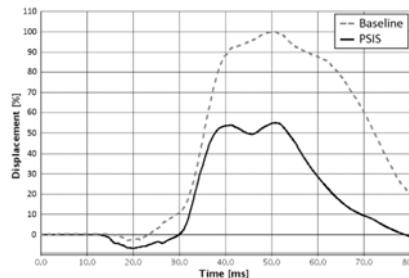


Fig. 17: Measurement of the shoulder deflection

Fig. 17 shows that the deflection of the shoulder rib is only 55% in relation to the measured value from the baseline test. Moreover, a significantly earlier unloading of the shoulder rib is discernible.

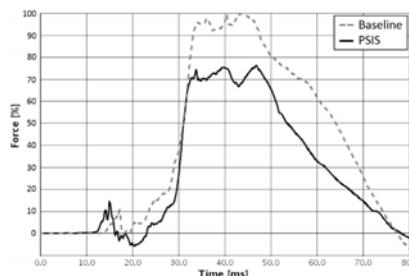


Fig. 18: Measurement of the shoulder force

The same potential is visible in the measured value of the shoulder force in Fig. 18. The measured value in this case is only 77% in relation to the baseline test. In current ratings and legal regulations, the shoulder force in particular represents a key hurdle for meeting the targets. This is where PRE-SAFE® Impulse can bring about an improvement in tests and in real accidents.

Fig. 19 shows the improvement of the upper thoracic rib in relation to the baseline test. A 20% improvement is identifiable.

As already mentioned, the improvement reduces, the nearer the measurement is to the hips, the fulcrum of the PRE-CRASH displacement.

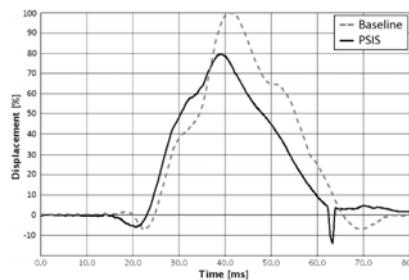


Fig. 19: Measurement of the upper rib deflection

In the region of the middle thoracic rib in Fig. 20, an improvement is no longer discernible. However, the test with PRE-SAFE® Impulse shows an earlier start of absorption than the baseline test. This is due to the inflated seat side bolster, which interacts with the side airbag in the absorption phase.

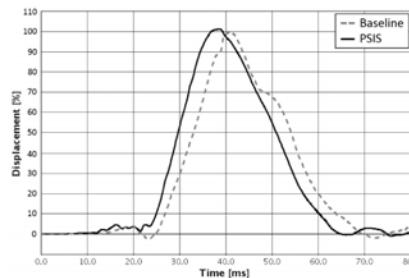


Fig. 20: Measurement of the middle rib deflection

Fig. 21 shows the lower value of the thoracic rib. There is no identifiable improvement in this case. The proximity to the fulcrum of the PRE-CRASH displacement did not lead to a change of location or velocity of the lower thoracic region.

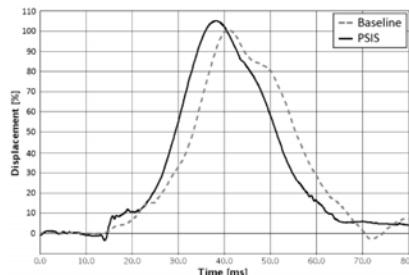


Fig. 21: Measurement of the lower rib deflection

CONCLUSIONS

In medium to severe side impact configurations, PRE-SAFE® Impulse can, through preventive displacement of the occupant towards the center of the vehicle, significantly reduce the forces to which the occupant is subjected. The maximum measured potential is 45% deflection and 23% of the force. The additional absorption space as well as the relative displacement towards the vehicle center represent the physical basis for improving the kinematics and the resulting measured data.

The main benefit can be observed in the upper thoracic regions. The improved kinematics cause the occupant to be tilted about the fulcrum of the hips towards the center of the vehicle. This can be reached through a timely deployment of the PRE-SAFE® Impulse bladder.

REFERENCES

- [1] Prof. Dr. Rodolfo Schöneburg, Marica Paurevic, Michael Fehring, Dr. Julien Richert
Ralf Bogenrieder - "FROM A PREVENTIVE TO A PRE-IMPACTING RESTRAINT SYSTEM"
Daimler AG - ESV Conference 2015, Gothenburg, Sweden, June 2015, Paper Number 15-0374
- [2] Marica Paurevic, Prof. Dr. Rodolfo Schöneburg, Dr. Julien Richert, Ralf Bogenrieder -
"PRE-SAFE® Impulse Side: A Preventive Pre-Impacting Restraint System" - Daimler AG -
Airbag 2014 Conference, Karlsruhe, Germany December 2014
- [3] T. Unselt, Prof. Dr. R. Schöneburg, J. Bakker - Occupant and Partner Protection under the
Circumstances of the Introduction of autonomous Vehicle Systems - Daimler AG – 9th VDI
Congress on Vehicle Safety, Berlin, Germany, 20 and 21 Nov. 2013
- [4] PRE-SAFE® Impulse: Early Interacting Occupant Restraint System - T. Heinrich, Prof. Dr.
R. Schöneburg, R. Bachmann, U. Merz, M. Fehring - Daimler AG - 11th International Symposi-
um and Exhibition on Sophisticated Car Occupant Safety Systems, Airbag 2012 - 5 Decem-
ber 2012, Karlsruhe
- [5] Dr. J. Richert, R. Bogenrieder, U. Merz, Prof. Dr. R. Schöneburg – PRE-SAFE® Impulse
Side
Pre-impacting restraint system in case of imminent side impact – opportunity for occupant pro-
tection, challenge for environmental sensors - Daimler AG - 10th VDI Congress on Vehicle
Safety, Berlin, Germany, 24 and 25 Nov. 2015
- [6] R. Bogenrieder, Dr. J. Richert, W. Bullinger, Intelligent Safety traditionally safe - ATZ extra
The new E-Class from Mercedes-Benz, page 88, Springer Vieweg Verlag, 2016

Fahrerwille oder sichere Übergabe?

Driver's Intention or Safe Handover?

**Dipl.-Ing. Koshan Mahdi, Dipl.-Inf. Christian Thiele,
Dipl.-Inf. Andre Meyer-Damcke, Dr.-Ing. Lisa Diwischek,**
Takata AG, Berlin

Zusammenfassung

Die Einführung des automatisierten Fahrens stellt unter anderem auch hohe Anforderungen an die Fahrerzustandserkennung. Erste Systeme zur Automation setzen auf Handerkennung des Fahrers am Lenkrad, einige auch auf Blickabwendungserkennung. Dadurch soll gewährleistet werden, dass der Fahrer seiner Aufgabe – der Überwachung der automatisierten Fahrt – nachkommt. Eine Rückübernahme der Fahrfunktion durch den Fahrer kann jederzeit durch einen Lenkeingriff erfolgen.

Bei hochautomatisiertem Fahren (SAE Level 3 oder 4) lässt sich diese Übernahmestrategie nicht umsetzen, da der Fahrer längere Zeit out-of-the-loop sein darf und es notwendig ist, legitime Fahrerwünsche von versehentlichen Eingaben zu unterscheiden.

Verschiedene Konzepte zur Rückübernahme der manuellen Kontrolle wurden in einer Fahrsimulatorstudie hinsichtlich Fehlervermeidung bei gleichzeitig minimaler Beeinträchtigung der Fahrerintention verglichen/analysiert. Über eine Befragung der Probanden wurden die Varianten bewertet und verglichen.

Abstract

The introduction of automated driving puts high demands on the driver state detection. The first systems for automation are based on the detection of the driver's hand on the steering wheel; some systems detect the driver's visual attention as well. This is necessary to ensure that the driver follows his task of monitoring the automated drive. A take-over of the driving function by the driver can be done/conducted at any time by a steering intervention.

In the case of highly automated driving (SAE level 3 or 4), this takeover strategy cannot be implemented because the driver may be out-of-the-loop for an extended period of time and it is necessary to distinguish legitimate driver intentions from accidental entries.

Various concepts for the re-admission of manual control were examined and compared. In a driving simulator study, it was investigated how a safe take-over can be achieved with minimal impairment of the driver's intention. The variants were compared and rated by the subjects by means of a questionnaire.

Einleitung

In den vergangenen Jahren entwickelten sich die Fahrerassistenzsysteme zu teilautomatischen Fahrfunktionen (SAE Level 2) weiter und stellten dadurch unter anderem auch hohe Anforderungen an die Fahrerzustandserkennung. Der Fahrer hat bei diesen Systemen weiterhin die Verantwortung und die Pflicht, die automatisierte Fahrt zu überwachen [1]. Um dies zu kontrollieren und bei Bedarf einzufordern, setzen die ersten Systeme zur Teilautomation auf eine Handerkennung des Fahrers am Lenkrad und manche Systeme auch auf eine zusätzliche Blickabwendungserkennung. Bei Gefahr oder auch lediglich auf Wunsch des Fahrers kann eine Rückübernahme der Fahrfunktion jederzeit durch einen Lenkeingriff erfolgen.

Aktuell werden erste Fahrzeugmodelle mit der Fähigkeit zum hochautomatisiertem Fahren (SAE Level 3) vorgestellt und weitere Modelle sind für die nächsten Jahre zu erwarten. Auch Modelle mit SAE Level 4 befinden sich aktuell in der Entwicklung. Diesen hochautomatisierten Fahrzeugen ist gemein, dass der Fahrer nicht mehr dauerhaft das System überwachen muss. Der Fahrer darf längere Zeit out-of-the-loop sein und kann sich anderen Aufgaben widmen. Welche Nebenaufgaben erlaubt sein werden und ob Schlafen bald dazugehören wird [2], ist zurzeit noch unklar. Speziell Schlafen wird eine große Herausforderung für die Fahrerzustandserkennung werden, wobei erste Untersuchungen von Takata zeigen, dass aktuell in der Entwicklung befindliche Vitalsensorik (Herzrate, Hautleitwert und Atmung) dabei vielversprechende Lösungsansätze ermöglicht.

Relevanz im Feld / Unfallgeschehen

Neben dem Komfortgewinn ist die Vermeidung von Unfällen eine der Motivationen für die Einführung von automatisiertem Fahren – in der ersten Generation vorzugsweise auf der Autobahn. Es ist hinreichend bekannt, dass im rein manuellen Fahren Unfälle zum größten Teil auf Fahrfehler wie zum Beispiel Missachtung von Vorfahrt oder Fehleinschätzung der Situation zurückzuführen sind. Laut Statistischem Bundesamt ist menschliches Fehlverhalten bei 88,1% aller Unfälle mit Personenschäden die Unfallursache [3]. In der Unfalldatenbank GIDAS wurde das aktuelle Unfallgeschehen im Hinblick auf Autobahnunfälle untersucht. Analysiert wurden die Daten der GIDAS-Datenbank vom Juli 2017, welche 25.836 rekonstruierte Unfälle mit mindestens einem PKW enthält. 1.577 dieser Unfälle traten auf Autobahnen auf, wobei die zwei häufigsten Unfallkonstellationen Zusammenstöße in Längsrichtung und Abkommen von der Fahrbahn sind (siehe Diagramm 1). Zusammen machen sie ca. 77% aller Unfälle aus und es ist zu erwarten, dass ein bemerkenswerter Anteil dieser Unfälle durch automatisiertes Fahren vermieden werden kann.

Die dritthäufigste Unfallart auf der Autobahn (16,4%) ist ein Zusammenstoß mit einem seitlich fahrenden Fahrzeug. Diese seitlichen Zusammenstöße sind hauptsächlich (87%) Spurwechselunfälle und verglichen mit allen Unfällen der GIDAS-Datenbank aber auch mit allen Autobahnunfällen überdurchschnittlich schwer (siehe Diagramm 2). Die Hauptunfallsache ist in 56% der Fälle das Nichtbeachten der Verkehrsregeln bzw. das Nichtbeachten anderer Verkehrsteilnehmer (siehe Diagramm 3).

Die Auswirkungen der Automation auf diese Unfallkonstellation sind etwas schwieriger zu betrachten. Während der hochautomatisierten Fahrt sollte diese Unfallkonstellation vom System verhindert werden. Zu einem Unfall kann es aber kommen, wenn der Fahrer zu einem ungünstigen Zeitpunkt übernimmt bzw. das System übersteuert und dabei den Verkehr auf den Nebenspuren nicht beachtet. Speziell bei der Rückübernahme und dem Beginn der manuellen Fahrt kann eine Fehleinschätzung des Verkehrsgeschehens durch mangelndes Situationsbewusstsein verstärkt oder hervorgerufen werden. Darüber liegen im Moment jedoch noch keine aussagekräftigen Daten vor.

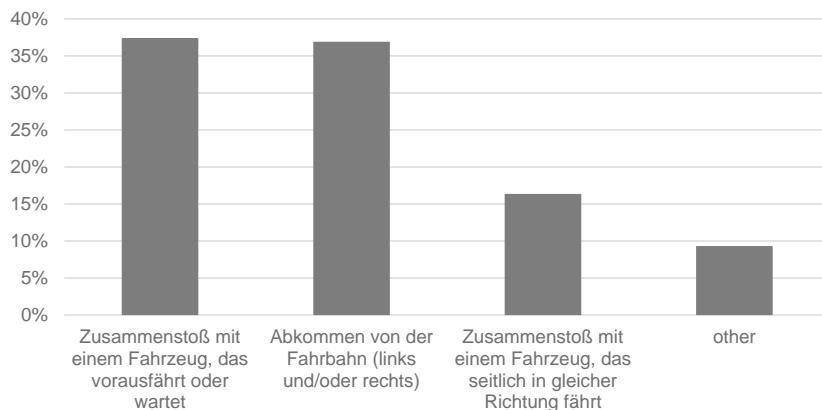


Diagramm 1: Unfallart bei Unfällen in der GIDAS-Datenbank (nur Autobahn) [n=1.577]

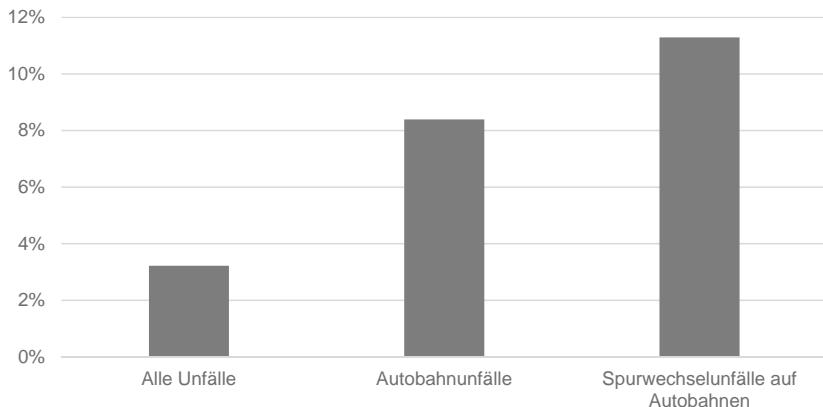


Diagramm 2: Anteil der Unfälle mit schweren Verletzungen (MAIS3+) nach Unfallort und -art gemäß der GIDAS-Datenbank

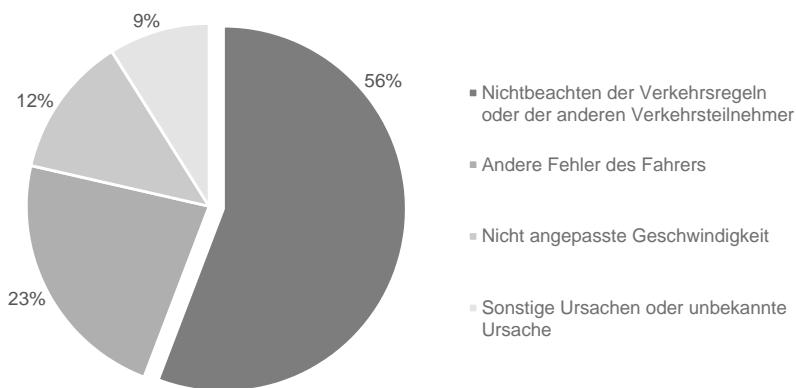


Diagramm 3: Hauptunfallursache der Spurwechselunfälle auf der Autobahn in der GIDAS-Datenbank [n=224]

Lösungsansätze zur sicheren Übernahme

Beim hochautomatisierten Fahren (SAE Level 3 oder 4) sollte also die Rückübergabe nicht durch einfaches Übersteuern funktionieren, wie beim Fahren mit SAE Level 2. Als Beispiel sei hier eine längere hochautomatisierte Autobahnfahrt ohne Zwischenfälle genannt, bei der der Fahrer plötzlich von seinem Buch hochschreckt, weil ein lauter Transporter ihn überholt. Ein abrupter Lenkeingriff sollte in diesem Fall vermieden werden, da der Fahrer höchstwahrscheinlich nicht über ein vollständiges Situationsbewusstsein (nach [4]) verfügt. Auch eine versehentliche Berührung des Lenkrades sollte nicht zu einer Abschaltung der Automation führen. Es gilt also, legitime Fahrerintentionen von durch Schreckmomenten hervorgerufenen Eingaben oder versehentlichen Eingaben zu unterscheiden. Bisherige wissenschaftliche Untersuchungen zum automatisierten Fahren und zur Rückübernahme konzentrieren sich hauptsächlich auf die Übernahmezeit und die Gestaltung der Übernahmeaufforderung. Eine umfassende Übersicht ist in [5] zu finden. In vielen der darin zusammengefassten Arbeiten finden sich auch Hinweise bzw. Vermutungen zur Steigerung der Übernahmequalität. Sowohl die Beobachtung des Blickverhaltens als auch eine detaillierte Information über das Fahrzeugumfeld werden erwähnt.

Im Berliner Forschungszentrum der Takata AG wurden daher verschiedene Systeme zur Rückübernahme der manuellen Kontrolle untersucht. Neben klassischer Handdetektion am Lenkrad wurden auch Systeme zur Überwachung von Blickverhalten in Erwägung gezogen. Im Folgenden wird eine Untersuchung zu unterschiedlichen Rücknahmemethoden nach der hochautomatisierten Fahrt vorgestellt. Es wurde sich dabei auf Systeme konzentriert, die in der Lage sind, eine versehentliche Eingabe zu unterbinden, jedoch eine gewollte und zügige Übernahme nicht behindern.

Untersuchung im Fahrsimulator

Der Fahrsimulator am Berliner Forschungsstandort ist ein fixed-base System mit einer Viertelkarosse auf Basis eines Mittelklassefahrzeugs. Als Software kommt SILAB in Version 5 mit drei Projektoren für 120° Sichtfeld zum Einsatz. Weiterhin sind Monitore für die beiden Seitenpiegel und den Rückspiegel integriert. Für die Untersuchung im Fahrsimulator wurde ein Laborsystem zur Blickbewegung (Dikablis von Ergoneers) verwendet, um festzustellen inwiefern sich die Überwachung des Seiten- und Rückspiegels bei der Rückübernahme verändert. Das Dikablis-System hat eine Genauigkeit von 0,1° bis 0,3° für die Blickrichtungserkennung bei

eine Wiederholrate von 60Hz. Die fehlende Messung der Kopfbewegung wurde mittels eingeblendeter QR-Marker in den Bildbereichen Straße, Seitenspiegel und Rückspiegel kompensiert.

An der Studie nahmen 32 gesunde Probanden freiwillig teil. Geschlecht und Alter wurde ausbalanciert, letzteres über die vier Altersklassen 18–24, 25–39, 40–54 und 55+ gemäß den NHTSA Distraction Guidelines [6].

Herangehensweise

Die Fahraufgabe bestand darin, dass vier verschiedene Übernahmeszenarien in randomisierter Reihenfolge gefahren wurden. Es wurde ein Fahrzeug, welches nach SAE Level 3 hochautomatisiert fahren kann, bei einer Autobahnfahrt simuliert. Nach einer kurzen Eingewöhnungsphase in manueller Fahrt sollte die Automation angeschaltet werden, indem zwei Knöpfe am Lenkrad gedrückt und für zwei Sekunden gehalten werden. Bei mäßigem Verkehr sollte die Versuchsperson während der automatisierten Fahrt in bereitliegenden Zeitschriften lesen. Nach ca. vier Minuten Fahrt forderte das System eine Rückübernahme zum manuellen Fahren durch einen Warnton und ein Symbol im Cockpitdisplay an, da eine Wanderbaustelle die rechte Spur blockierte. Als Baseline fungierte eine Übernahme analog zu teilautomatisierten SAE-Level-2-Systemen, wobei nach dem Warnhinweis einfach übersteuert werden kann. Weiterhin wurden drei Varianten implementiert, bei denen erst nach einer definitiven Bestätigung des Fahrers übernommen werden konnte.

Insgesamt gab es also folgende vier Übernahmevarianten:

- a) Übernahme durch Übersteuern nach Warnhinweis (Baseline)
- b) Drücken und 2s halten der beiden Lenkradknöpfe wie bei der Aktivierung der Automation
- c) Hände 2s lang an definierten Positionen am Lenkrad halten (10:10 Uhr)
- d) Prüfen des linken Seitenspiegels und des Innenspiegels. Deaktivierung nach dem Blick zurück auf die Straße

Wurde nach acht Sekunden nicht übernommen wurde eine sichere Notbremsung vor der Wanderbaustelle eingeleitet und die Probanden mussten zunächst die Übernahme abschließen bevor sie weiterfahren konnten. Die Übernahmeaufforderung kam entsprechend frühzeitig vor

der Wanderbaustelle (470 Meter). Die Strecken waren so gestaltet, dass zu diesem Zeitpunkt das Hindernis noch nicht gesehen werden konnte.

Ergebnisse der Fahrsimulatorstudie

Es seien an dieser Stelle einige Ergebnisse der Untersuchung exemplarisch aufgeführt. So wurde die durchschnittliche Verweildauer der Blicke der Probanden auf den linken Außenspiegel vor dem durch die Wanderbaustelle bedingten Spurwechsel betrachtet. Betrachtet wurden der Zeitraum zwischen der Übernahmeforderung und dem Spurwechsel (ca. 11 Sekunden).

Gemittelt über die Übernahmeverarianten ergibt sich, dass in der Baseline am kürzesten vor dem Überholen in den linken Außenspiegel geschaut wurde (137ms). Bei der Übernahme mittels Knöpfen am Lenkrad und Handerkennung wurde durchschnittlich 65% bis 70% länger in den Spiegel geschaut als bei der Baseline (236ms bzw. 226ms). Bei der Übernahme mittels Spiegelblick musste der Proband für mindestens 40ms in den Spiegel schauen bevor zur Bestätigung ein 400ms langer Gong abgespielt wurde. Trotzdem wurde insgesamt durchschnittlich 1043ms und somit 660% länger als in der Baseline in den linken Außenspiegel geschaut (Diagramm 4).

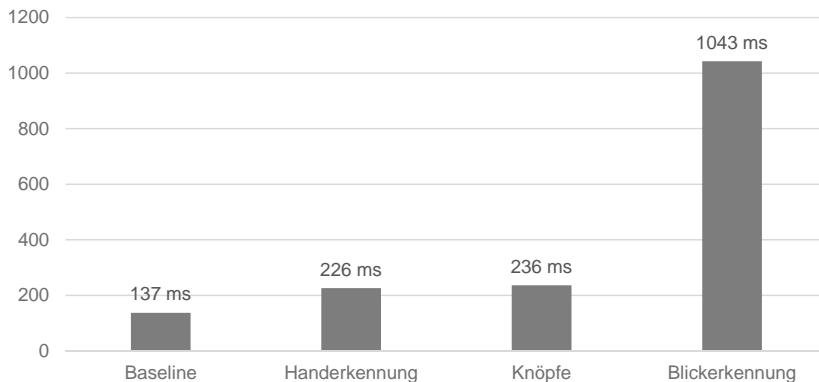


Diagramm 4: Durchschnittliche Blickzeit (in ms) in den linken Außenspiegel zwischen Übernahmeforderung und Spurwechsel gemittelt nach Übernahmeverarianten.

Den linken Außenspiegel kontrollierten in den Übernahmeverarianten ohne erzwungenen Blickerkennung überhaupt nur 71% der Fahrer. Den inneren Rückspiegel kontrollierten nur 15% der Fahrer.

Die Probanden wurden u. a. gefragt, wie gut ihnen welches System gefällt (bestes System: 1; schlechtestes System: 4) gefällt. Es ergibt sich die beste Durchschnittsbewertung für die Abschaltung durch Handerkennung (1,8). Die Baseline (2,2) und die Abschaltung mit Knöpfen (2,5) sind im Mittelfeld. Am schlechtesten schneidet die Abschaltung durch die Blickerkennung ab (3,4). Diagramm 5 zeigt die Bewertungen für alle vier Systeme.

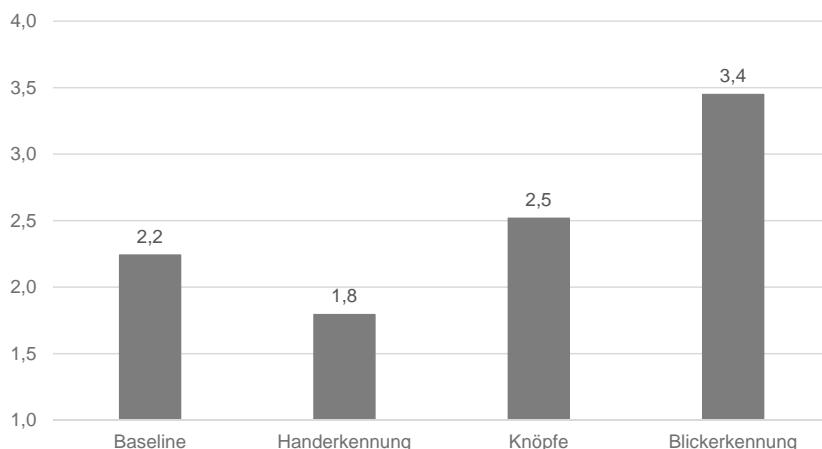


Diagramm 5: Durchschnittliche Bewertung (1 bis 4) der Übernahmeverarianten.

Die Probanden wurden des Weiteren gemäß Nasa-TLX [7] bezüglich ihrer geistigen, körperlichen und zeitlichen Beanspruchung und ihrem Frustrationsniveau befragt (angekreuzt auf einer linearen Skala, die dann von 0 bis 100 bewertet wurde). Dabei schneiden bei all diesen Fragen die Übernahmeverarianten Baseline und Blickerkennung am schlechtesten ab. Die Übernahme durch Handerkennung hatte hier bei allen Fragen die beste Bewertung. Beispielhaft zeigt Diagramm 6 die Frustrationsbewertung für die verschiedenen Übernahmeverarianten.

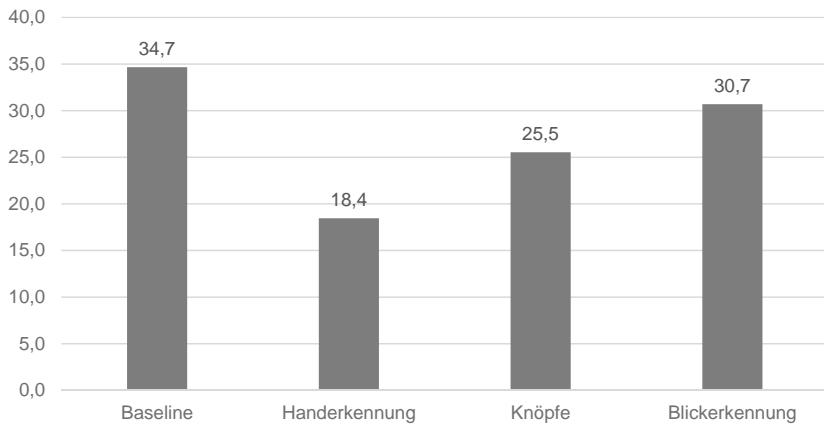


Diagramm 6: Durchschnittliche Frustrationsbewertung der Übernahmeverarianten auf einer Skala von 0 bis 100, wobei höhere Werte einer höheren Frustration entsprechen.

Fazit und Ausblick

Aus Gründen der Sicherheit ist ein einfaches Übersteuern als Rückübernahme aus einer hoch-automatisierten Fahrt (SAE Level 3 oder 4) nicht empfehlenswert. Bereits bei rein manueller Fahrt ereignen sich häufig Unfälle beim Spurwechsel durch mangelnde Beachtung des Verkehrs. In der durchgeföhrten Fahrsimulatorstudie wechselten Probanden beim Ausschalten der Automation in 29% der Fälle die Spur ohne vorher in den Seitenspiegel zu schauen.

Um Verwirrung über die Zuständigkeit zu vermeiden sollte ebenfalls sichergestellt werden, dass der Fahrer definitiv die Kontrolle vom Fahrzeug zurückübernimmt. Es sollte eine klare „Schwelle“ eingeföhrt werden, welche aber nicht zu geringerer Akzeptanz des Systems führen darf. Alle drei in der Untersuchung getesteten Varianten wurden im Hinblick auf ihr Frustrationspotential gleichgut oder besser als die unkontrollierte Übergabe bewertet. Die Übernahme durch Handerkennung am Lenkrad hatte die beste Nutzerbewertung.

In der Entwicklung befindliche moderne Kamerasyteme zur Beobachtung des Fahrers sind in der Lage nicht nur die Kopfposition und die Kopforientierung zu bestimmen, sondern können auch die Blickrichtung und Blickbewegung aus der Vermessung der Augen und Pupillen

bestimmen. Mit der Genauigkeit der aktuellen Prototypen zur Blickrichtungserkennung (siehe Diagramm 7) lassen sich bei der Rückübergabe aus der hochautomatisierten Fahrt auch Blicke des Fahrers in den Seitenspiegel und den Rückspiegel detektieren.

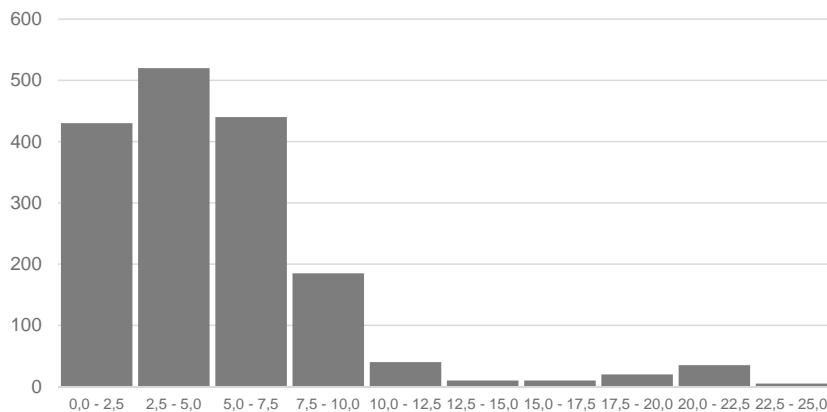


Diagramm 7: Histogramm über den Winkelfehler der Blickrichtungserkennung in einer Fahrzeugumgebung auf einer Serienhardware mit Prototypenalgorithmen

Damit wäre es möglich zu erkennen, ob der Fahrer zumindest sorgfältig das Fahrzeugumfeld überprüft hat, bevor die Rückübernahme zur manuellen Fahrt erfolgt. Die Implementierung in der Studie war jedoch für die Probanden ungewohnt und daher weniger attraktiv bewertet worden. Eine elegante Kombination aus Handerkennung am Lenkrad und Überprüfung der Blickbewegung wäre wünschenswert, was sich eventuell mit einer abgestuften Übergabe der Fahrzeugkontrolle abbilden ließe.

Etwas weiter in der Zukunft liegt die kontinuierliche Messung der Vitalparameter, welche einen Rückschluss auf die Belastung oder Entspannung des Fahrers zulässt. Takata interne Untersuchungen zeigen vielversprechende Ergebnisse bei der Erkennung von Schlaf während der Automation sowie belastende Situationen während der manuellen Fahrt.

Literatur

- [1] National Transportation Safety Board, „Collision Between a Car Operating With Automated Vehicle Control System and a Tractor-Semitrailer Truck Near Williston, Florida, May 7, 2016“, Highway Accident Report NTSB/HAR-17/02, September 2017
- [2] European Commission, “Study on the Assessment and Certification of Automated Vehicles: Final Report”, ISBN 978-92-79-65253-0, 2017
- [3] Statistisches Bundesamt, Fachserie 8 Reihe 7, “Verkehrsunfälle Jahresbericht 2016”, Juli 2017
- [4] Dominguez C., Vidulich, M., Vogel, E. & McMillan, G., “Situation Awareness. Papers and Annotated Bibliography”, Armstrong Laboratory, Human System Center, ref. AL/CF-TR-1994-0085, 1994
- [5] T. Vogelpohl et al., Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Forschungsbericht Nr. 39, „Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung“, August 2016
- [6] Garrett, R., “Visual-Manual NHTSA Driver Distraction Guidelines for In-Vehicle Electronic Devices” (No. NHTSA-2010-0053) (p. 177). Washington, DC, USA: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2012
- [7] Hart, S. G., & Staveland, L. E., “Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research”, In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), Human Mental Workload. Amsterdam: North Holland Press, 1988

Automated Driving: New interior concepts and occupant safety

Contradiction or opportunity?

Andreas Forster, Bardo Peters, Continental, Regensburg;
Dr. Stephan Zecha,
Continental Safety Engineering Internationals GmbH, Alzenau

Zusammenfassung

Mit der Einführung des automatisierten Fahrens (AD) ergeben sich neue Freiheitsgrade für die Gestaltung des Fahrzeuginnenraums: In dem Maß, in dem der Fahrer sich anderen nicht fahrrelevanten Aufgaben zuwenden darf, werden seine veränderten Anforderungen auch in neuen Innenraumkonzepten abgebildet. Damit verändern sich die Rahmenbedingungen für die Rückhaltesysteme und die passive Sicherheit insgesamt. Im Hinblick auf die komplexe Wechselwirkung zwischen den vielen Elementen der passiven Sicherheit und neue zu erwartende Lastfälle sind neue Ansätze und Entwicklungen nötig, um das vorhandene hohe Niveau beim Insassenschutz weiterhin zu gewährleisten, ohne den Komfort zu beeinträchtigen. Die Kernherausforderung liegt darin, die wechselnde Position der Insassen ständig zuverlässig zu erkennen, um die Rückhaltesysteme entsprechend zielgerichtet aktivieren zu können. Diese Notwendigkeit ergibt sich aus der Einsicht, dass auch die steigende Anzahl an Fahrerassistenzsystemen nicht alle Unfallgeschehen wird verhindern können. Nicht kalkulierbare externe Faktoren, speziell durch den Mischverkehr mit konventionellen Fahrzeugen bedingt, sowie die Grenzen der Physik machen den passiven Insassenschutz auch weiterhin unverzichtbar. Der Beitrag beschreibt Art und Umfang der absehbaren Veränderungen und analysiert Lösungswege.

Abstract

The transition to automated driving (AD) will lead to higher levels of vehicle interior design freedom: Once the driver is free to pursue other activities, not related to the driving task, the driver's changing requirements will also be reflected in new interior concepts. This will change the boundary conditions for restraint systems and passive safety in general. Considering the complex interaction between the many elements of passive safety and new types of future load cases, new approaches and new developments will be necessary to maintain the existing high

level of occupant protection without reducing the level of comfort. The core challenge lies in permanently detecting the occupants' changing position in order to activate restraint systems in a targeted and situation-specific way. It is imperative to advance passive safety because even the growing number of advanced driver assistance functions will not be able to prevent all accidents. Unpredictable external factors, particularly the mixed automated and non-automated traffic, plus the applicable laws of physics make occupant protection a must nonetheless. This paper describes the type and scope of the foreseeable changes and analyses solution concepts.

1. Mechanism and efficiency of current occupant restraint systems in the vehicle

The high level of current occupant safety is based on a very well proven triad of protection principles which interact closely:

- The vehicle body absorbs a part of the crash impulse in its crumple zones. By offering a certain length of deformation path, the effective deceleration rate which acts upon the vehicle occupants is reduced by stretching it over time and travel.
- By connecting the passenger to the vehicle via the seat belt, the motion of the occupant is limited. The seat absorbs the force exerted by the belt and transfers it to the stiff part of the vehicle body.
- The airbags provide a specific cushioning which absorbs the motion of the occupants' individual body parts (e.g., head, torso, femur).

Fig. 1 shows the situation for the driver and lists the elements of occupant restraint and their manifestations. It is obvious that the efficiency of the restraint systems strongly depends on a complex balance between the many factors which slow down the occupant motion and absorb her/his energy without exposing the occupant to overly high forces.

Well known elements of this balance are belt force limiter, staged airbag inflation and controlled airbag venting after gas discharge. Cold gas inflators (containing compressed gas) provide greater freedom to define the required airbag filling level (harshness) and time of inflation, both of which can be used to make the restraint more situation-adaptive.

The activation (e.g. deployment strategy) of restraint elements is based on factors such as crash severity, direction of the crash (e.g. frontal vs. side impact) and seat position. Sensors provide the data computed in control units. While the immediate boundary conditions vary for the driver and front/rear passengers, the underlying three principles of successful restraint apply universally.

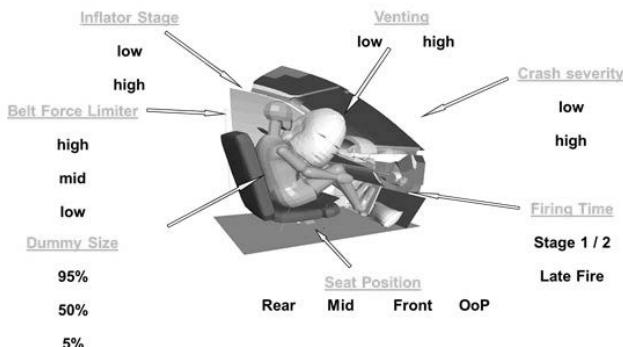


Fig. 1: The interaction of restraint elements is a complex process

The desired effect of the vehicle's crumple zones at the front end and the rear add to the total deformation and deceleration path while the remaining vehicle structure provides a sufficient survival space for the occupants. Structures within this survival space (e.g. cockpit, door and roof liners etc.) are optimized to reduce the risk of injury in the case of an impact between a body part and the structure during the crash. The general goal is to keep the deceleration rate and movement of the occupants under a critical threshold (e.g. shoulder belt load, whiplash).

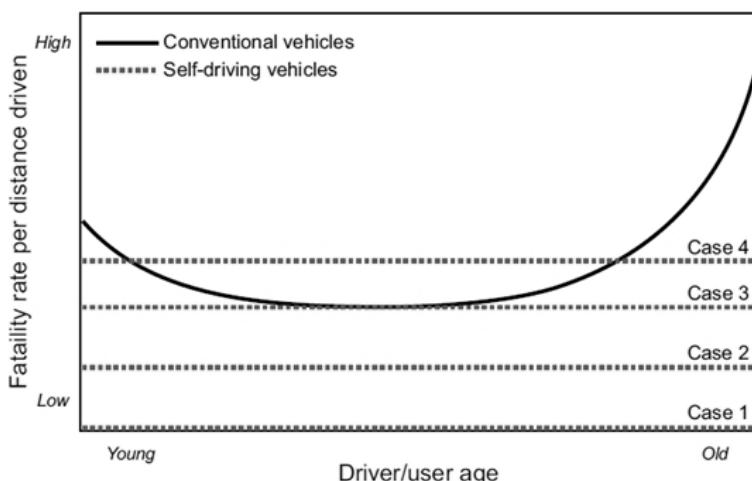
Typically the restraint systems are designed to cover a pre-defined and increasing number of relevant accident scenarios (= load cases) which are evaluated during crash testing. Modern vehicles are increasingly capable of adapting their restraint strategy to real-world accident scenarios by processing crash sensor data. Currently the test scenarios are based on the assumption that the occupants are in their respective nominal position at the moment of the crash. Out of position (OoP) situations are currently hard to detect because there is no sensor data available.

Interim conclusion: Occupant safety during a crash depends on a complex interaction between many dynamic factors of restraint and passive safety in general. The fact that this balance needs to be adjusted for each vehicle model individually highlights just how important the boundary conditions are for occupant safety even within today's more or less "standard" type of passenger vehicle interior. Assuming that new types of AD vehicles with an innovative design will bring massive changes to the interior, it becomes clear that occupant safety in an AD vehicle will pose new challenges.

2. Foreseeable future requirements

Automated driving is generally understood as an important step towards the ultimate goal of Vision Zero (= zero traffic fatalities, or ideally no accidents at all). This belief implies that AD systems will perform better than an experienced and attentive human driver. The biggest single benefit of AD technology is its reliability. Where human drivers may perform well for thousands of kilometers, they may just as well cause an accident by failing to react adequately to a given traffic situation. The AD system on the other hand is unaffected by tiredness or other human conditions. Yet, the performance level of an AD system needs to be classified in a defined way to allow a comparison between human driver and machine.

The curve in **Fig. 2** shows the human driver performance over the lifetime of a driver community. Statistics show that young drivers tend to cause accidents because they underrate risks (speed, overtaking) and overrate their abilities, middle-aged drivers are at the peak of performance and experience. Older drivers can suffer from deteriorating sensorial perception, longer reaction times and lack of mental flexibility (e.g. erroneously taking priority). A well-designed technical system for AD shall rule all these problems out. A study, carried out by the University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI), investigated the relation between the AD system performance of self-driving vehicles and the potential benefit in comparison with typical manual driving [1].



Michael Sivak and Brandon Schoettle
University of Michigan Transportation Research Institute

Fig. 2: AD systems should perform equally well or better than Case 3 level (= experienced middle-aged driver) to win trust

By classifying the AD system performance in Cases 1 through 4 the study refers to a possible concern: If AD vehicles should perform worse than Class 3 (= the best human driver performance at the best user age) the trust in AD systems could be impacted. It is therefore essential to ensure an AD system performance at or above Class 3 level.

At the same time, the occupant safety must be optimized for the residual crash risk (caused by, e.g. oncoming traffic/manual drivers, swinging-out cars, inclement weather, stone-throwers, rock fall) to give drivers maximum trust in the safety of their vehicle.

If one looks at the total picture – mixed automated and manual traffic, residual crash risk – it should not come as a surprise that the requirement to wear a seat belt and the corresponding belt reminder requirements are becoming more severe instead of more lenient. The seat belt and airbag will be needed in AD vehicles just as well, even though they are hardly ever highlighted in current concept vehicles. The underlying reason may very well be that as of now there is not yet a definition of what the restraint systems for AD vehicle interiors should look like. New interior concepts, e.g. with swivel seats or people movers (self-driving vehicles; "robo-taxis") introduce totally new occupant positions. Future questions for restraint systems will be: Which way is the occupant oriented to? What is his position in the seat? Does he/she hold an object? Where is the expected impact coming from in relation to the occupant? Can the person be brought back to a nominal position in the remaining time?

Electrified vehicles (EVs) in particular will bring additional changes:

- As the electric drivetrain is more compact than an internal combustion engine (and the traction battery is typically installed under the seats), there will be no engine bay as such in an EV. This means that the crumple zone at the vehicle front is reduced to make the best use of the vehicle length for the interior.
- For the same reason, the wheels can be located closer to the four vehicle corners. A longer wheelbase is also equivalent with shorter hood and rear overhangs.
- This can also mean that occupants will be closer to the windows: In people movers, for instance, the seat backrest could be directly adjacent to the window. This could bring the occupant's head close to the window.

At the same time Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) like the ones that will be tested in accordance with the Euro NCAP 2018 roadmap, will have a beneficial effect on the situation. Systems such as the Autonomous Emergency Braking function (AEB), emergency lane-keep assist (Lane Departure Warning, LDW) and others will help to reduce the number of accidents and/or mitigate their severity. From that point of view, the number and severity of crashes in

the longitudinal direction is expected to go down by around 50 % or more because there is a higher level of automated driver support for this type of crash risk. However, there are less chances of actively avoiding side impacts. So, in relation to the trend of fewer longitudinal crash situations, the relevance of side impacts will increase. If an occupant is Out of Position (OoP) – which may well be the new standard rather than the exception in an AD vehicle – it will become even more challenging to adapt the restraint systems to the person's position.

Interim conclusion: In comparison to the current situation, the lack of crumple zones will potentially reduce the deformation zones and deceleration path in the future so that crashes in general may pose challenges currently known from side impacts. It is therefore important to find new ways of absorbing kinetic energy in a crash situation. The requirement to wear a seat belt will apply to passenger car AD vehicles as well because this is currently the only way of safely connecting the occupants to the vehicle structure.

3. Interior concepts reviewed

The multitude of possible new occupant positions in an AD vehicle becomes obvious by analyzing two exemplary new vehicle types: Privately owned passenger cars with swivel seats (**Fig. 3**); People Movers with bench seats and standing capacity (**Fig. 4**).

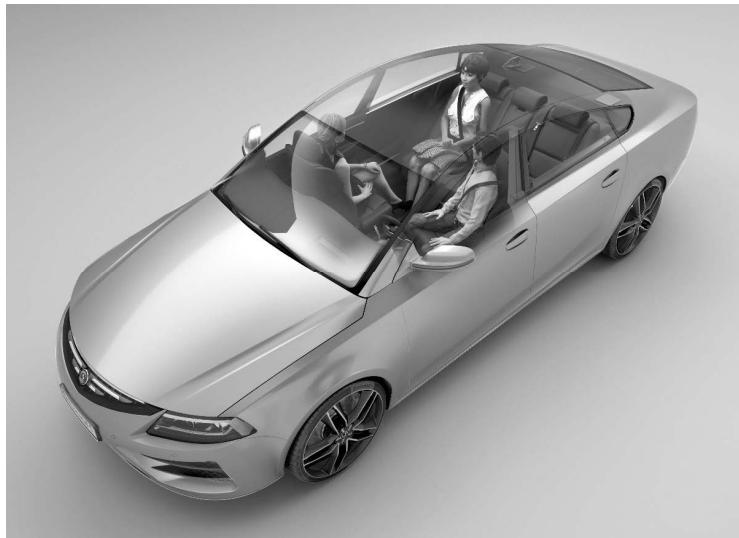


Fig. 3: AD passenger car with swivel seats which allow new seat positions



Fig. 4: AD vehicle of the People Mover type as shown by Continental at the Frankfurt Motor Show 2017; note the mix of undefined bench seat positions and standing capacity

Both vehicle interiors bring the added challenge of changing occupant positions and orientations. The People Mover offers the higher level of uncertainty about occupant positions because the bench seats, for instance, may not ensure a defined nominal position. Also there may be no structural element available between the individual bench seat passengers that could be used to integrate airbags in. Add to this that standing passengers could be facing whichever way, and objects (luggage) could be located, e.g., on the floor.

Nevertheless, novel AD passenger cars interiors also pose new challenges: In a conventional passenger car, the front passenger airbag, for instances, rests on the dashboard and the windscreen during inflation. In an AD passenger car, the occupant may be facing away from the windscreen and dashboard, so that the boundary conditions for the airbag are completely different.

It has already been mentioned that there is currently no reliable sensor data available to detect the position of vehicle passengers in order to adapt the restraint systems. Considering the multitude of potential “OoP” situations in future AD vehicles with innovative interior designs it becomes clear that these situations need to be addressed. For example, ongoing discussions at the UN-ECE about Automatically Commanded Steering Function (ACSF) technology include the question whether interior sensors should become mandatory. This expected future trend

is also supported by additional new elements of the human-machine interaction, such as gesture control. As soon as new interior sensors are in place, the resulting data pool on passenger positions and/or activity shall be exploited for the purpose of passive safety.

In any case both new types of vehicle interior strongly advocate a sensor-based **occupant model** which provides information about the number and position of occupants to the restraint control. For the People Mover AD vehicle class this may also make a tele operator helpful to avoid intentional misuse of the available seating.

Interim conclusion: In any case the information about where the occupants are located and what position they are in will be needed to ensure a targeted and adequate restraint system activation. Considering the question of objects in the People Mover (luggage) airbags may take on the additional function of keeping objects away from occupants during a crash (Fig. 5). The same can apply to AD passenger cars, where occupants may hold objects in their hands. In this case a separate airbag can be used to move such objects away from the body.



Fig. 5: During a crash objects need to be moved away from occupants

4. Targeted protection in AD vehicles through use of new sensors

All conclusions so far point towards a targeted use of restraint systems to factor in all possible seat configurations and seat adjustment options in AD vehicles. From a technical point of view this requires sensor data. As vehicles are increasingly equipped with ADAS environment sensors such as radar, LiDAR and camera can provide information about the vehicle surrounding and any objects relevant for a potential crash scenario. This will certainly be true for AD vehicles because they need sensor data for trajectory planning and determination of the vehicle

position. New interior concepts will require additional sensors to identify the number and positions of occupants in the interior. It is to be expected that these sensors will be a mix of imaging methods and seat-integrated sensors. Interior sensor will not only serve to identify the orientation and position of the vehicle occupants, they will also allow a classification of the passenger as to her/his age, height, weight, and possible frailty. This information can be used to personalize the activation of restraint systems. For example, airbags can be inflated to a softer maximum to avoid airbag-caused injuries of an OoP occupant. Free spaces in the interior can also be identified and classified as available for airbag activation, e.g., in order to intercept objects which might otherwise hit an occupant.

Based on the sensor data on occupants, it will be possible to activate the restraint systems in a targeted way. For instance, the knowledge about the expected time to the crash, the direction and severity of the impact, can be used to inflate airbags with an appropriate speed and extend their inflation time. This can help to prevent objects from flying around and hitting occupants. Longer inflation times can be used to increase the occupant protection in all sitting positions. Imaging methods may also be able to provide the information whether an occupant may be in danger of slipping out or underneath the seat belt ("submarining"). In other words occupant safety and targeted use of restraint systems will require a tighter integration of active safety sensor data and passive safety strategies. **Fig. 6** shows the functional architecture suggested for the computation of data during an imminent crash situation. To optimize the restraint strategy to the expected crash event it will become more important to precondition the occupant before the crash (i.e. before t_0).

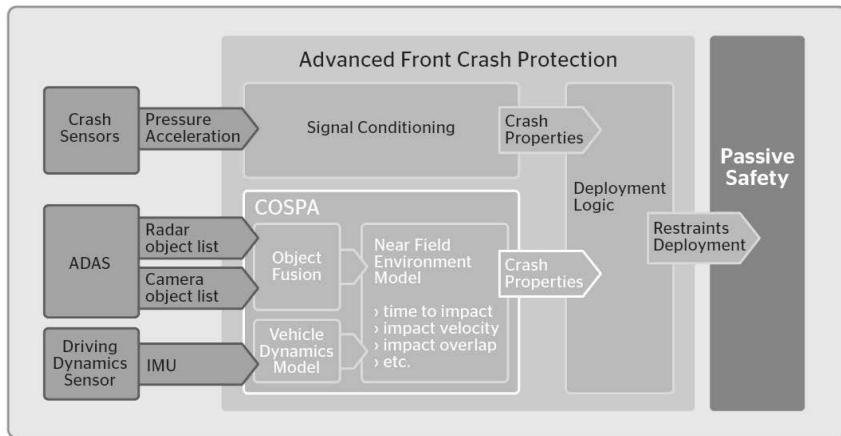


Fig. 6: The Continental Occupant Safety Preconditioning using ADAS (COSPA) integrates active and passive safety by predicting crash properties

Currently crash experts at Continental Safety Engineering (Alzenau) investigate new load cases and activation strategies based on sensor signals. Among the relevant questions is whether the 500 millisecond time gap between knowing about the inevitability of a crash and t_0 is enough to adjust the seat position of an occupant to bring it closer to a nominal position. One variable in this research is the swivel angle of the seats. More investigation is needed to decide whether the seat movement dynamics are acceptable for the occupant.

Another area of study is the question about the type of appropriate seat belt. Depending on the mix of restraint systems and strategies (bringing the seats to an optimal position before t_0 , belt tensioning, additional (small) airbag inflation to move objects out of the way), two-point, three-point, or four-point seat belts could be the answer for different vehicle categories.

To test appropriate targeted restraint system activation strategies for their real-world suitability, Continental has developed a new testing system, based on an inversion of the standard approach to crash testing: A **sensor cart**, which represents a vehicle front end and ensuing geometrical sensor array is accelerated on a guiding rope and approaches a pedestrian or genuine vehicle structure in a crash scenario. Instead of running into the person or object, the cart is slowed down with up to 4g by two elastic retaining ropes (Fig. 7, Fig. 8).

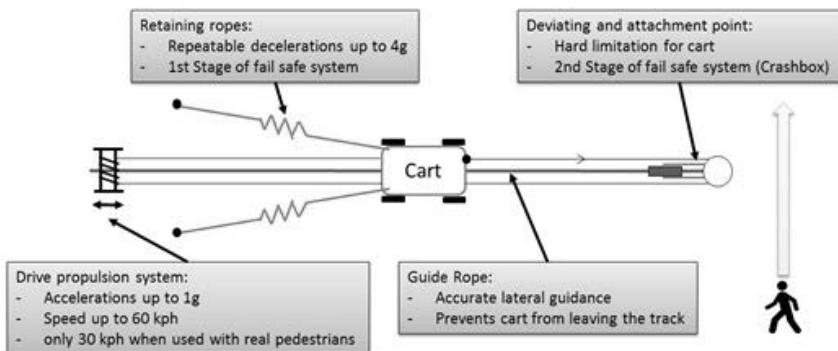


Fig. 7: Functional principle of the sensor cart



Fig. 8: The sensor cart represents a vehicle front end with geometrically correct sensor array

This inverted test procedures opens up a time gap that extends closer to t_0 because the higher deceleration rate of the sensor cart (up to 4g) provides the time span needed to observe the restraint system activations strategy computed close to t_0 – i.e. after the moment of the deploy/no-deploy decision. This helps to validate the reliability of object and crash recognition right up until the deploy/no-deploy decision. If a restraint system shall be activated prior to t_0 (to improve the level of protection), it is highly relevant to verify the correct decision-making throughout the complete SensePlanAct chain of events.

The sensor cart provides a new tool to investigate and evaluate reaction strategies und real-world conditions without any risk to people or test infrastructure. In the case the retaining ropes should fail, a deformation block provides a hard stop with crumple zone for the sensor cart. This reversal of the typical crash test roles (real car vs. dummy/balloon car) helps to avoid an unintended optimization towards test-specific boundary conditions. In relation to new interior concepts in AD vehicles the sensor cart is an element of testing the occupant preconditioning using ADAS sensors to provide the required time span for activating restraint systems before t_0 . One of the many aspects which need to be evaluated is the necessary level of trust in the sensor data and interpretation to avoid false negative decisions.

By using the sensor cart, a large number of potential real-world objects can be tested and measured. For instance, the geometry of the cart, its dynamics, and the test procedure as such will also permit to test a scenario in which an expected crash in fact turns into a narrow passing-by of an oncoming vehicle or object. This will help to develop new and more flexible occupant safety concepts for the future.

5. Innovative restraint systems

The triad of contributing factors to occupant safety (vehicle structure, connecting the occupant to the vehicle, absorbing occupant motion) will remain the same in an AD vehicle, however, the level of contribution of the individual elements will very likely change. It has already been mentioned that the contributions of airbags will need to grow. Bearing in mind the many optional positions an occupant may have in an AD vehicle, Continental is working on a new type of airbag which wraps around the occupant during the crash. **Fig. 9** shows a possible functional design of this “**Cocoon Seat**”. The two main airbags inflate around the occupant and the overlapping parts either lock into each other or are temporarily connected by another suitable measure. Currently several options are being reviewed for this purpose. Together with the seat and seat belt, this airbag concept will provide a 360° protection.

The Cocoon Seat expands the protection level of current airbag technology by offering cushioning on three sides (i.e. in addition to the seat itself) so that the person in the seat is protected in any spatial orientation. Thus a key challenge of future interior concepts is addressed without the need to bring an occupant back to a nominal position first, before the airbag(s) is/are activated. As the lead time before the crash is maximum a half second, the movement to bring a passenger back to a nominal position may require an unacceptable level of dynamics. Realistic lead times are even shorter. 360° airbag and seat protection can provide a solution to this.

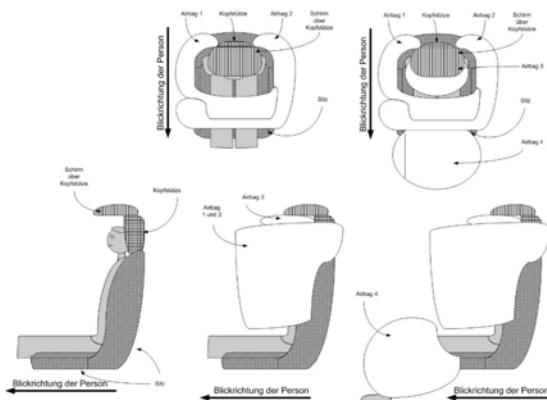


Fig. 9: The Cocoon Seat concept relies on four individual airbags which wrap around the occupant during the crash to provide protection in all directions

This new type of restraint system will be supported by novel inflators which improve the flexibility of gas flow control during a specific crash action. Based on the assumption that occupants will frequently be "OoP" in a future interior, the airbags may need to be larger (because there may be no structure near such as the windscreen for the airbag to rest upon) and may need to be inflated for a longer time to hold occupants in position and to absorb the impact of flying around objects. The greater demand for targeted and situation-specific airbag inflation (based on the data from the occupant model) places higher demands on the amount of and control over the gas flow from the inflators. This future need is addressed by the new type of inflator as an enabling technology for targeted restraint system activation.

To address the issue of shorter crumple zones in electrified AD vehicles in particular, the absorption of kinetic energy could also be shifted from the structure of the vehicle to the vehicle exterior: By inflating an outside airbag, a part of the impact can be absorbed within the airbag deformation path before the force reaches the vehicle structure (**Fig. 10**).



Fig. 10: Outside airbags can help to compensate the lack of crumple zones in electrified vehicles

6. Conclusions and recommendations

The triad of successful occupant protection (minimizing peak load via crumple zone or equivalent device, connecting the passenger to the vehicle, absorbing his/her motion) will continue to apply. However, future interior concepts will require new ways of making these proven principles effective under changing boundary conditions.

In the future the share of crash forces absorbed in the vehicle structure are likely to go down which puts a greater emphasis on the seat belts and airbags. The expected lack of crumple zones means that despite expected lower impact speeds (owed to ADAS and automated intervention), the acceleration of the occupants could remain unchanged or could even increase. The most likely answer to this challenge can be found in larger airbags with additional protection functions. Airbag, seat, and seat belt need to be coordinated in new ways for this purpose. Crash anticipation will play a pivotal role in preconditioning the occupant and activating restraint systems in a targeted way to accommodate for the future variability of seat positions

and occupant positions. To develop and test suitable elements of passive safety will be an important part of automated driving and electrification.

Concerning people movers it is currently not yet known, whether this class of AD vehicle will be treated as a bus and the passengers would therefore be exempt from the requirement to wear seat belts. While this could be option for low speed transport at, e.g., under 20 km/h, Continental is investigating protection measures for standing passengers as the lower vehicle mass of people movers will increase the occupant injury risk during a crash in comparison to a much larger conventional bus with higher kinetic energy and mass inertia.

The recently published Euro NCAP roadmap 2025 shows that an even greater number of ADAS functions will be tested in the future. However, unfortunately it is also quite obvious from the roadmap that the element of passive safety is still not being considered in an appropriate way for the future course of development [3]. In particular, there is no motivation to solve a core future challenge to testing passive safety: How to test new restraint systems - will it continue to make sense if radars sensors, e.g., are deactivated during in-door crash testing, even if the networking of active and passive safety will play an increasing role for occupant safety? In the light of an advancing active-passive safety integration this kind of "radar-less" testing appears outdated because it will no longer reflect the real-world safety performance of future cars. Occupants will travel much safer due to the integration of new sensors into passive safety, but this is not reflected in the EuroNCAP rating. It is to be hoped that this issue will finally be solved within the redesigned crash test strategy for new seat concepts which is scheduled for 2020.

References

- [1] Sivak, M., Brandon, S.: Road Safety with Self-Driving Vehicles: General Limitations and Road Sharing with Conventional Vehicles.

The University of Michigan Transportation Research Institute, report no UMTRI-2015-2

- [2] http://umich.edu/~umtriswt/PDF/UMTRI-2015-2_Abstract_English.pdf
(file downloaded on 7 September, 2017)

- [3] Euro NCAP 2025 Roadmap, published 12 September, 2017. Cf. p. 12-14
<https://cdn.euroncap.com/media/.../euroncap-roadmap2025.pdf>
(file downloaded on 19 September, 2017)

Potential future seating positions and the impact on injury risks in a Learning Intelligent Vehicle (LIV)

How to avoid submarining in a reclined seating position in a frontal crash

Martin Östling, Cecilia Sunnevång, Christian Svensson,
Autoliv Research, Vargada, Sweden;
Hans-Otto Kock, Autoliv North Germany

Abstract

Autoliv LIV concept car has been presented as a Learning Intelligent Vehicle. This concept car is evaluating how future car driving will be supervised by both the driver and the car. One of the features in LIV is to offer the driver a safe and comfort seating position. Future seat postures might be very different from this and will require exploring of new and innovative ways to protect the driver and the other occupants if they have chosen other positions, for example a working position, a relaxed position or a socializing position.

In this investigation, the relaxed position has been evaluated in sled testing using the THOR (Test device for Human Occupant Restraint) 50% dummy. With current restraint system, i.e. a 3-point shoulder belt with a retractor equipped with load limiter and a pyro pretensioner, an elevated risk that the occupant pelvis slide under the lap belt, so called submarining, was found. Different countermeasures were evaluated (modified seat belt geometries, double pyro pretensioners for the pelvis and modified seat pan properties by the installation of the pelvis restraint cushion, PRC). All examples of how lap belt interaction to the pelvis can be increased. It was found that all these countermeasures were effective to prevent submarining if combined in correct way.

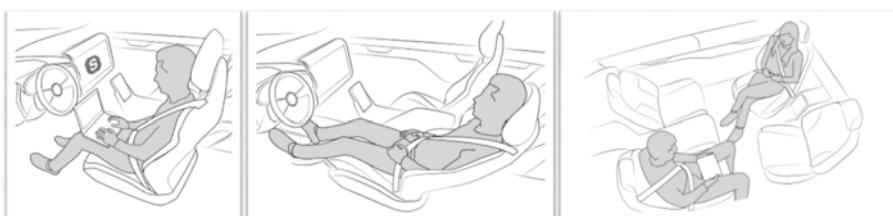


Fig. 1a: Working position

Fig. 1b: Relaxing position

Fig. 1c: socializing positions

1. Introduction

The automotive industry is facing a big challenge in the development of automated driving. In addition to sensor and software development automated driving will affect the interior compartment. When cars are highly automated and not primarily made for driving, secondary tasks will become important to understand. It is unknown how occupants will behave in automated driving mode in the future. However, people may want new seating positions more suitable for other things than driving. Typical activities might be working, relaxing and socializing, see Fig. 1a-1c. To adapt the vehicle interior and create comfortable and safe seating positions will be challenging. This is emphasised by NHTSA in the document Federal Automated Vehicles Policy from September 2016: "*HAV manufacturer and other entities should exercise and demonstrate due care to provide countermeasures that will fully protect all occupants given any planned seating or interior configurations*" [1] and in the document Automated driving systems 2.0: a vision for safety from September 2017: "*In addition to the seating configurations evaluated in current standards, entities are encouraged to evaluate and consider additional countermeasures*

that will protect all occupants in any alternative planned seating or interior configurations during use" [2]. This will most likely require development of new interior restraint systems. Some of the potential seating positions, e.g. the reclined backrest position is already possible in cars today. However, in the owner's manual, there are sometimes warnings to recline the backrest to much due to that this position is not evaluated in current legal and rating tests. A reclined backrest can result in a higher occupant risk for injury in case of a collision due to that the lap belt can slip of the pelvis and loads into the abdomen, so called submarining [3]. Submarining can result in injuries to lumbar spine and hollow organs of the lower digestive system [4-6].

Three specific parameters found in the literature [7] can explain the reasons of submarining:

1. The initial position of the occupant, e.g. slouched or reclined backrest.
2. The relative position between the lap-belt and the occupant, e.g. belt fit and position of the lap belt anchorages.
3. Type of restraint system and level of initial slack in belt system, e.g. pre-tensioning.

In addition to these three parameters, it is most likely that also the seat structure design and the level of leg/knee support, affect the risk for submarining.

From January 2015, Euro NCAP is assessing submarining using the 5th percentile HIII dummy for the front and rear passengers during a frontal full width crash test at 50km/h. Submarining is defined as "... when a 1kN drop in any of the two iliac forces measured is seen within 1 ms and when the submarining is confirmed on the high-speed film" [8].

Even if it is foreseen that automated vehicles will be involved in fewer crashes than manually driven vehicles, they will still crash. This, in combination with the need for new safe seating positions, give way for the development of new interior restraint concepts. In the future interiors, the seat belt system might not be installed in the B-pillar because the seat will have more degrees of freedom such as longer longitudinal translation, rotation and reclining of backrest. To allow for new flexible positions one option is to move the seat belt from the B-pillar to the seat, so called belt in seat installation. The airbag must in an equivalent way also follow the occupant and might no longer be fixed in the steering wheel or in the dashboard.

Autoliv's concept LIV, the learning intelligent vehicle [9] is focusing on safe driving, regardless of level of automation and based on research on driver experience with automation [10-11]. Focusing on safety means building shared control, enhancing the usage of existing active safety features, developing new functions and improving the passive safety. The vehicle needs to be clear about its capabilities to protect the occupants of the vehicle regardless if the car is manually driven or in automated mode. In the current version of LIV, seating is still traditional but the car is capable of approximating your size to set up your seat in a comfort and safe position. When new seating positions will be introduced there is a need for LIV to also consider these regarding comfort and safety.

The first step in the development toward future seating positions is to bring the relaxed position to a safe position, i.e. avoid submarining. Therefore, the aim of this study was to investigate the reclined backrest position and evaluate countermeasures for submarining using the advance crash test dummy THOR.

2. Method

2.1 Sled test set-up and dummy positions

Tests were run with the THOR dummy in a rigid sled environment with a seat and B-pillar installed retractor without dashboard and airbag, see Fig 2a-d. THOR was used instead of the HIII due to that HIII dummy is not capable of predicting submarining as biofidelic as THOR [12] and because of that THOR will be used in future NCAP testing [13-14]. The seat was positioned in lowest mid position according to FMVSS 208. For the upright position, a torso angle of 25° with H-point machine resulted in a backrest angle of 23° to the vertical plane. For the reclined position, the backrest was folded additionally 25° giving a backrest angle of 48° to the vertical plane. The THOR spine box was at the +9° slouched position for all tests. Head angle was -3° / 26°, chest angle 23°/47° and pelvis angle 38°/52° for upright and reclined respectively. The

H-point of THOR was kept the same in all test. A 45°-foot rest with ETHA foam 220 was used for the feet in combination with a webbing to avoid the feet sliding of the foot rest.

The baseline belt system was a retractor with 4 kN load limiter which was equipped with a pyro pre-tension and a crash locking tongue, CLT. The CLT function locks the belt slip between lap and diagonal parts and thereby keep belt forces in the diagonal belt and lap belt separated.

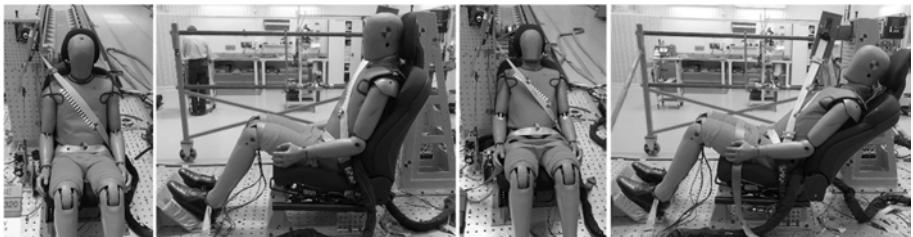


Fig. 2a: Front view upright position, Fig. 2b: Side view upright position,

Fig. 2c: Front view reclined position, Fig. 2d: Side view reclined position

2.2 Description of the tests

Seven tests were performed whereof the first two test was performed with a 25mph full frontal pulse and the following five tests with a 30mph pulse full frontal pulse, see Fig 3a.

First test was run in reclined backrest position with the baseline seat belt system. In the second test, an anchor point pre-tensioner was added. The objective with the first two tests were to demonstrate submarining in the reclined position, this included a risk of damaging the dummy and that's why the 25mph pulse were used. In the third test, a buckle pre-tensioner was added to the belt system and the lap belt geometry was changed. Both the buckle and the lap belt anchorage point was moved forward 55mm and 100mm respectively, see Fig 4a and Fig 4b. In the fourth test, a seat pan mounted airbag, a so-called pelvis restraint cushion, PRC, see Fig 3b, in combination with double pre-tension for the pelvis in original buckle and anchor positions was evaluated. The baseline, the third and the fourth test combinations were repeated in the upright position, test five to seven, see Table 1 for overview of all test combinations.

In all tests, the retractor pre-tensioner was activated at 9 ms. In tests with anchor points pre-tensioner, which in these tests was an extra retractor with no load limiter, the pre-tensioner was activated at the same time as the retractor pre-tensioner. The buckle pre-tensioner was activated at 1 ms to achieve full stroke of the buckle pre-tensioner before the two other pre-tensioners were activated. Finally, in the tests with PRC, the PRC was activated at 14 ms to

not disturb the pre-tensioning of the two retractor. In the tests with the PRC the seat was reinforced to resist the extra force from the loading from the airbag.

Table 1: Test matrix and trigger times

#	Test position	Restraint system	Pulse	Trig time [ms]			
				Retractor PT	Anchor PT	Buckle PT	PRC
1	Reclined position	Base line seat belt system	25 mph	9	N/A	N/A	N/A
2	Reclined position	Added anchor point pre-tensioning	25 mph	9	9	N/A	N/A
3	Reclined position	Added anchor point pre-tensioner positioned 100 mm forward and a buckle pre-tensioner 55mm forward of normal buckle position	30 mph	9	9	1	N/A
4	Reclined position	PRC + diagonal belt, anchor point and buckle pre-tensioning	30 mph	9	9	1	14
5	Upright position	Base line seat belt system	30 mph	9	N/A	N/A	N/A
6	Upright position	Added anchor point pre-tensioner positioned 100 mm forward and a buckle pre-tensioner 55mm forward of normal buckle position	30 mph	9	9	1	N/A
7	Upright position	PRC + diagonal belt, anchor point and buckle pre-tensioning	30 mph	9	9	1	14

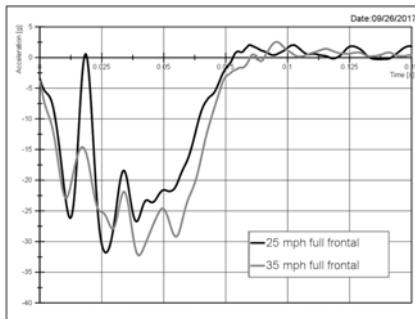


Fig. 3a: Full frontal pulses 25 mph and 30 mph



Fig 3b: Pelvis restraint cushion installation

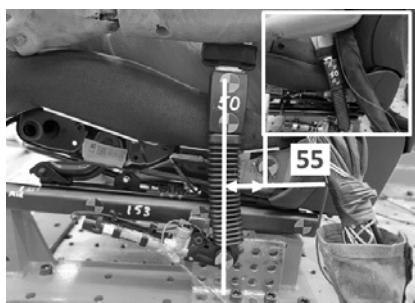
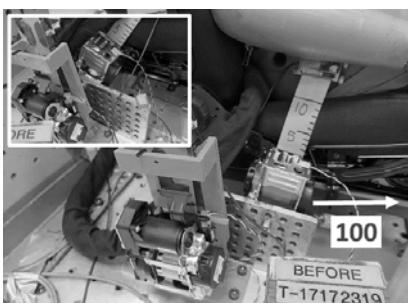


Fig. 4a: Buckle pre-tensioner in a forward position, Fig. 4b, Anchor point pre-tensioner in a forward position



2.2 Measurements

Four high speed cameras were used to get detailed view of the belt interaction with pelvis as well as overall THOR kinematics see Fig. 5a-d. Measurement focus with THOR was the left and right iliac load cells also called, Anterior Superior Iliac Spine (ASIS) load cells. These load cells, see Fig 6a and Fig.6b, gives a negative force when loaded and if the load was applied above the middle line it gives a positive moment, and a load below the middle line gives a negative moment. Submarining could be detected if the negative force drops and if the high-speed films also showed that the lap belt slipped off the iliac wing. Analysing the moments, it was also possible to understand if a submarining was close, i.e. positive iliac wing moment because the loading was applied on the upper part of the sensor.



Fig. 5a: Side view

Fig. 5b: Side view

Fig. 5c: Front view

Fig. 5d: Detailed front view

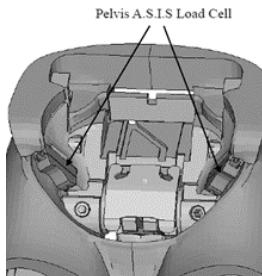


Fig. 6a: Pelvis iliac wing

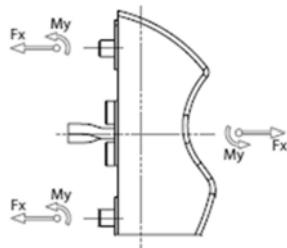


Fig. 6b: Load cell geometry

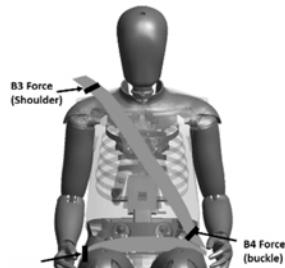


Fig. 6c Belt forces

In addition to submarining, head acceleration, upper neck forces, chest deflection and thoracic spine load cells was part of the analysis together with analysis of belt pay in by the pre-tensioners and seat belt forces B3, B4 and B6 defined in Fig 6c.

3. Result

3.1 Reclined backrest

The first test was with the baseline seat belt system, i.e. retractor pre-tensioner only which pulled in 100 mm. Overview of all pre-tensioner measurements is listed in table 2. When the dummy moved forward the webbing slipped over iliac wing into abdomen. Iliac wing forces dropped at about 40 – 50 ms for both sides and a corresponding drop was seen in the belt force, see black curves in Fig. 7a and b. In the second test, with additional lap pre-tensioner test, the retractor pulled in 30 mm and the lap belt pre-tensioner pulled in approximately 120 mm, so in total 50 mm more webbing was pulled in compared to the first test. Due to the extra pull in, the lap belt force built up faster and so did the iliac wing forces, see grey curves in Fig. 7a and Fig. 7b. There was still a slip over the iliac wing at about 50 ms and a drop in belt force.

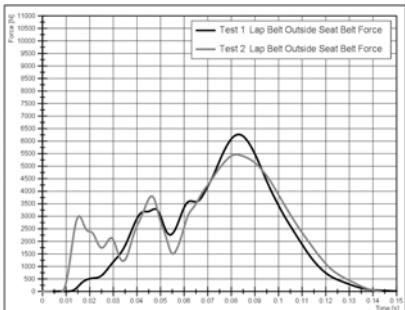


Fig. 7a: B6 force in test 1-2

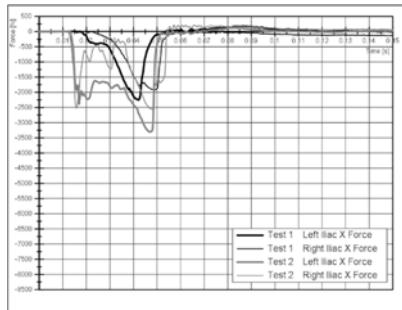


Fig. 7b: Iliac wing load cells in test 1-2

In the third test, a buckle pre-tensioner was added to the belt system and the lap belt geometry was changed. In this test, a negative pull in, i.e. a pull out of the retractor of 24 mm was recorded due to that the buckle pre-tension 50 mm and the lap belt pre-tensioner pulled in 100mm. This generated a total pull in of approximately 180 mm, the buckle pulls in both part of the belt and was then counted twice. The forward moved lap belt geometry placed the belt in front of the iliac wings before the force built up. This was showed in Fig 8b, i.e. force built up of light grey curve at approximately 30 ms later compared to test one and two even if the B6 force was built up in equivalent way as test two, light grey curve in Fig. 8a. In test three there was no submarining so the iliac wing forces was approximately 5 kN and B6 rise to 9 kN compared to test one and two where B6 force were about 6 kN.

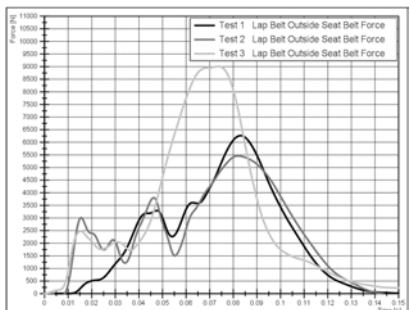


Fig. 8a: B6 forces in test 1-3

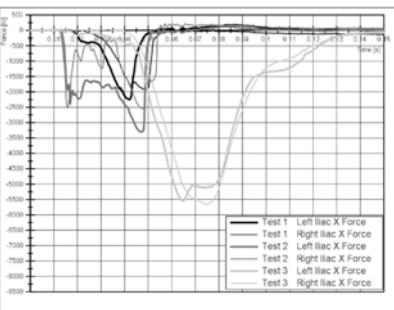


Fig. 8b: Iliac wing load cells in test 1-3

Fig. 9 and 10 shows the dummy kinematics in test one and test three with submarining in test one and no submarining in test three.

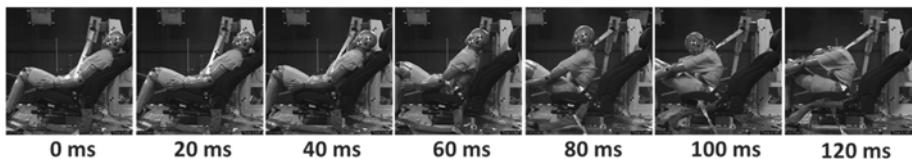


Fig. 9 Kinematic overview of test 1 with submarining

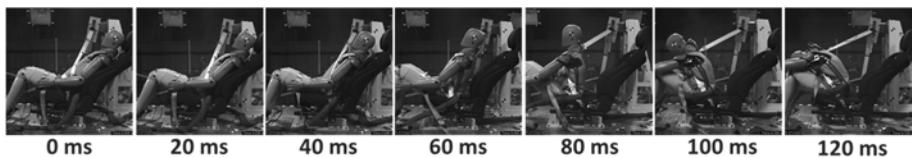


Fig. 10 Kinematic overview of test 3 without submarining

In the fourth test, with a PRC, buckle pre-tensioner and lap belt pre-tensioners in original positions, the pull in was similar to the third test, i.e. a negative pull in of the retractor of 33 mm and the buckle pre-tension 50 mm and the lap belt pre-tensioner pulled in 100mm. The iliac wing forces built up earlier compared to test three, see grey curves compared to black curves in Fig 11b. Additionally the PRC unloaded the lap belt by faster coupling to the seat structure, which was seen in that the belt curve (grey curve in Fig 11a) built up earlier and had a lower maximum level, 8 kN, compared to the black curve, test without the PRC which reach 9 kN. In this test, there was no submarining and due to the coupling to seat structure and lower B6 force also the iliac wing forces were less compared to test three.

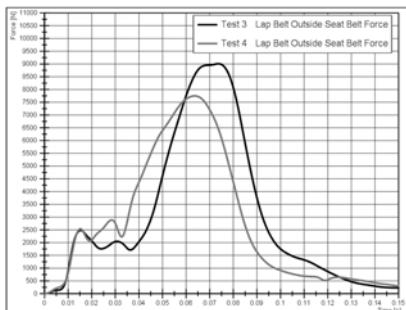


Fig. 11a: B6 forces in test 3-4

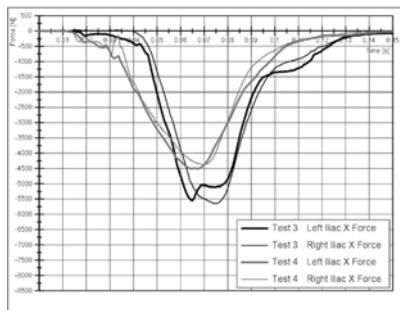


Fig. 11b: Iliac wing load cells in test 3-4

3.2 Upright backrest

The fifth test was a reference test with the backrest in a normal position with baseline belt system. The retractor pre-tensioner pulled in 94 mm and the B6 force reached 10 kN and Iliac wing forces 6 kN and 7.5 kN, black curves in Fig 12a and b. In the sixth test, the third test was repeated but with the backrest in normal position. The pull in from the pre-tensioner was similar to test three with a pull out of the retractor of 27 mm, buckle stroke of 50 mm and lap belt pre-tensioner of 90 mm. Similar to the reclined test the B6 force built up early but because of the forward positioned anchor points the Iliac wing force built up later, see grey curves in Fig. 12a and b.

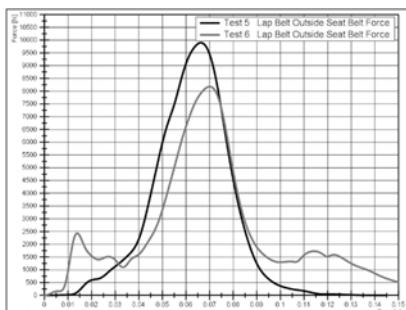


Fig. 12a: B6 forces in test 5-6

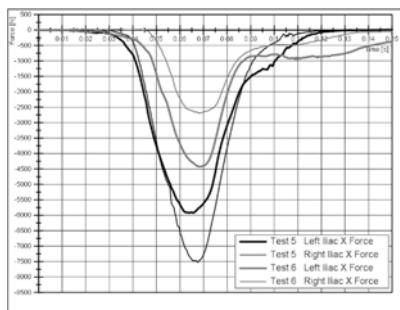


Fig. 12b: Iliac wing load cells in test 5-6

In the seventh test, PRC together with double pelvis pre-tensioning was tested, i.e. a repetition of test four but with an upright backrest. Here the retractor pull in again was negative, i.e. a pull out of 19 mm, the buckle stroke 50 mm and the lap belt retractor pull in 70 mm. The pull in from the pre-tensioner was slightly different in this test due to that the PRC seemed to affect

the lap belt retractor. Similar effect to the B6 and Iliac wing forces as in test four was observed i.e. faster built up of B6 due to original anchor points compared to test six, and lower levels of both B6 and iliac wing due to the PRC was able to couple the pelvis to the seat structure, see light grey curves in Fig 13a and b.

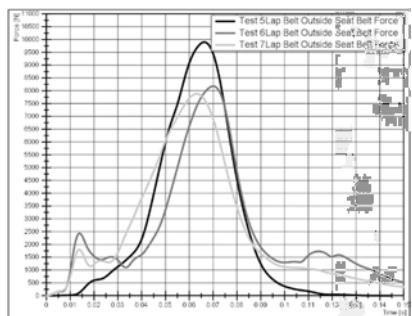


Fig. 13a: B6 forces in test 5-7

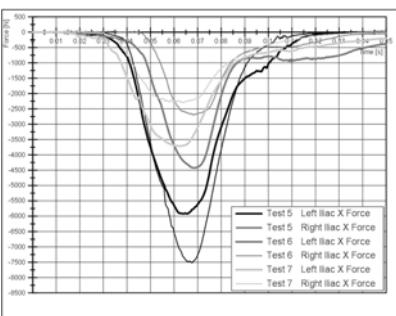


Fig. 13b: Iliac wing load cells in test 5-7

Table 2: Summary of all pre-tensioners pull-in and pull out

#	Test position	Restraint system	Pull in [mm]			
			Retractor PT	Anchor PT	Buckle PT	Total
1	Reclined position	Base line seat belt system	100	N/A	N/A	100
2	Reclined position	Added anchor point pre-tensioning	30	120	N/A	150
3	Reclined position	Added anchor point pre-tensioner positioned 100 mm forward and a buckle pre-tensioner 55mm forward of normal buckle position	-24	100	50	176
4	Reclined position	PRC + diagonal belt, anchor point and buckle pre-tensioning	-33	100	50	167
5	Upright position	Base line seat belt system	94	N/A	N/A	94
6	Upright position	Added anchor point pre-tensioner positioned 100 mm forward and a buckle pre-tensioner 55mm forward of normal buckle position	-27	90	50	163
7	Upright position	PRC + diagonal belt, anchor point and buckle pre-tensioning	-19	70	50	151

3.3 Reclined vs Upright backrests

Beside the risk for submarining, overall occupant kinematics in general but also chest deflection, spine compression, neck tension and compression and head acceleration was recorded, see appendix for values. The tests were performed without dashboard and passenger airbag resulting in high lap belt forces due to no unloading of the pelvis from the knee to dashboard contact. The absences of the airbag also gave way for long head excursion and in all tests the head contacted the knees at approximately 110 ms, see Fig 9 and 10. Due to the head to knees impact, HIC values varied a lot in the tests. Regarding forces to lower spine there were slightly higher compression values in the reclined position and in the test with PRC but these were still within acceptable levels found in the literature [15-18]. The belt

interaction with the chest was somewhat different when comparing the reclined and the upright tests, see Fig. 14 a and b. In the reclined tests, the belt tended to come closer to the neck and hence loaded the chest in a different way. Although maximum chest deflections were similar the kinematics tells there was a difference.

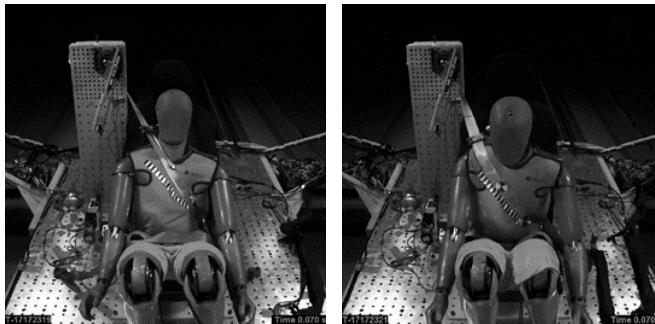


Fig. 14a: Belt interaction with chest at 70 ms, reclined position

Fig. 14b Belt interaction with chest at 70 ms, upright position

4. Discussion

The first step in the Autoliv LIV concept is to automatically adjust the driver seat to a safe position based on the occupant stature. With a more flexible installation of the seat belt this could be extended to also ensuring a safe and comfortable belt routing and during automated driving mode also offer a reclined backrest position for the driver to relax. As demonstrated with the sled tests in this study, the risk of submarining increased as the backrest was reclined. Allowing occupants to be in a relaxed position during automated driving will have implications on current restraint systems to ensure a low risk of injury.

For the baseline belt system submarining occurred in the reclined position although a lower impact speed. Introducing anchor point pre-tensioning did not restrain the pelvis enough. However, combining anchor point pre-tensioning with a pelvis restraint cushion, PRC, prevented submarining even at a higher impact speed. It was also seen that the lap belt force was reduced due to the coupling to the seat structure. The PRC is a product available already today as standard equipment in some vehicles. Previous studies have shown that when evaluated using female PMHS restrained by a 3-point belt, the PRC reduced the forward motion of the pelvis and by that reducing the risk of submarining injuries [19]. The result of this study is in line what was observed in the PMHS tests.

Combining the anchor pre-tensioning with a buckle pretensioner in a different geometry, by moving the lap belt attachment point forward, also prevented submarining. However, moving the attachment points of the belt will require an update of legal requirements.

Three pre-tensioners were used in all the tests where submarining was avoided providing a total pre-tensioning travel, i.e. slack reduction, of up to 180 mm. To achieve this the buckle pretensioner was activated at 1 ms which might be un-realistic in a real crash. More investigations are needed to get the best strategy for belt pre-tensioner. It should also be noted that adding pre-tensioners increase the belt forces developed during pre-tensioning and this may also increase the risk of abdominal injuries to the vehicle occupant [20].

Restraining the pelvis and prevent submarining is the first task when investigating alternative seating positions. Thereafter injury risk to head, neck and chest needs to be assessed also incorporating airbags. With a longer distance from the frontal airbag and different impact angles new designs of airbags and belts could be needed, such as roof mounted airbags, belt bag or four point seatbelts. It was also noted in the tests with the reclined position that the belt tends to come closer to the neck and thereby loading the chest in a different way. Here a belt in seat installation would guarantee similar belt routing independent of seat position. In the Autoliv LIV vehicle the internal sensors can be used to personalize the restraint allowing a higher degree of adaptive belt routing, load limiters and airbags.

In this study THOR was used for evaluation of occupant kinematics and submarining. To capture individual differences and ensure robust design for a diverse population in a variety of seating positions human body modelling will be needed.

5. Conclusion

With the seat and the restraint system as today there is an elevated risk for submarining in the relaxed position. Reposition the anchor point forward, and introduce double pelvis pre-tensioning, i.e. buckle and lap pre-tensioners can solve the problem. Adding a PRC and introduce double pelvis pre-tensioning can also solve the problem.

6. References

- [1] The U.S. Department of Transportation's: Federal Automated Vehicles Policy: September 2016. <https://www.transportation.gov/AV/federal-automated-vehicles-policy-september-2016>
- [2] The U.S. Department of Transportation's: Automated driving systems 2.0 a vision for safety, September 2017. https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/13069a-ads2.0_090617_v9a_tag.pdf
- [3] Luet C., Trosseille X., Drazetic P., Potier P., Vallancien G.: Kinematics and dynamics of the pelvis in the process of submarining using PMHS sled tests. *Stapp Car Crash Journal*, 2012, Vol. 56: pp. 411-442
- [4] Leung YC, Hureau J, Patel A, Guillon F, Got C, Lestrelin D, Tarriere C.: Submarining Injuries of 3 Pt Belted Occupants in Frontal Collisions -Description, Mechanism and Protection. *Stapp Car Crash Conference Proc.* 1982; Paper 821158.
- [5] Lamielle, S., Cuny, S., Foret-Bruno, J.Y., Petit, P., Vezin, P., Verriest, J.P., Guillemot, H.: Abdominal injury patterns in real frontal crashes: influence of crash conditions, occupant seat and restraint systems, *Annu Proc Assoc Adv Automot Med*, 50, 2006, p103-118.
- [6] Poplin, G.S., Timothy L. McMurry, T.L, Forman, J.L, Hartka, T., Park, G., Shaw, G., Jangho Shin, J., Kim, H.J., Crandall, J.: Nature and etiology of hollow-organ abdominal injuries in frontal Crashes. *2015, Accident Analysis and Prevention* 78, 51–57.
- [7] Richard O., Uriot J., Trosseille X., Sokolowski M.: Occupant restraint optimisation in frontal crash to mitigate the risk of submarining in out-of-position situation, *IRCobi Conference 2015 Lyon, France*.
- [8] Euro NCAP Assessment protocol – Adult occupant protection Version 7.0.3, November 2015, <https://www.euroncap.com/en/for-engineers/protocols/adult-occupant-protection/>
- [9] Autoliv white paper: Driving with LIV 1.0, 2016
- [10] Larsson, A.F.L.: Driver usage and understanding of adaptive cruise control. *Applied Ergonomics*, 43(3):501–506 2012.
- [11] Strand, N., Nilsson, J., Karlsson, I. C. M., & Nilsson, L.: Interaction with and use of driver assistance systems: A study of end-user experiences, In 18th World Congress on Intelligent Transport Systems (pp. 1–12), 2011.
- [12] Uriot J., et al.: Comparison of HII, HIII and THOR dummy responses with respect to PMHS sled tests. *Proceedings of IRCobi Conference, 2015, Lyon France*.

- [13] Euro NCAP, 2015: 2020 Roadmap European New Car Assessment Programme.
- [14] National Highway Traffic Safety Administration: New Car Assessment Program; Request for comments; [Docket No. NHTSA-2015-0119]. 2017
- [15] Yoganandan N., Myklebust J.B., Wilson C.R., Cusick J.F., Sances A.: Functional biomechanics of the thoracolumbar vertebral cortex., Clinical Biomechanics, Vol.3, p.11-18, 1988.
- [16] Myers B.S., Arbogast K.B., Lobaugh B., Harper K.D., Richardson W.J., Drezner M.K.: Improved assessment of lumbar vertebral body strength using supine lateral dual-energy X-ray absorptiometry., Journal of bone and mineral research; Vol.9, n5, pp687-693, 1994.
- [17] Brinckmann P., Biggemann M., Hilweg D.: Prediction of the compressive strength of human lumbar vertebrae, Clinical Biomechanics, pp.1-27, 1989.
- [18] Baudrit P; Potier P; Petit P; Trosseille X; Vallancien G.: Cadaver and Dummy Investigation of Injury Risk with Anti-Sliding System in Case of Static Deployment, Proc. of the 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, 2005; Washington DC The US.
- [19] Shaw, G., Lessley, D., Ash, J., Acosta, S., Heltzel, S., Riley, P., Kim, T., Crandall, J.: Pelvic Restraint Cushion Sled Test Evaluation of Pelvic Forward Motion. Center for Applied Biomechanics, University of Virginia, USA. Submitted to Traffic Injury Prevention in 2016.
- [20] Untaroiu C., Bose D., Lu Y.C., Riley P., Lessley D., Sochor M.: Abdominal and thoracic response to loading of pretensioner restraint systems. Proceedings of IRCOBI Conference, 2011, Krakow, Poland

A1. Recorded injury values

Table A1: Injury values for test 1-7

#	HIC ₁₅	BrIC	Chest deflection Resultant				Iliac wing [kN]		Upper neck F _z [kN]		Spine force [kN]	
			UL	LL	UR	LR	Left	Right	Compression	Tension	Compression	Tension
1	440	1,1	N/A	N/A	N/A	N/A	2,2	1,9	0,7	2,6	1,5	6,4
2	476	1,0	N/A	N/A	N/A	N/A	3,3	2,6	1,1	2,7	2,3	8,8
3	2811	1,0	44,6	31,3	44,2	23,2	5,5	5,6	0,5	2,9	2,3	2,7
4	592	N/A	39,8	24,8	48,2	24,7	4,5	4,4	0,6	2,9	2,9	3,4
5	2850	0,9	49,9	38,7	32,7	21,4	5,9	7,5	0,2	2,4	0,4	3,0
6	537	0,8	45,6	36,4	28,0	8,1	4,4	2,7	0,2	2,4	1,1	1,7
7	256	N/A	41,8	29,2	33,6	15,0	3,7	2,3	0,4	1,9	2,0	2,1

Kognitionspsychologische Erkenntnisse zum hochautomatisierten Fahren – eine Übersicht

Dr. Stefan Brandenburg, M. Sc. Fabienne Roche,
Prof. Dr. Manfred Thüring, TU Berlin

Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten ermöglichten neue technische Errungenschaften einen Entwicklungsschub hochautomatisierter Fahrzeuge, so dass diese in mittelbarer Zukunft zunehmend Teilnehmer im Verkehrsgeschehen werden. Die Aussicht auf die baldige Verbreitung dieser Fahrzeuge führte zu einem starken Anstieg psychologischer Forschung zum menschlichen Faktor und seiner Aktionen und Reaktionen im Mensch-Maschine-System. Der vorliegende Beitrag fasst die Forschungsergebnisse der letzten fünf Jahre zusammen, zeigt Schwerpunkte auf und leitet den zukünftigen Forschungsbedarf ab.

Abstract

The technical evolution of the past decades facilitated the development of highly automated vehicles. Accordingly, psychologists increased their efforts to investigate the effects of highly automated cars on driver perception, behaviour and experience. This article summarizes selected psychological studies on highly automated driving (SAE level 3) of the past five years. It provides an overview of important research and future challenges in the domain of highly automated driving and highlights research topics and blind spots.

1. Hochautomatisiertes Fahren – eine Vision mit Geschichte

“Von allen Fertigkeiten, die unsere heutige Zivilisation verlangt, ist die des Autofahrens sicherlich die wichtigste für den Einzelnen, zumindest in dem Sinne, als dass deren Beeinträchtigung die größte Bedrohung für sein Leben darstellt.”¹ Mit dieser Betonung der Fahrfähigkeit beginnt die wohl erste umfassende psychologische Betrachtung der Fahraufgabe von Gibson und Crooks aus dem Jahr 1938 [1]. Ihre Analyse der Anforderungen, die Fahrer bewältigen

¹ Übersetzung von ([1] p. 453): “Of all the skills demanded by contemporary civilization, the one of driving an automobile is certainly the most important to the individual, in the sense at least that a defect in it is the greatest threat to his life.”

müssen, um ein Fahrzeug sicher zu führen, hat bis heute nichts an Aktualität verloren. Allerdings ahnten die beiden Autoren damals noch nicht, dass eine Zeit kommen würde, in der das Fahrzeug die Fahraufgabe übernimmt und die damit verbundenen Anforderungen bewältigen muss. Diese Fahrzeuge werden als „automatisiert“ bezeichnet, wobei zwischen verschiedenen Graden der Automation unterschieden wird. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) legte eine Unterteilung in „keine Automation“, „Fahrassistenz“, „Teil-“, „Hoch-“ und „Vollautomatisierung“ fest [2]. Die Fahrassistenz ist die bisher wohl bekannteste Ausprägung der Automation, bei der die Quer- oder die Längsführung unterstützt wird, z. B. per Adaptive Cruise Control (ACC). Im Vergleich zur Fahrassistenz geht die Teilautomatisierung einen Schritt weiter und übernimmt die Steuerung in Quer- und Längsrichtung für einen gewissen Zeitraum, wobei der Fahrer die Fahrzeugführung überwacht. Bei der Hochautomatisierung entfällt diese dauerhafte Überwachung, da das Fahrzeug selber seine Grenzen erkennt und den Fahrer zur Übernahme auffordert, wenn diese erreicht werden. Ist das System darüber hinaus in der Lage bei ausbleibender Übernahme durch den Fahrer das Fahrzeug „in den risikominimalen Systemzustand zurückzuführen“ ([2], p.1), spricht man von einer Vollautomatisierung.

Derzeit werden umfangreiche Ressourcen in die Erforschung und Entwicklung hochautomatisierter Fahrzeuge investiert. Größere Aufmerksamkeit erhielt die Vision des autonomen Fahrzeugs allerdings bereits 1956, als Energieversorger in den USA Werbung mit der Idee elektrisch gesteuerter Fahrzeuge und den damit verbundenen Freiheiten der Fahrer machten. Der GM Firebird II wurde im gleichen Jahr als serienreifes Fahrzeug vorgestellt, das in die Fahrbahn eingelassene Induktionsschleifen erkennen und ihnen ohne Zutun des Fahrers folgen konnte [3]. Der nächste große Entwicklungsschritt ermöglichte den Fahrzeugen dann Mitte der 80'er Jahre die Wahrnehmung ihrer Umwelt und löste sie damit von fest verbauten Infrastrukturkomponenten. Seit 1995 gibt es immer wieder Fahrzeuge, die viele Kilometer mit mehr oder weniger Unterstützung zurücklegen. Erste teilautomatisierte Funktionen (z. B. Tempomat, ABS) schafften während dieser Zeit den Sprung in die Serienproduktion. Neuerungen in der günstig verfügbaren Hard- und Software sowie politische Entscheidungen, wie die Erweiterung des Paragraphen 8 der Wiener Konvention [4] und die Beschlussempfehlung des deutschen Bundestages [5], führten nochmals zu stärkeren Anstrengungen bezüglich der Entwicklung hochautomatisierter Fahrzeuge. Die umfassende Einführung derartiger Autos wird für das Jahr 2020 prognostiziert (z. B. [6], [7]).

Parallel zur technischen Entwicklung war die menschliche Komponente des Fahrer-Fahrzeug-Systems immer wieder Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Mit der näherkommenden Einführung hochautomatisierter Fahrzeuge in den Massenmarkt wurden auch hier die Forschungsbemühungen intensiviert. Insbesondere in den letzten fünf Jahren war ein deutlicher Anstieg themenrelevanter psychologischer Studien zu erkennen. Der vorliegende Beitrag fasst die psychologischen Erkenntnisse dieser Studien zusammen, arbeitet aktuelle Forschungsschwerpunkte heraus und deckt neuen Forschungsbedarf auf. Er bezieht sich dabei explizit auf experimentelle Arbeiten zur Stufe vier des hochautomatisierten Fahrens nach der BASt-Definition (vgl.[2] Stufe 3 der SAE Norm [8]), die in den letzten fünf Jahren veröffentlicht wurden.

Die Fahraufgabe, die sich beim hochautomatisierten Fahren stellt, ist vor allem dadurch gekennzeichnet, dass jederzeit die Fahrzeugführung vom Fahrzeug auf den Fahrer und umgekehrt wechseln kann. Die möglichen Wechsel, die mit den beiden Fahrmodi „manuell“ und „automatisiert“ verbunden sind, unterteilt die Fahraufgabe in vier Abschnitte (vgl. Abbildung 1). Im manuellen Modus (Abschnitt M) obliegt dem Fahrer die Fahrzeugführung, wobei er in der Regel durch einige Assistenzsysteme unterstützt wird. Im hochautomatisierten Modus (Abschnitt H) reguliert das Fahrzeug die Quer- und Längsführung selbstständig für eine spezifische Situation (vgl. [2]). Der Fahrer muss das System dabei nicht dauerhaft überwachen, sondern ist prinzipiell frei, sich anderen Tätigkeiten zu widmen. Eine hochautomatisierte Fahrt kann entweder im manuellen oder im automatisierten Modus starten. Beginnt die Fahrt manuell, kann der Fahrer die Fahrzeugkontrolle an das Fahrzeug übergeben, wann immer er möchte und die Verkehrssituation es zulässt. In diesem Fall sprechen wir von einer „Übergabe“ (Abschnitt g in Abb. 1) im Unterschied zu einer „Übernahme“ (Abschnitt n in Abb. 1). Bei der Übernahme sind zwei Fälle zu unterscheiden. Zum einen kann der Fahrer selber sich dazu entschließen, wieder aktiv zu werden. Zum anderen kann das Fahrzeug ihn dazu auffordern, weil hierfür ein konkreter Anlass besteht. Übergaben und Übernahmen können während einer mehrfach auftreten und einander abwechseln. Wie sich im Folgenden zeigen wird, gibt es zu jedem der vier in Abbildung 1 gezeigten Abschnitte wichtige Forschungsfragen und schon erste empirische Befunde.



Bild 1: Mögliche Fahrmodi und Wechsel bei einer hochautomatisierten Fahrt

2. Manuelle Fahrt und Übergabe der Fahrzeugkontrolle an die Automation

Zum manuellen Fahren vor einer **Übergabe** der Fahrzeugkontrolle (Abschnitt M) wurde im Kontext hochautomatisierter Fahrzeuge bisher kaum geforscht - wahrscheinlich deswegen, weil sich hier die Fahraufgabe nicht von der unterscheidet, die auch bei der Führung eines nicht automatisierten Fahrzeugs zu bewältigen ist. Die Forschung konzentriert sich vielmehr darauf, wie sich das manuelle Fahren nach einer **Übernahme** (Abschnitt g, Kapitel 4) gestaltet. Für Übergaben ist allerdings zu klären, was Fahrer dazu veranlasst – oder auch davon abhängt – die Fahrzeugführung zu delegieren und wie die Übergabe gestaltet werden kann. In diesem Kontext gilt es zwei Forschungsfragen zu beantworten:

Zum ersten stellt sich die Frage, inwieweit die Technik bei den Nutzern auf Akzeptanz stößt. Akzeptanz von Technik setzt sich aus der wahrgenommenen Nützlichkeit und der Nutzer-freundlichkeit des hochautomatisierten Systems zusammen [9]. In Bezug auf hochautomatisiertes Fahren handelt es sich dabei hauptsächlich noch um eine *a priori* Akzeptanz, also die Bewertung bevor eine Interaktion mit dem System stattgefunden hat [10]. So ist einerseits denkbar, dass Nutzer hochautomatisiertes Fahren als Bereicherung und Sicherheitsgewinn bewerten. Andererseits könnte es auch als Bedrohung des Fahrspäßes oder als zu kompliziert wahrgenommen werden. Zur *a priori* Akzeptanz wurden Umfragen durchgeführt, die die Bereitschaft von Fahrern erfassten, hochautomatisierte Fahrzeuge überhaupt zu nutzen [10], [11]. Payre et al. ermittelten bei 68% der Befragten eine Akzeptanz von vollautomatisierten Fahrzeugen und eine Bereitschaft im Mittel über 1.500€ mehr dafür zu zahlen [10]. Von den knapp 5.000 Befragten bei Kyriakidis et al. [11] wurde hingegen manuelles Fahren im Vergleich zu Teil-, Hoch- und Vollautomatisierung als am reizvollsten bewertet. Außerdem waren 22% der Befragten nicht bereit, mehr für ein vollautomatisiertes Fahrzeug zu zahlen. Lediglich

5% würden mehr als \$30.000 dafür investieren. Wie die Ergebnisse der Umfragen zeigen, ist die a priori Akzeptanz hochautomatisierter Fahrzeuge noch nicht besonders hoch ausgeprägt.

Zum zweiten ist zu fragen, wieweit das fahrerseitige Verständnis der Leistungsfähigkeit, der Einsatzbereiche und der Systemgrenzen hochautomatisierter Fahrfunktionen ausreicht, um diese sinnvoll zu einzusetzen. Das Verständnis nimmt Einfluss darauf, inwieweit Fahrer die hochautomatisierten Systeme korrekt nutzen und sich die anvisierten Sicherheitspotentiale der Technologie realisieren lassen. Die BASt-Definition legt fest, dass das hochautomatisierte System die Fahrzeugführung nur in spezifischen Situationen übernimmt [2]. Von potentiellen Nutzern präferierte Anwendungsfälle sind Einparken, Stau- oder Autobahnfahrten [10]. Eine Nutzung der Technologie außerhalb dieser spezifischen Situationen könnte Risiken mit sich bringen und somit die Verkehrssicherheit beeinträchtigen. Zusammenfassend ergibt sich damit für die Abschnitte (M) und (g) einer Episode hochautomatisierten Fahrens konkreter Forschungsbedarf zu den Themen Technikakzeptanz, Vertrauen und Systemverständnis bzgl. hochautomatisierter Systeme.

3. Verhalten während der hochautomatisierten Fahrt

Die hochautomatisierte Fahrt geht mit umfassenden Änderungen im Erleben und Verhalten der Fahrer einher. So verringert sich z. B. der Workload mit zunehmender Automation, was sich u. a. im Absinken der Herzfrequenz und des subjektiven Beanspruchungsempfindens der Fahrer im Fahrsimulator widerspiegelt [12], [13]. Ähnliche Ergebnisse berichtet Damböck [14]. Neben vier Automatisierungsgraden variierte er in seiner Studie das Vorhandensein einer visuellen Nebenaufgabe, die darin bestand, auf einem Bildschirm in einer Zahlenreihe die Zahl zwei zu detektieren. Dabei ergab sich, dass umso mehr Aufmerksamkeit auf die Nebentätigkeit gerichtet wird, je mehr die Fahrer von ihrer Fahraufgabe durch die Automatisierung entlastet werden. Darüber hinaus zeigten Jamson, Merat, Carsten und Lai [15] sowie Vogelpohl, Vollrath und Kühn [16], dass eine längere Fahrt mit Automation zu stärkeren Ermüdungserscheinungen und beeinträchtigtem Situationsbewusstsein [17], [18] führt als eine manuelle Fahrt. Saxby et al. [13] verglichen in ihrer Studie unter anderem das subjektive Erleben der Fahrzeugführer bei Fahrten, die vollautomatisiert, manuell oder mit Lenkassistenz durchgeführt wurden. Das selbstbewertete Engagement nahm bei Vollautomatisierung bereits nach kurzer Zeit stärker ab als bei manueller oder assistierter Fahrt. Stress, Bedrohung, Herausforderung, Unkontrollierbarkeit und emotionaler Fokus unterschieden sich nicht zwischen manueller und vollautomatisierter Fahrt. Für die Bedingung mit Lenkassistenz waren diese Werte jedoch signifikant erhöht.

Während des hochautomatisierten Fahrens stand nicht nur das Erleben des Fahrers, sondern auch die Beschäftigung mit Nebentätigkeiten im Fokus psychologischer Forschung. Carsten et al. [12] stellten fest, dass sich Fahrer mit steigendem Automatisierungsgrad zunehmend häufiger mit Nebentätigkeiten, wie zum Beispiel dem Schauen von DVDs, beschäftigen. Eine Analyse von Nebentätigkeiten, die während Staufahrten durchgeführt werden, zeigt den Bereich dieser Tätigkeiten auf [19]. Hierzu berichten Petermann-Stock und Kollegen, dass Fahrer sich hauptsächlich mit visuell beanspruchenden Dingen beschäftigen. Besonders häufig handelt es sich dabei um Aktivitäten mit dem Smartphone, wie Nachrichten schreiben, soziale Netzwerke nutzen, Notizen machen oder im Internet surfen. An zweiter Stelle werden Aktivitäten genannt, die die Fahrer stärker auditiv beanspruchen, wie Radio und CDs hören. Den dritten Platz belegen Essen und Trinken sowie weitere manuelle Tätigkeiten. Es ist davon auszugehen, dass Fahrer die neu entstehenden Freiheiten beim hochautomatisierten Fahren mit Nebentätigkeiten ausfüllen werden, die zu denen während einer Staufahrt vergleichbar sind.

Neue Herausforderungen für die Gewährleistung der Verkehrssicherheit ergeben sich bei der Festlegung nicht erlaubter Verhaltensweisen, wie z. B. Ruhen oder Schlafen, bei denen die Augen für längere Zeit geschlossen werden und die die Wahrscheinlichkeit einer sicheren Übernahme der Fahrzeugkontrolle verringern. Ebenfalls ist nicht auszuschließen, dass dieses Verhalten mit einer Veränderung der Sitzeinstellung einhergeht, die ein bequemeres Sitzen oder sogar Liegen ermöglicht. Dies könnte die Fähigkeit der Fahrer zur Übernahme der Fahrzeugführung noch weiter einschränken. Eine Herausforderung zukünftiger Forschung wird es daher sein, eine Balance zwischen der Entlastung des Fahrers durch die Automation und der Herstellung bzw. Aufrechterhaltung eines angemessenen Situationsbewusstseins im Falle einer Übernahme zu schaffen. Von Interesse wären beispielsweise Studien, die untersuchen, wie einem Einschlafen vorgebeugt werden kann.

4. Übernahme der Fahrzeugkontrolle und anschließendes manuelles Fahren

Bei der Übernahme sind zwei Fälle zu unterscheiden. Zum einen kann die Initiative dazu vom Fahrzeug ausgehen. Dies geschieht, wenn eine Verkehrssituation bevorsteht, die vom hochautomatisierten System nicht bewältigt werden kann. In diesem Fall ist sicherzustellen, dass der Fahrer ausreichend Zeit hat, der Aufforderung nachzukommen, ohne dass es zu einer Beeinträchtigung der Fahrleistung und der Fahrsicherheit kommt. Zum anderen kann der Fahrer selber eine Übernahme initiiieren, was gemäß Wiener Konvention jederzeit möglich sein muss [20]. In diesem Fall ist darauf zu achten, dass die Verkehrssituation dies zulässt und sich

nachfolgende Manöver des Fahrers innerhalb der Systemgrenzen vollziehen. Der weitaus größte Teil psychologischer Forschung zum hochautomatisierten Fahren adressiert den ersten Fall, also die Phase während und nach einer systeminitiierten Übernahme. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse beziehen sich auf den Abschnitt (n) in Abbildung 1 und betreffen:

1. die Gestaltung der Übernahmesituation sowie
2. das Verhalten und Erleben des Fahrers bei der Übernahme und während der anschließenden manuellen Fahrt.

Bezüglich der Gestaltung der Übernahmesituation wurden der Prozess der Übernahme, z. B. die Anzahl der Schritte, die eine Übernahmeaufforderung hat, und die Gestaltung der Aufforderung selber untersucht. In einer Onlinebefragung ermittelte Brandenburg [21] eine Präferenz für zweistufige Übernahmeaufforderungen, die aus einem Hinweis und einer finalen Aufforderung bestehen, gegenüber einem einstufigen Prozess (nur eine Aufforderung). Nachdem beide Versionen „erlebt“ wurden, stellten Walch et al. [22] dieselbe Präferenz in einer Befragung im Fahrsimulator fest. Allerdings führte die zweistufige Gestaltung zu einer längeren Reaktionszeit und benötigte eine größere Zeitreserve bis zum Erreichen der Systemgrenze. Eine größere Reserve scheint sich positiv auf die Fahrerreaktion auszuwirken. So fanden Damböck et al. [23] in ihrer Simulatorstudie ab einer Zeitreserve von 6 s weniger Fahrfehler und höheres Komfortempfinden als bei kürzeren Zeitspannen zwischen Übernahmeaufforderung und Systemgrenze. Vogelpohl und Vollrath [22] ermittelten, dass eine Reserve von 8 s nötig ist, damit mindestens 90 % der Fahrer angemessen reagieren.

Studien zur Gestaltung der Aufforderung beschäftigten sich hauptsächlich mit den Modalitäten, in denen eine Übernahmeaufforderung an den Fahrer übermittelt werden kann: akustisch, visuell, taktil. Dabei wurde in einer Onlinestudie eine Präferenz für akustisch-sprachliche Übernahmeaufforderungen gegenüber visuellen gefunden ([21], eingereicht). Akustische Aufforderungen scheinen ein hohes Potential für die Gestaltung von Übernahmeaufforderungen beim hochautomatisierten Fahren zu haben. Sie beanspruchen den Fahrer nicht visuell (wie z. B. die Fahraufgabe und viele Nebentätigkeiten), bieten Gestaltungsspielraum und lösen ggf. eine Orientierungsreaktion des Fahrers aus. Diese Orientierungsreaktion hat das Potential, die Aufmerksamkeit des Fahrers von der Nebentätigkeit zur Fahraufgabe zu verschieben. Die Multimodalität von Übernahmeaufforderungen war ebenfalls Gegenstand von Untersuchungen. Beispielsweise wurde ein besseres Fahrverhalten bei visuell-akustischen [25] bzw. taktil-akustischen [26] Aufforderungen im Vergleich zu deren unimodalen Versionen gefunden. Für kritische Situationen werden multimodale Aufforderungen klar bevorzugt [27]. Ein vollständiger

Vergleich der möglichen Modalitäten und aller Kombinationen steht allerdings noch aus. Ebenfalls noch ungeklärt ist die Frage, ob eine Variation der Übernahmeaufforderung bezüglich Modalität, Informationsgehalt und Anzahl der Warnstufen in Abhängigkeit von der Kritikalität der Übernahmesituation zu angemessenerem Verhalten führt. Übernahmeaufforderungen, die an die Verkehrssituation und den Fahrerzustand angepasst sind, sollten deshalb zukünftig noch eingehender untersucht werden.

Zusätzlich zur Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle richtete sich der Fokus psychologischer Forschung auf die vom Fahrer erlebten und von ihm als Verhalten gezeigten Effekte nach einer Übernahme. Die Sichtung der ausgewählten Studien, die das Fahrverhalten untersuchen, zeigt, dass Leistung und Empfinden hauptsächlich von der Gestaltung der Übernahmeaufforderung, dem Ausführen einer Nebentätigkeit, der Dauer der hochautomatisierten Fahrt und der Komplexität der Übernahmesituation abhängig sind.

Zur Erfassung der Übernahmleistung hat sich die Zeit vom Erscheinen der Übernahmeaufforderung bis zur Kontrollübernahme durch den Fahrer, die Übernahmzeit, etabliert. Laut einem Überblicksartikel von Eriksson und Stanton [28], in dem über 25 Studien berücksichtigt wurden, bewegen sich die fahrerseitigen Reaktionszeiten nach einer Übernahmeaufforderung im Mittel zwischen 1,14 s [29] und 15 s [30]. Da den Studien teilweise verschiedene Operationalisierungen der Reaktionszeit zugrunde lagen, sind diese Ergebnisse allerdings nur schwer vergleichbar. So interpretierten Zeeb und Kollegen [29] die Hands-on-time als Reaktionszeit, andere wiederum den Start eines Manövers oder die Fokussierung der visuellen Aufmerksamkeit auf die Straßenmitte [30]. Betrachtet man nur die Ergebnisse, die eine Übernahmzeit mit dem Start eines Manövers maßen, liegt der kleinste Mittelwert bei 1,55 s [31], der größte bei 8,7 s [32]. Bei Vogelpohl und Vollrath [24] hatten die abgelenkten Fahrer nach 6 bis 7 s die Hände am Lenkrad und nach 7 bis 8 s die Automation abgeschaltet. Eine einheitliche Definition und Messung der Übernahmzeit würden die Vergleichbarkeit von Studienergebnissen erheblich erleichtern und sollte zukünftig angestrebt werden.

Inwieweit sich die Präsenz und die Art einer Nebentätigkeit auf die Übernahmleistung auswirkt, konnte bisher nicht abschließend geklärt werden. Zum einen zeigte sich in Simulatorstudien, dass sich bei Probanden, die eine Nebenaufgabe ausführten, im Vergleich zu nicht abgelenkten bzw. manuellen Fahrten die Übernahmleistung verschlechterte [24], [33], [34]. Es kam zu längeren Reaktionszeiten [24], [33] und geringeren Geschwindigkeiten [24], [34]. Pe-

termann-Stock et al. [19] untersuchten Nebenaufgaben mit verschiedenen Beanspruchungsgraden, die realistischer weise auch bei hochautomatisierten Fahren ausgeführt werden. Stärker beanspruchende Nebentätigkeiten, wie die Erledigung von Büroarbeiten oder das Surfen im Internet, führten zu längeren Übernahmezeiten und zu weniger Blicken auf das Verkehrsgeschehen als weniger beanspruchende, wie z. B. Gespräche [19]. Gold, Körber, Lechner und Bengler [35] konnten dagegen keinen Leistungsunterschied zwischen Bearbeiten und Nicht-Bearbeiten einer Nebenaufgabe finden, obwohl sie die gleiche, relativ realistische Nebenaufgabe (ein Frage-Antwort Quiz) einsetzen wie Merat et al. [34]. Zusammenfassend zeigt sich, dass das Bearbeiten von Nebenaufgaben, unabhängig von ihrer Realitätsnähe, die Fahrleistung tendenziell beeinträchtigt. Ein direkter Vergleich unterschiedlich stark beanspruchender Nebentätigkeiten liegt jedoch noch nicht vor. Aus diesem ließe sich eine Vorhersage von Auswirkungen verschiedener Nebentätigkeiten auf die Übernahmleistung ableiten, so dass Empfehlungen für erlaubtes Verhalten während der hochautomatisierten Fahrt gegeben werden könnten.

Die Evidenz bezüglich der Auswirkung der Komplexität der Verkehrssituation auf die Übernahme der Fahrzeugkontrolle ist dagegen eindeutiger. Für Übernahmesituationen mit Verkehrsaufkommen fanden Gold et al. [35] und Körber et al. [36] längere Übernahmezeiten, kürzere Time-to-Collision (TTC) und mehr Kollisionen im Vergleich zu Situationen ohne Verkehr (0 Fahrzeuge/km). Die Reaktionen unterschieden sich jedoch nicht mehr für mittlere und hohe Verkehrsdichte (10 bzw. 20 Fahrzeuge/km). Eine weitere Studie untersuchte drei Übernahmeszenarien, bei denen die Versuchspersonen mit einer Handlung auf die Übernahmeaufforderung reagieren mussten, die einer der drei Ebenen der Fahrzeugführung nach Donges² zugewiesen werden konnte [23]. Alle Probanden absolvierten das Szenario auf der einfachsten, der Stabilisierungsebene (Wegfall der Fahrbahnmarkierung) erfolgreich, wohingegen es bei den beiden anderen, schwierigeren Situationen (Führung und Navigation) zu Fehlern kam. Auch diese Ergebnisse weisen auf die Wichtigkeit der Erforschung und Gestaltung situationsadaptiver Übernahmeaufforderungen hin.

Zu den Auswirkungen längerer Abschnitte hochautomatisierten Fahrens auf die Leistung der Fahrer nach Übernahme der Fahrzeugkontrolle liegen nur wenige Studien vor. Feldhütter et al. [33] konnten zeigen, dass eine Dauer der hochautomatisierten Fahrt von 20 Minuten keine

²Die Drei-Ebenen-Hierarchie nach Donges unterscheidet die Fahraufgabe in die Stabilisierungs-, Führungs- und Navigationsaufgabe [35].

Auswirkung auf die Übernahmezeit und auf die Time-to-Collision hat. Bei Brandenburg und Skottke zeigten die Fahrer nach 20 Minuten hochautomatisierten Fahrens jedoch kürzere Abstände zum Führungsfahrzeug, höhere Geschwindigkeiten und größere Abweichungen von der Fahrspur für bis zu 10 km nach der Übernahme im Vergleich zur Baseline [38]. Weitere Studien wären von Nutzen, um die Auswirkungen längerer Abschnitte hochautomatisierten Fahrens abschätzen zu können. Bisher wenig untersucht sind auch Lerneffekte. Es ist anzunehmen, dass Fahrer mittelfristig ihre Fahrleistung nach Übernahme der Fahrzeugkontrolle mit zunehmender Übung verbessern. Langfristig kann die häufige Nutzung hochautomatisierter Fahrfunktionen allerdings zum Verlust von Fahrerfähigkeiten führen [30]. Dieser Effekt ist aus dem Bereich der Flugfahrt bekannt [40]. Die zeitlichen Auswirkungen auf die Leistung des gesamten Fahrer-Fahrzeug-Systems sollten daher Beachtung in der zukünftigen Forschung finden.

Schlussendlich ist die Fahrleistung nach Übernahmen noch nicht in hochdynamischen Fahrsituationen betrachtet worden. Fahrzeugführer müssen nach der BASt-Definition in der Lage sein, die Fahrzeugkontrolle bei Erreichen der Systemgrenzen zu übernehmen [2]. Es ist sehr wahrscheinlich, dass diese auch in Fahrsituationen erreicht werden, die zeitkritisch sind und mit einer hochdynamischen Bewegung des Fahrzeugs, z. B. bei einem Ausweichmanöver mit hohen Geschwindigkeiten, einhergehen. Fast alle berichteten Studien sind jedoch in statischen Fahrsimulatoren durchgeführt worden, was die Übertragbarkeit auf hochdynamische Situationen einschränkt. Darüber hinaus ist es dem Fahrer erlaubt, jederzeit die Kontrolle des Fahrzeugs wieder zu übernehmen. Auch diese selbstinitiierten Fahrereingriffe waren bisher nicht Gegenstand psychologischer Untersuchungen.

5. Zusammenfassung der Ergebnisse und Implikationen für die weitere Forschung

Der vorliegende Beitrag liefert eine Übersicht über den derzeitigen psychologischen Erkenntnisstand zum hochautomatisierten Fahren. Er fasst insgesamt 28 Untersuchungen zusammen, gliedert diese in die Abschnitte hochautomatisierten Fahrens ein und leitet zukünftigen Forschungsbedarf ab. Dabei wird deutlich, dass sich ein Großteil der psychologischen Forschung bislang mit dem fahrerseitigen Erleben und Verhalten im Abschnitt der systeminitiierten, fahrerseitigen Übernahme der Fahrzeugkontrolle vom hochautomatisierten Fahrzeug beschäftigt hat. Die zeitlich davorliegenden Teilabschnitte zum manuellen Fahren vor der Übergabe der Fahrzeugkontrolle und zum Erleben und Verhalten während der hochautomatisierten Fahrt sollten aus verschiedenen Gründen mehr Beachtung erfahren. Beispielsweise können Vorteile des hochautomatisierten Fahrens, wie z. B. Steigerung der Verkehrssicherheit, Verringerung

von Umweltbelastungen, Realisierung höherer Straßenkapazitäten, nur zum Tragen kommen, wenn eine große Anzahl von Fahrgästen diese Technologie akzeptiert und in den dafür vorgesehenen Situationen richtig einsetzt. Weitere Forschung sollte Ergebnisse hinsichtlich der Akzeptanz dieser Technologie erbringen. Darüber hinaus sollte ein stärkerer Fokus auf die Entwicklung des Vertrauens der Nutzer gelegt werden, da dieses vermutlich stark den Einsatz hochautomatisierter Fahrfunktionen beeinflusst.

Die Zeit während des hochautomatisierten Fahrens ist von Bedeutung, weil die dort ausgeführten Nebentätigkeiten die Leistung der Fahrer während und nach der Übernahme der Fahrzeugkontrolle beeinträchtigen. Ein Grund hierfür ist sicherlich darin zu suchen, dass der Fahrer eine gewisse Zeit braucht, um den Grad des Situationsbewusstseins [39] zu erlangen, der für eine unbeeinträchtigte Fahrleistung notwendig ist. Weitere Risikofaktoren sind ein Nachlassen der Vigilanz und eine Zunahme von Ermüdungserscheinungen, vor allem bei längeren hochautomatisierten Fahrten. Die damit möglicherweise einhergehenden Veränderungen der Fahrerposition (z. B. bequeme Sitzeinstellung) könnten zusätzlich motorische Reaktionen verzögern bzw. verlangsamen und die Aufmerksamkeit beeinträchtigen. Diese Faktoren waren allerdings bisher noch nicht Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen.

Die meisten Studien beschäftigten sich mit dem Abschnitt der Übernahme der Fahrzeugkontrolle und dem anschließenden manuellen Fahren. Dabei fokussieren sich die Arbeiten insbesondere auf die Feststellung der Reaktionszeit der Fahrer nach einer Übernahmeaufforderung und auf ihre anschließende Leistung bei der Quer- und Längsführung. Obwohl es hierzu schon recht viele Erkenntnisse gibt, wird deutlich, dass Veränderungen des Fahrerzustandes über die Zeit, wie z. B. Lern- und Ermüdungseffekte, sowie dynamische Aspekte der Übernahmesituation bisher nicht ausreichend untersucht wurden. Außerdem blieben fahrerinitiierte Übernahmen bisher völlig unbeachtet. Dies sollten Schwerpunkte weiterer Forschungsarbeiten werden. Die Interaktion des Fahrers mit seinem komplexen, hochautomatisierten Fahrzeug stellt ein neues, herausforderndes Forschungsfeld mit ganz neuen Fragestellungen dar. Einige dieser Forschungsfragen sind innerhalb weniger Jahre umfänglich untersucht worden, die meisten allerdings noch nicht. Der vorliegende Beitrag argumentiert, dass die dargestellten offenen Fragen in mittelbarer Zukunft adressiert werden müssen, damit die Potenziale des hochautomatisierten Fahrens möglichst umfassend werden können.

6. Literaturverzeichnis

- [1] J. J. Gibson und L. E. Crooks, "A theoretical field-analysis of automobile-driving," *Am. J. Psychol.* vol. 51, no. 3, S. 453–471, 1938.
- [2] T. M. Gasser, *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe*. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 2012.
- [3] F. Kröger, "Das automatisierte Fahren im gesellschaftsgeschichtlichen und kulturwissenschaftlichen Kontext," in *Autonomes Fahren*, M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, and H. Winner, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 41–67.
- [4] ECE/TRANS/WP.1/145, "Report of the sixty-eighth session of the Working Party on Road Traffic Safety," Geneva, Apr. 2014.
- [5] Deutscher Bundestag, "Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Verkehr und digitale Infrastruktur," Berlin, 2017.
- [6] M. A. Schreurs und S. D. Steuwer, "Autonomous Driving – Political, Legal, Social, and Sustainability Dimensions," in *Autonomes Fahren*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 152–173.
- [7] ERTRAC, "Automated Driving RoadmapTechnical Report of the European Road Transport Research Advisory Council." European Union, 21-Jul-2015.
- [8] SAE International, "Summary of Levels of Driving Automation for On-Road Vehicles." 2013.
- [9] F. D. Davis, "A Technology Acceptance Model for Empirically Testing New End-User Information Systems: Theory and Results," Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1985.
- [10] W. Payre, J. Cestac, und P. Delhomme, "Intention to use a fully automated car: Attitudes and a priori acceptability," *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 27, S. 252–263, Nov. 2014.

- [11] M. Kyriakidis, R. Happee, und J. C. F. de Winter, "Public opinion on automated driving: Results of an international questionnaire among 5000 respondents," *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 32, S. 127–140, Jul. 2015.
- [12] O. Carsten, F. C. H. Lai, Y. Barnard, A. H. Jamson, und N. Merat, "Control Task Substitution in Semiautomated Driving: Does It Matter What Aspects Are Automated?," *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, vol. 54, no. 5, S. 747–761, Oct. 2012.
- [13] D. J. Saxby, G. Matthews, J. S. Warm, E. M. Hitchcock, und C. Neubauer, "Active and passive fatigue in simulated driving: Discriminating styles of workload regulation and their safety impacts.," *J. Exp. Psychol. Appl.*, vol. 19, no. 4, S. 287–300, 2013.
- [14] D. Damböck, "Automationseffekte im Fahrzeug-von der Reaktion zur Übernahme," Technische Universität München, München, 2013.
- [15] A. H. Jamson, N. Merat, O. M. J. Carsten, und F. C. H. Lai, "Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 30, S. 116–125, May 2013.
- [16] T. Vogelpohl, M. Vollrath, und M. Kühn, "Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung Teil 2: Müdigkeit und lange Fahrtzeit als Einflussfaktoren auf die Sicherheit nach einer Übernahmeaufforderung," Gesamtverband der Versicherungswirtschaft e.V., Braunschweig, 47, Jun. 2017.
- [17] M. Endsley, "Toward a theory of situation awareness in dynamic systems," *Hum. Fac.*, vol. 37, no. 1, S. 32 - 64, 1995.
- [18] N. Wittbrodt, A. Hillebrand, U. Drewitz, D. Schulz-Rückert, & M. Thüring, "Situation Awareness: eine kognitionspsychologische Erweiterung und Präzisierung." *Beitrag zur 8. Berl. Werk. Men.-Masch.-Sys.* 2009.

- [19] I. Petermann-Stock, L. Hackenberg, T. Muhr, und C. Mergl, "Wie lange braucht der Fahrer? Eine Analyse zu Übernahmezeiten aus verschiedenen Nebentätigkeiten während einer hochautomatisierten Staufahrt," *6. Tagung Fahrerassistenzsysteme. Der Weg zum automatischen Fahren*, 2013.
- [20] UN, Übereinkommen über den Strassenverkehr. 1968.
- [21] S. Brandenburg, "Drivers' Individual Design Preferences of Takeover Request in Highly Automated Driving," *Trans. Res. part F*, eingereicht.
- [22] M. Walch, K. Lange, M. Baumann, und M. Weber, "Autonomous driving: investigating the feasibility of car-driver handover assistance," 2015, S. 11–18.
- [23] D. Damböck, M. Farid, L. Tönert, und K. Bengler, "Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren," *Tagung Fahrerassistenz*, München, 2012.
- [24] T. Vogelpohl und M. Vollrath, "Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren," *Unfallforschung der Versicherer*, Braunschweig, 57, Jun. 2016.
- [25] F. Naujoks, C. Mai, und A. Neukum, "The effect of urgency of take-over requests during highly automated driving under distraction conditions," in *Proc. of the 5th Int. Conf. on Appl. Hum. Fact. and Erg.*, 2014.
- [26] S. Petermeijer, P. Bazilinskyy, K. Bengler, und J. de Winter, "Take-over again: Investigating multimodal and directional TORs to get the driver back into the loop," *Appl. Ergon.*, vol. 62, S. 204–215, Jul. 2017.
- [27] P. Bazilinskyy, B. Petermeijer, V. Petrovych, D. Dodou, und J. C. F. de Winter, "Take-over requests in highly automated driving: A crowdsourcing multimedia survey on auditory, vibrotactile, and visual displays," 2017.
- [28] A. Eriksson und N. A. Stanton, "Takeover Time in Highly Automated Vehicles: Noncritical Transitions to and From Manual Control," *Hum. Factors*, vol. 59, no. 4, S. 689–705, Jun. 2017.

- [29] K. Zeeb, A. Buchner, und M. Schrauf, "What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 78, S. 212–221, May 2015.
- [30] N. Merat, A. H. Jamson, F. C. H. Lai, M. Daly, und O. M. J. Carsten, "Transition to manual: Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle," *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 27, S. 274–282, Nov. 2014.
- [31] J. Radlmayr, C. Gold, L. Lorenz, M. Farid, und K. Bengler, "How Traffic Situations and Non-Driving Related Tasks Affect the Take-Over Quality in Highly Automated Driving," *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.*, vol. 58, no. 1, S. 2063–2067, Sep. 2014.
- [32] W. Payre, J. Cestac, und P. Delhomme, "Fully Automated Driving: Impact of Trust and Practice on Manual Control Recovery," *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, vol. 58, no. 2, S. 229–241, Mar. 2016.
- [33] A. Feldhütter, C. Gold, S. Schneider, und K. Bengler, "How the Duration of Automated Driving Influences Take-Over Performance and Gaze Behavior," in *Advances in Ergonomic Design of Systems, Products and Processes*, C. M. Schlick, S. Duckwitz, F. Flemisch, M. Frenz, S. Kuz, A. Mertens, und S. Mütze-Niewöhner, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 309–318.
- [34] N. Merat, A. H. Jamson, F. C. H. Lai, und O. Carsten, "Highly Automated Driving, Secondary Task Performance, and Driver State," *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, vol. 54, no. 5, S. 762–771, Oct. 2012.
- [35] C. Gold, M. Körber, D. Lechner, und K. Bengler, "Taking Over Control From Highly Automated Vehicles in Complex Traffic Situations: The Role of Traffic Density," *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, vol. 58, no. 4, S. 642–652, Jun. 2016.
- [36] M. Körber, C. Gold, D. Lechner, und K. Bengler, "The influence of age on the take-over of vehicle control in highly automated driving," *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 39, S. 19–32, May 2016.

- [37] E. Donges, "Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Fuehrung von Personenkraftwagen," *Automob-Ind*, vol. 27, no. 2, S. 18–190, 1982.
- [38] S. Brandenburg und E.-M. Skottke, "Switching from manual to automated driving and reverse: Are drivers behaving more risky after highly automated driving?" *Proc. IEEE-ITSC*, 2014, S. 2978–2983.
- [39] M. R. Endsley, "Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement," *Proc. Hum. Factors Soc. Annu. Meet.*, vol. 32, no. 2, S. 97–101, Oct. 1988.
- [40] S. M. Casner, R. W. Geven, M. P. Recker und J. W. Schooler, „The Retention of Manual Flying Skills in the Automated Cockpit,“ *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, vol. 56, no. 8, S. 1506–1516, 2014.

Wenn's auf der falschen Seite kracht...

Untersuchung der neuen Euro NCAP Far Side Seitenauflprallanforderungen

Dipl.-Ing. **Karsten Hallbauer**, Dipl.-Ing. **Uwe Dierks**,
Dipl.-Ing. **Mario Wendt**, TAKATA AG, Ulm und Berlin

Kurzfassung

Seit vielen Jahren werden Fahrzeuge sowohl im Rahmen ihrer Typzulassung als auch im Verbraucherschutz in frontalen und seitlichen Crashversuchen untersucht und bewertet. Das Mindestmaß an Insassenschutz im seitlichen Aufprall ist in Europa seit Jahren durch die ECE R.95 definiert. Auch die europäische Verbraucherschutzorganisation Euro NCAP bewertet Fahrzeuge seit 2003 in einem Crashtest der einer Fahrzeug-Fahrzeug- Kreuzungskollision nachempfunden ist. Dieser Test wurde 2015 an die veränderten Gegebenheiten des aktuellen Unfallgeschehens, der Flottenzusammensetzung und der zur Verfügung stehenden Bewertungstechnologie (Dummy) angepasst. Sämtliche Bewertungen und angestrebten Verbesserungen des passiven Unfallschutzes bezogen sich bisher ausschließlich auf die stoßseitigen Insassen des gestoßenen Fahrzeugs. Neben diesem Szenario ist es aber auch möglich, dass der Unfallstoß von der gegenüberliegenden Fahrzeugseite kommt oder sich zwei Insassen auf den vorderen Sitzplätzen befinden. Beide mögliche zusätzliche Unfallgeschehen werden unter dem Begriff „Far -Side“ betrachtet. Verschiedene Studien und ein EU Forschungsprojekt haben sich bereits mit dieser Thematik beschäftigt. Im Jahr 2015 hat sich das Euro NCAP Board of Directors dieser Thematik angenommen und eine Arbeitsgruppe gegründet, um das Thema „Far-Side“ im Seitenauflprall zu untersuchen und zukünftig in ihr Bewertungssystem aufzunehmen. Zuerst wurden verschiedene europäische Unfalldatenbanken (GIDAS, LAB, ADAC, u.a.) ausgewertet und auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse mögliche Testszenarien entworfen und untersucht. Die komplexen Vorgänge der Feldunfälle mussten standardisiert werden, um die Verletzungsrisiken der Lastfälle in einem Prüfumfeld abzubilden. Die Arbeitsgruppe hat dabei „sub-system“ Tests auf einem Beschleunigungsschlitten entwickelt, welche das Feldgeschehen repräsentieren. In den Unfalldaten finden sich zwei grundsätzlich unterschiedliche

Far-Side Fälle. Es gibt sowohl sog. „single-case“ Fälle, bei denen sich nur der Fahrer im Fahrzeug befindet und in einen Unfall auf der Beifahrerseite verwickelt wird. Kollisionspartner kann sowohl ein anderes Fahrzeug als auch ein feststehendes Objekt (Baum, Pfahl, o.ä.) sein. Außerdem werden Fälle betrachtet in denen zum Unfallzeitpunkt beide vorderen Sitzplätze durch erwachsene Insassen besetzt sind und es zur Interaktion kommt. In diesen sog. „dual-case“ Fällen können beide Insassen Verletzungen erleiden, die dem „Far-Side“ Lastfall zugeordnet werden. Entscheidend für die Zuordnung ist, dass die verletzte Körperregion und der Kontaktpartner der Insasseninteraktion zugeordnet werden können. Beide Szenarien sollen in einem zukünftigen Protokoll in vereinfachter Form abbildbar und bewertbar gemacht werden. Dieses Papier beschäftigt sich einerseits mit dem Hintergrund des zukünftigen Testszenarios, welches ab 2020 Teil der Bewertung des Insassenschutzes für Erwachsene des Euro NCAP sein soll, als auch mit den möglichen Konsequenzen, den Insassenschutzstrategien und -technologien für zukünftige europäische Fahrzeuge unterschiedlicher Größen und Massen.

Abstract

Since a long time road vehicles were reviewed and assessed in frontal and side impact crash tests for type approval and consumer rating. The UNECE ECE R.95 defines the European minimum safety requirement for side impact protection. From 2003 the European consumer rating organization Euro NCAP also included a car-to-car side impact scenario into their test suit. In 2015 this side barrier test was updated to reflect current accident situations, vehicle fleet composition and latest assessment (dummy) technology. So far focus of all passive safety occupant protection has been set on struck side driver occupant only in target vehicle. Alternatively the impact might occur on the passenger side or two occupants might be on front row seats. These two scenarios were called „far side“-scenarios. Various studies and an EU framework research project have already analyzed these. In 2015 the Euro NCAP Board of Directors took initiative and started a working group to investigate the far side issue in side impacts and consider how to implement it in future into their rating scheme. First various European accident in-depth databases were analyzed: Based on these results a possible test scenario was drafted and reviewed in physical tests. The complex and wide spread band of field cases had to be standardized to create a comparison test to access far side injury risks. The working group developed a field representing „sub-system“-tests on a sled track. In accidentology two general categories of Far Side cases could be identified. If the vehicle occupation is with driver only and the impact occurs at passenger side, it's called „single case“. The collision partner might be another car or a fixed obstacle. Alternatively, there are cases with two adult occupants

on front seat interacting during impact, called "dual- case". In these cases both occupants might be injured by occupant to occupant interaction, what allows a „far side“- related injury classification. Both scenarios are planned to be part of a future protocol in a simplified, comparable test mode. This document reviews the intentions of 2020 Euro NCAP far side test scenarios as well as the consequences, the occupant protection strategy and technology for future European vehicles of various sizes and masses.

1. Hintergrund

Der sogenannte Far-Side Lastfall ist eine Form des Seitenaufpralls. Allgemein erfährt der Insasse eines Unfall-/ Crashfahrzeugs sowohl eine Beschleunigung also auch eine Verringerung des ihm zur Verfügung stehenden Fahrzeuginnenraumes. Im Gegensatz zum Frontalaufpall ist im Seitenaufprall das höchste Verletzungsrisiko meist mit der Intrusion von insassennahen Fahrzeugstrukturen verbunden. In der Vergangenheit wurden aus den unterschiedlichen seitlichen Unfallszenarien zwei Labortestumgebungen zur Bewertung des Insassenschutzes abgeleitet. Zum einen finden wir den Kreuzungsunfall mit dem Anstoß zweier Fahrzeuge, welcher in einem Scenario abgebildet wurde bei dem das Versuchsobjekt von einem normierten Stoßwagen getroffen wird. Zum anderen ereignen sich im Feldgeschehen eine Anzahl von seitlichen Anstoßen von Fahrzeugen an feste Hindernisse schlanker Form, also beispielsweise Bäume oder Laternenmasten. Diese Anstoßform führt zu einer sehr geringen Kontaktfläche mit dem Fahrzeug und einer starken, lokalen Deformation, die insbesondere im Bereich der Insassen ein hohes Verletzungsrisiko birgt. Diese Testkonfigurationen sind seit Jahren im Standardprüfprogramm des Gesetzgebers als auch bei Verbraucherschutzorganisationen abgebildet und haben zu vielerlei Verbesserungen des Insassenschutzes geführt. Sie adressieren allerdings den Fahrer, dessen Sitzplatz immer belegt ist. Im Falle, dass es zu einem Zusammenstoß auf der Beifahrerseite kommt, ergibt sich für den Fahrer eine der sogenannte Far-Side Situation. Er befindet sich zwar nicht direkt im Intrusionsbereich, erfährt aber die Aufprall-induzierte Beschleunigung und wird durch die für die Stoßseite optimierten, fahrzeugseitigen Insassenrückhaltesysteme nur unzureichend geschützt. Zusätzlich zu dem beschriebenen Far-Side Scenario mit einem einzelnen Fahrerinsassen gibt es auch die Möglichkeit, dass sich zwei Insassen auf den vorderen Fahrzeugsitzplätzen befinden; ein stoßseitiger Insasse („Near-Side“) und ein Insasse auf der stoßabgewandten Seite („Far-Side“). Im Ablauf der Kollision kann es zu einem Zusammenprall der beiden Insassen kommen, dann spricht man von Interaktion der Insassen, und dies ist eine weitere mögliche Ausprägung des Far-Side Lastfall-

les (sog. „dual-case“). Ein solches Interaktionsszenario kann sowohl bei einem Zusammenstoß von links als auch von rechts auftreten. Eine mögliche Insasseninteraktionssituation mit drei erwachsenen Insassen auf der ersten Sitzreihe ist bedingt durch die kleine Anzahl möglicher in Frage kommender Fahrzeuge in Europa sehr selten und liegt außerhalb dieser Be- trachtungen.

Craig Newland et.al. [1] verweist auf verschiedene Untersuchungen zur Relevanz des Far- Side Lastfalles und zeigt, dass es sich bei den Verletzten im Seitenauftreffen bis zu einem Drittel um „Far-Side“ Insassen handelt. Digges und Dalmotas [2] zeigten, dass die häufigste Ursache für Verletzungen von Far-Side Insassen der Kontakt mit Fahrzeuginterieur ist und propagierten ein Schutzkriterium, welches sich an der Insassenkopfbewegung (Exkursion) orientiert. Deren Untersuchungen der National Automotive Sampling System / Crashworthiness Data System (NASS/CDS) Unfalldatenbank zeigte, dass es neben den Fällen mit einem Insassen, auch durchaus eine relevante Anzahl von Insassen- Interaktionsverletzungen gibt. Sie schlossen, dass eine ausreichende Begrenzung der Kopfexkursion in der Lage ist, sowohl den Kopfkontakt zwischen den Insassen als auch mit dem Fahrzeuginterieur zu verhindern. Thomas, Wiik, & Brown, 2013 [3] fanden bei ihrer Auswertung der FARS Daten, dass es sich bei 29% der Getöteten (gegurtet, Vorderinsassen, nicht Rollover) bei Seitenunfällen um Far Side Insassen handelt und dies entspricht 11% der Getöteten bezogen auf alle Anstoßrichtungen.

Eine der ersten umfangreichen Untersuchungen zur europäischen Situation bezüglich Far Side wurde im Rahmen des 6th EU Research Framework APROSYS durchgeführt. Die Ergebnisse von Feist et.al. [4] basieren auf der Analyse unterschiedlicher europäischer Unfalldatenbanken (z.B. UK-CCIS, GIDAS, ...) und identifizieren wichtige Parameter, die das Feldunfallgeschehen beschreiben. Die Haupt- anprallrichtung bei Far-Side wird mit 3-Uhr Richtung beschrieben, wobei die Daten auch eine signifikante Anzahl von Fällen mit 2-Uhr Anstoßrichtung aufweisen. Diese mehrheitliche Stoßrichtung findet sich ebenfalls in den Unfalldaten anderer Datenbanken wie GIDAS, LAB, CCIS und ADAC. Der ungewichtete Mit-

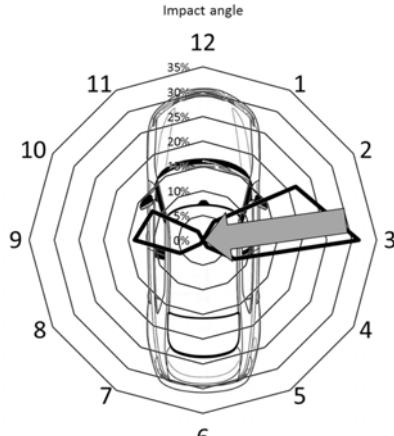


Bild 1: Auswertung Anstoßrichtung

telwert aller dieser Auswertungen liegt zwischen 72° und 80°. Eine Versuchskonfiguration entsprechend der Seitencrashkonfiguration „Schrägpfahlaufprall 75°“ ist also naheliegend.

In der APROSYS Untersuchung stellten Feist et.al. [4] fest, dass um 50% aller MAIS2+ Fälle zu adressieren ein ΔV von ca. 41km/h notwendig ist. Auf Basis von AE-MDB Crashversuchen im Rahmen des APROSYS Projektes erstellten sie einen entsprechenden generischen Far-Side Beschleunigungspuls. Andere Analysen wie z.B. von Sander und Boström, 2010 [5] bestätigen diesen ΔV Wert. Neben der reinen Beschreibung der Unfallschwere über die Geschwindigkeitsänderung kommt dem Kollisionspartner eine hohe Bedeutung zu. Die unterschiedlichen Kollisionsprinzipien Fahrzeug-Fahrzeug und Fahrzeug-Pfahl zeigen deutlich unterschiedliche Charakteristika der auftretenden Fahrzeugbeschleunigungen und Rohbaudeformationen. Grundsätzlich stellt sich die Frage, welche Kollisionsart beim Far-Side Szenario mehr Relevanz besitzt. Die EEVC WG21 Studie von Welsh et. al., 2008 [5] zeigt, dass beispielsweise in UK 55,1% aller Seitenkollisionen zwischen zwei Fahrzeugen stattfinden, dagegen nur 13,2% sich mit Hindernissen vom Typ „Pole“ ereignen. Die Anteile verschieben sich, wenn man die MAIS3+ Verletzten (35,2% Fzg-Fzg / 27% Fzg-Pole) oder die Getöteten (33,8% Fzg-Fzg / 32,4% Fzg-Pole) betrachtet, Bild 2.

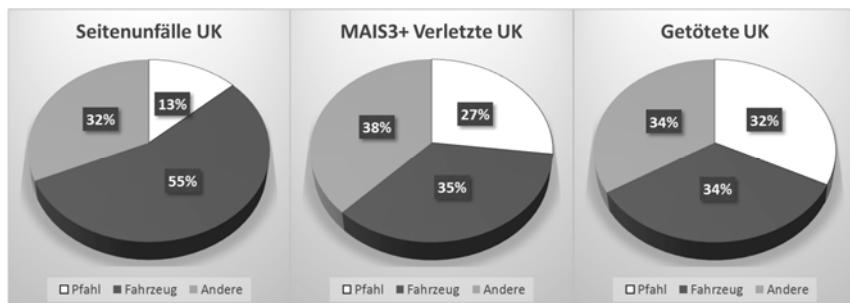


Bild 2: Verteilung Seitenkollisionen UK nach Kontaktpartner

Die Ereignis- Wahrscheinlichkeit für einen Pfahlanprall ist deutlich geringer als die Kollision mit einem anderen Fahrzeug, jedoch sind die möglichen Folgen eines solchen Anstoßes zumeist dramatischer und bergen ein signifikantes Verletzungsrisiko. Die Anzahl der bei einem Seitenanprall Getöteten sind bei einem Pfahlanprall nahezu genauso hoch wie bei den wesentlich häufigeren Fahrzeug-Fahrzeug- Kollisionen. Der Umstand, dass der Far-Side Insasse sich natürlich nicht im direkten Deformationsraum befindet, sollte nicht zu Abstrichen bei der Relevanzbetrachtung führen, da die stoßseitig in den Fahrgastrraum eindringenden Interieurteile potentielle Kontaktpartner bei der Oberkörper-/ Kopfbewegung in Stoßrichtung darstellen. Außerdem kann bei zwei Insassen auf den vorderen Sitzplätzen davon ausgegangen werden,

dass der stoßseitige Insasse zwar von den fahrzeugseitigen Insassenrückhaltesystemen geschützt wird, aber bei einer Interaktion der beiden Insassen diese Systeme auf Grund ihrer Position im Fahrzeug ihnen keinen Schutz bieten können. Für die Analyse und Bewertung eines Far-Side Events erscheint es somit sinnvoll, dass beide Crash-Lastfälle mit ihren charakteristischen Spezifika betrachtet werden.

Die APROSYS Far-Side Untersuchung von Feist et.al. [4] analysierte verschiedene Unfalldatensammlungen (z.B.: TRL UK CCIS) und kommt zu dem Schluss, dass eine Betrachtung einer Fahrzeugdeformation bis zu einem sog. „Collision Deformation Classification“ (CDC) Level von 3,5 zwischen 50% und 75% der MAIS2+ NSS abdeckt. Andererseits erscheint es für die Bewertung zukünftiger, neuer Fahrzeuge bezüglich ihres Far Side Schutzes sinnvoll die individuelle Rohbausteiligkeit des jeweiligen Fahrzeugs für die fahrzeugspezifische Bewertung der Insassenverlagerung zu benutzen. Die Auswertung der maximalen Deformation auf Basis der Bewertungscrashes könnte dann als Mindestkriterium bei der Analyse des Far Side Insassenschutz dienen.

2. Far Side im Kontext des europäischen Unfallgeschehen

Im Jahr 2014 starben in der EU 11733 Fahrzeuginsassen (EU Commission, June 2016) [7]. Ausgehend, dass etwa ein Drittel aller getöteten Fahrzeuginsassen bei einem Seitenauftprall starben und davon ein Drittel aller Getöteten im Seitenauftprall sich in einer Far-Side Situation befanden, kommt man in Europa pro Jahr auf eine Zahl von nahezu 1200 Getöteten dem Far-Side Szenario zugeordnet werden. Das bedeutet, dass dieses Szenario signifikant am europäischen Unfall-geschehen beteiligt ist.

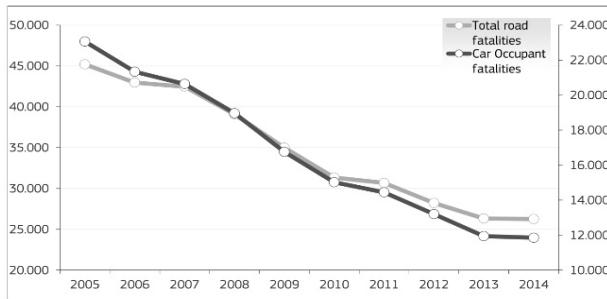


Bild 3: Getötete Fahrzeuginsassen in der EU
(EU Commission, June 2016) [7]

Seit 2013 werden die europäischen Ziele zur Reduzierung der Getöteten im Straßenverkehr nicht mehr vollständig erreicht, Bild 4. Die EU hat sich in der Valletta Declaration on Road Safety 2017 [8] verpflichtet die Anstrengungen zur Halbierung der Verkehrstoten 2010 bis 2020 fortzuführen und zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen, um eine Halbierung der Verkehrstoten für den Zeitraum 2020 bis 2030 zu ermöglichen. Neue, bisher nicht adressierte Felder des Insassenschutzes können dazu beitragen, die ambitionierten Zielen der EU zu erreichen.



Bild 4: Ziele und Zielerreichung der EU (EU Commission, June 2016) [7]

3. Versuch und Bewertungswerkzeuge

Seit dem Jahr 2015 widmet sich eine Euro NCAP Arbeitsgruppe dem Thema „Far-Side“, um diesen Aspekt des Seitenaufpralls zu untersuchen und eine Aufnahme in das zukünftige Bewertungssystem vorzubereiten. Zuerst wurden neben verschiedenen europäischen Unfalldatenbanken (z.B.: GIDAS, LAB, ADAC) auch Arbeiten der EEVC Arbeitsgruppe 13 und APRO-SYS Task 1.1.5. ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Arbeiten (Sandner, 2017 [9]) bilden die Grundlagen für die Definition der relevanten Geschwindigkeitsänderung (ΔV 41km/h). Sandner zeigt, dass die Relevanz dieser Geschwindigkeitsänderung abhängig von der Datenbank auf 37% bis 84% der ausgewerteten Unfalldatenfälle zutrifft. Seine Auswertung von ADAC Unfalldaten bestätigt ebenfalls die APROSYS Erkenntnisse zur vorwiegenden Aufprallrichtung, je nach Verletzungsschwere ergibt sich ein Winkel zwischen 80° (MAIS2+) und 84° (MAIS3+). In diesen Analysen wurden außerdem Kopf, Thorax und Abdomen als meistbetroffene Körperregion mit ihren jeweiligen Kontaktpartnern im Fahrzeug identifiziert. Diese Informationen bilden die Grundlage für die Definition der standardisierten Laborprüfungsparameter.

Die derzeitige Bewertung des Insassenschutzes im Euro NCAP Testprogramm erfolgt anhand von Fahrzeug-Crashtests, Fahrversuchen zur Bewertung von Systemen der Unfallvermeidung und Ergebnissen aus Komponentenversuchen. Diese sog. Sub-System Tests werden bereits zur Bewertung des Heckaufprallrisikos (Whiplash) und unter Umständen auch zur Untersuchung des Verletzungsrisikos bei einem möglichen Knieaufprall an der Instrumententafel (Knee-Mapping) genutzt.

Es wird erwartet, dass auch die Bewertung des Far-Side Verletzungsrisikos in Schlittenversuchen erfolgen wird. Der Gesamtversuchsaufbau einer solchen Schlittenkonfiguration besteht aus dem beschleunigbaren Grundschlitten, auf dem sich ein fahrzeugspezifischer Karosserieaufbau befindet. Dieses Setup besteht aus einer Rohkarosse und verschiedenen Verstärkungs- und Befestigungselementen, die der Stabilisierung und der Wiederverwendbarkeit dienen. Sie bildet die Grundlage für die Versuchsumgebung. Eine Nachstellung unterschiedlicher, aufprall-spezifischer Intrusionen ist nicht zwingend notwendig, da sich der Far Side Insasse zunächst nicht im zeitlich verändernden Innenraumbereich befindet. Er bewegt sich zwar später unter Umständen in diesen Bereich hinein, aber das damit verbundene Kontakt- und Verletzungsrisiko kann über Referenzebenen der Intrusion erfasst werden. Das Überschreiten einer solchen

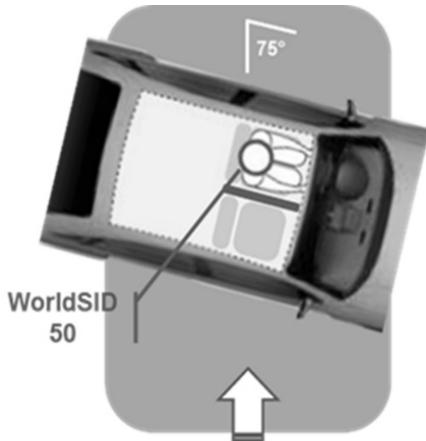


Bild 5: Schlittenkonfiguration



Bild 6: Karossenbefestigung und –versteifung [10]

Verlagerungs-grenzlinie kann dann als Indikator für ein mögliches Verletzungsrisiko benutzt werden. Zusätzlich können in einem solchen Aufbau auch durch weitere Referenz-ebenen zusätzliche Kriterien festgelegt werden, die z.B. das Risiko des Kopfanpralls von möglichen zwei Insassen adressieren (selten, aber hohes Letalitäts-Risiko).

Neben einem Grundrahmen zur sicheren Befestigung des Aufbaus am Versuchsschlitten sind verschiedene Versteifungs- und Abstützungsmaßnahmen erforderlich, um eine mehrmalige Verwendung des Aufbaus und reproduzierbare Ergebnisse zu ermöglichen. Diese Stabilisierungsmaßnahmen können u.a. auch als Kameraträger zur Erfassung der Insassenverlagerung dienen. Um Restriktionen der Schlittenbeschleunigungsanlagen bzgl. Größe und Gewicht einzuhalten, können für den Test irrelevante Teile des Rohbaus entfernt werden.

In der Euro NCAP Bewertung werden gemäß „VSSR - Vehicle Specification, Sponsorship, Testing and Retesting“ V7.0 (Euro NCAP, 2015) [11] die Fahrzeuge in der meist verkauften Konfiguration der sogenannten „best selling“ Variante getestet, wobei die Minimum Serien-Sicherheitsausstattung bestimmt ist. Es wird beabsichtigt, dass die Interieurausstattung des Schlittensetups weitestgehend der in den Crashversuchen getesteten Variante entspricht. Der Umfang der Schlittenausstattung orientiert sich an dessen Relevanz für das Versuchsergebnis. Dazu zählen die beiden Vordersitze, die Mittelkonsole, Lenksäule und Lenkrad, die Instrumententafel, Gurte und weitere mögliche relevante Rückhaltesysteme. So werden die beiden Vordersitze analog der Crashtestprotokolle montiert und eingestellt. Der Einbau der Mittelkonsole ist ebenfalls im Far-Side Lastfall notwendig, da sie während des Lastfalls den Insassen zumindest teilweise in seiner Bewegung zur Stoßseite beeinflusst und damit Teil eines Rückhaltesystems sein kann. Dieser Einfluss muss abgebildet und damit bewertbar werden. Der Einbau der Instrumententafel inklusive Lenksäule und Lenkrad komplettiert das Setup. Die Instrumententafel dient neben der rein geometrischen Bewegungsbegrenzung des Insassen auch der Stabilisierung der Mittelkonsole. Ähnlich begrenzt die Lenksäule mit ihrer Unterverkleidung die mögliche Position der Knie und ihre Kinematik und muss somit im Setup enthalten sein. Der Einbau und die Nutzung sämtlicher für den Rückhalt notwendiger Einrichtungen (z.B. Gurte, etc.) vervollständigt den Aufbau. Eine der bestimmenden Kenngrößen von Crash- und Schlittenversuchen ist der zeitliche Verlauf der aufgebrachten Beschleunigung; der sogenannte Puls. Dieser Fahrzeug- und Lastfall-spezifische Parameter wird durch den Schlittenantrieb auf das montierte Versuchssetup aufgebracht. Der Beschleunigungsverlauf wird im Crash gemessenen, z.B. B-Säulenbeschleunigungen der nicht deformierenden Crashseite. Diese Beschleunigungen sind die Eingangsgröße für den Schlittenantrieb bei den Far-Side Tests. Die beiden zukünftigen Far-Side Szenarien orientieren sich an beiden Seitencrashversuchen des Euro NCAP, gehen aber davon aus, dass der Anprall auf der anderen Seite stattfindet.

Feist et.al. [4] untersuchte im Rahmen des EU Forschungsprojekt APROSYS eine Reihe von AE-MDB Crashversuchen mit unterschiedlichen Fahrzeuggrößen und –massen auf deren Anwendbarkeit für ein mögliches zukünftiges Far Side Szenarium. Die Pulscharakteristika dieser Versuche und der Anspruch ein relevantes ΔV von 41km/h abzubilden, führten zum Entwurf eines synthetischen Far Side Pulses, Bild 7.

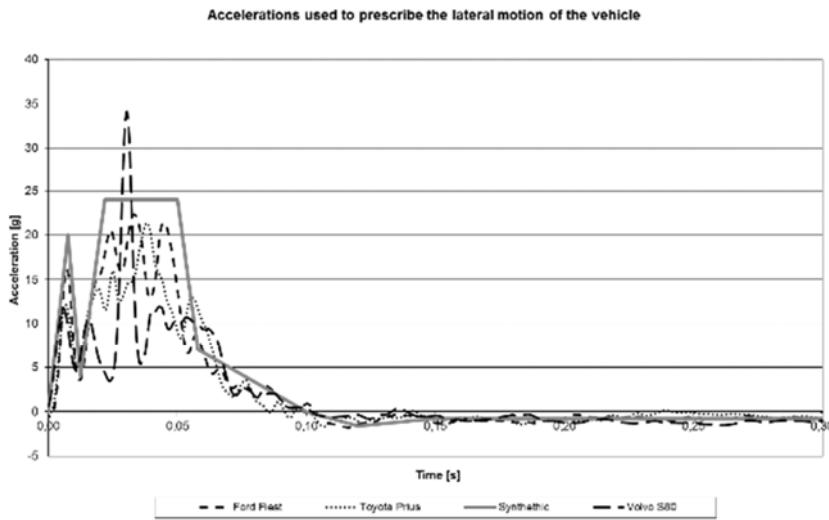


Bild 7: Aprosys Far Side Pulse [4]

Vergleicht man diesen Vorschlag mit typischen Pulsen aus dem Pfahlcrashlastfall zeigt sich dort ein niedriges Beschleunigungsniveau und ein geringeres ΔV . Allerdings findet sich dort auch ein deutlich höheres Intrusionsniveau als das Barrierenaufprall Szenario und diese wiederum kann durch das mögliche Kontaktverletzungsrisiko den Pfahlaufprall zum Auslegungs- lastfall machen. Andererseits ist das APROSYS Gesamt- ΔV zumindest bei den Kleinstfahr- zeugen gleich oder sogar höher als im Pfahllastfall, bei gleichzeitig geringerer Maximalin- trusion. Die geplante Anpassung des Euro NCAP AE-MDB Crashversuches auf 60km/h und 1400kg ab dem Jahr 2020 führt dazu, dass das ΔV des AE-MDB Versuches in den Bereich des APROSYS Vorschlags ansteigt. Gleichzeitig ergibt sich bei Übernahme dieses Fahrzeug- pulses in den Far Side Schlittentest eine höhere Affinität zu den Bewertungscrashversuchen als die Anwendung eines skalierten synthetischen Pulses. Neben dem reinen Beschleuni- gungsverlauf bestimmt der Anprallwinkel die Insassenkinematik und deren Annäherung an In-

terieurteile oder einen anderen Insassen. Wie beschrieben zeigt die Auswertung der verschiedenen Unfalldatenbanken einen Trend zu einer leicht schrägen Aufprallrichtung zwischen 72° und 80°. Dies entspricht den Ergebnissen der Aprosys Daten, in denen unabhängig vom Kollisionspartner mehr als 53 % der Kollisionen mit Bereich der Aufprallrichtung „2“ oder „3“ (im Uhrzeigersinn) lagen. Diese abzubildende Schrägstellung entspricht einem 75° Pfahlaufprall des Euro NCAP, US-NCAP oder ECE R.135.

Im zukünftigen Far Side Schlittenaufbau wird voraussichtlich der Hauptparameter einer 75° schrägen Aufprallrichtung den unterschiedlichen Pulscharakteristika aus Fahrzeug-Fahrzeug (AE-MDB 60km/h) und Fahrzeug-Pfahl (32 km/h) Pulsen überlagert.

4. Dummy und Bewertungskriterien

In den zukünftigen Euro NCAP Far-Side Schlittenversuchen soll der WorldSID Dummy als Messinstrument eingesetzt werden. Dieser besitzt nach Untersuchung der EEVC [12] die höchste Biofidelität (Menschähnlichkeit) aller Seitenaufpralldummy. Digges [13] untersuchte die neuesten Dummyvarianten auf eine mögliche Eignung für den Far-Side Lastfall. Digges kommt zu dem Schluss, dass sowohl WorldSID als auch THOR Dummy eine gute Biofidelität bei der Nachstellung menschlicher Kinematiken im Far-Side Lastfall besitzen. Für den THOR Dummy empfiehlt er eine Anpassung der Brustinstrumentierung und der WorldSID sollte seiner Analyse zufolge mit einem „Shield“ für das Schultergelenk verwendet werden, um eine Verfälschung der Kinematiken beim Herausrutschen des Gurtes aus dem Bereich der Schulter zu vermeiden. Dieses beschriebene Risiko der Kinematikveränderung stammt häufig auch aus einer intensiven Interaktionen von Gurt und dem Ärmel des Dummyanzugs. Dieses Risiko kann durch die Nutzung des sogenannten Sleeveless Suit für den WorldSID [14] deutlich reduziert bzw. werden.

Eine gute Abbildung der Far Side Insassenkinematik durch den eingesetzten WorldSID Dummy ist wichtig, da die Verletzungsrisiken im Far Side Lastfall maßgeblich aus der seitlichen Bewegung des Far-Side Insassen in den stoßzugewandten Intrusions-bereich und der möglichen Interaktion mit Interieurteilen oder einem anderen Insassen resultieren. Diese wird dementsprechend bei der Bewertung von Schutzmaßnahmen eine wesentliche Rolle spielen. Zur näheren Bewertung der kinematischen Biofidelität des WorldSID 50AM (WS) eignet sich ein Vergleich mit einem Human Body Model (HBM). Die vorliegende Untersuchung zeigt die Kinematik des GHBMC (Global Human Body Model Consortium) in einem Far Side Lastfall überlagert mit der des WorldSID. Im Direktvergleich zeigt sich für den Kopf eine geringere

laterale Verlagerung beim WorldSID, während das HBM im Vergleich zum WorldSID tendenziell eine geringere Vorverlagerung zeigt.

Insbesondere sind auch Unterschiede in der Körperkinematik zu erkennen, welche auf die durch die vereinfacht als steifes Element (Spinebox) ausgeführte Abbildung der Brust- Wirbelsäule des WorldSID zurückzuführen sind. Dies führt im Vergleich zum HBM zu einer stärkeren Belastung und Deformation der Hals- und Lendenwirbelsäule des WorldSID, im Vergleich zum HBM und sollte bei der Bewertung entsprechend beachtet werden.

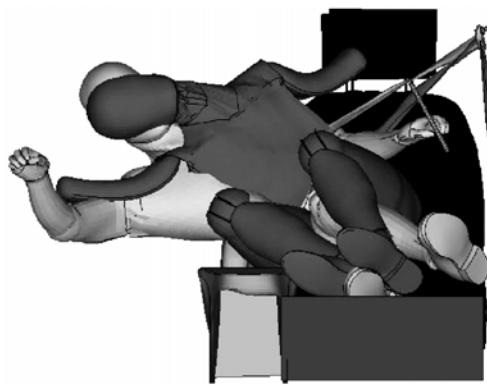


Bild 8: Kinematik WorldSID (sw) – HBM (grau)

In der mittleren lateralen Verlagerung des Oberkörpers (Bild 9), nachdem sich der Torso bereits auf der Mittelkonsole abstützt, kommt es beim HBM zu einem leichten S-Schlag in der Wirbelsäule, wobei das Becken nahezu horizontal verbleibt. Diese Bewegung kann der WorldSID auf Grund der Spinebox nicht abbilden und es kommt zu einer leicht stärkeren Aufstellbewegung des Dummybeckens. Der obere Bereich der Wirbelsäule des HBM bleibt länger vertikal ausgerichtet als die WorldSID Spinebox. Dies führt dazu, dass Hals und Kopf sich etwas früher zur Stoßseite neigen.

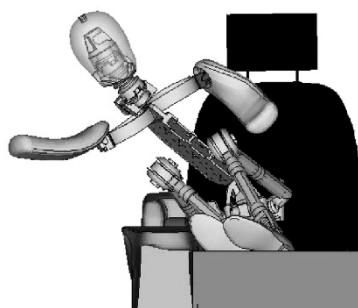


Bild 9: Kinematikvergleich Human Body Model – WorldSID
(WS Thorax- und Abdomenrippen ausgeblendet)

Bei maximaler Verlagerung (Bild 10) zeigen die Wirbelsäulen des HBM und des WorldSID eine sehr ähnliche Ausrichtung, wobei das Becken des WorldSID etwas stärker kippt und sein Hals deutlich stärker abgewinkelt ist. Der Kopf des WorldSID ist dadurch stärker zur Schulter gebeugt.

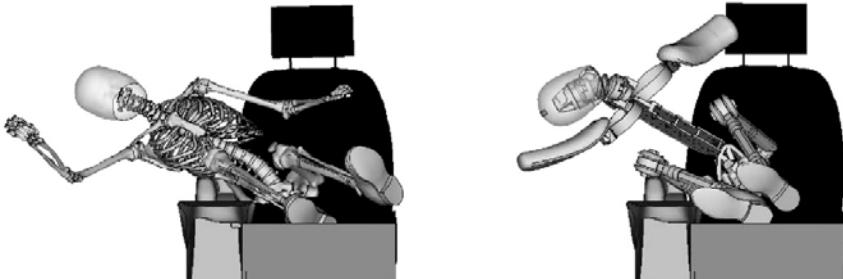


Bild 10: Kinematikvergleich Human Body Model – WorldSID
(WS Thorax- und Abdomenrippen ausgeblendet)

Insgesamt zeigt sich, dass der WorldSID Dummy die seitliche Maximalverlagerung des HBM etwas unterzeichnet (Bild 8), dies aber durch geschickte Wahl von Verlagerungskriterien kompensierbar ist.

Die Auswertung verschiedener Unfalldatenbanken bzgl. Far Side zeigt, dass im Allein-Unfall das Hauptverletzungsrisiko beim Kontakt des Insassen mit Bauteilen des Fahrzeuginnenraums besteht. Beim Unfall mit Fahrer und Beifahrer kommt ein möglicher Kontakt mit dem anderen Insassen hinzu. Es erscheint also sinnvoll, dass beide Risiken in Versuchen mit entsprechenden Pulsen und Verlagerungskriterien gleichermaßen adressiert werden. Darüber hinaus stehen natürlich die klassischen Verletzungskriterien des WorldSID zur Verfügung und es könnten Daten zusätzlicher Meßaufnehmer zur Bewertung Far Side spezifischer Verletzungsmuster dienen.

Für viele der umfangreichen Messmöglichkeiten wurden von der ISO/TC22/WG6 Verletzungswahrscheinlichkeitskurven publiziert. Auf deren Basis hat der EuroNCAP, Nov 2015 [15] für sein aktuelles Bewertungsprotokoll Insassenschutzkriterien für die Körperregionen Kopf, Brust, Abdomen und Becken festgelegt. Die Übertragung dieser Kriterien auf einen neuen Seitenschutzaufschlag „Far-Side“ erscheint logisch und sinnvoll. Die derzeitigen, klassischen Kopfverletzungskriterien (HIC, AC) wurden auf den Anstoß an ein festes Hindernis entwickelt. Da es setupbedingt allerdings unwahrscheinlich ist, dass ein solcher Kontakt auftritt, erscheinen alternative Kopf-/ Gehirnverletzungskriterien sinnvoll. Seit geraumer Zeit wird versucht die Verletzungsrisiken für das Gehirn durch die Einwirkung von translatorischen und rotatorischen

Beschleunigungen zu adressieren. Takhounts, 2013 [16] hat einen solchen Ansatz zur Bewertung möglicher Verletzungen durch Rotationsbewegungen des Kopfes als sogenanntes "brain injury criterion" (BrIC) publiziert. BrIC basiert auf kinematischen Messdaten der Kopfrotationsgeschwindigkeit um die drei Raum-Achsen $\omega_x/\omega_y/\omega_z$ und berechnet aus deren Relation zu kritischen Werten und in Kombination der drei Achsen zu einem Belastungsindex. Die amerikanische Verkehrssicherheitsbehörde NHTSA, 2015 [17] hat die Untersuchungsergebnisse in ihre Erwägungen zur Fortentwicklung des amerikanischen Verbraucherschutztests USNCAP einbezogen und mögliche Grenzwerte zur zukünftigen Bewertung von Gehirnverletzungen im Frontal- und Seitenaufprall definiert. Allerdings pausiert derzeit deren Erörterung auf Grund des Regierungswechsels und dem präsidialen Trump Decree, Jan 2017 [18]. Ein anderes Kriterium zur Erfassung und Bewertung von Gehirnverletzungsrisiken ist das SUFEHM Kriterium, welches an der Universität von Straßburg entwickelt wurde (Willinger, Sahoo, & Deck) [19]. Der Euro NCAP beabsichtigt sich diesen Ansatz anzusehen um die Möglichkeiten zur Bewertung von Gehirnverletzungsrisiken zu untersuchen. Da im Far-Side Lastfall (Single-Occupant-Schlittentest) zumeist keine harten Kontakte auftreten, könnte dies eine interessante Ergänzung sein, um mögliche Hirnverletzungsrisiken für nicht unbeachtet zu lassen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass zur Bewertung des neuen Lastfalles auch neue Kriterien für die Körperbereiche Nacken, Lendenwirbelsäule und Gehirn zumindest untersucht werden. Es erscheint also sinnvoll die Besonderheiten des Lastfalles näher zu betrachten und die Verletzungsbilder der Feldunfälle mit den Meßmöglichkeiten des Dummies abzugleichen. In verschiedenen Versuchen mit PMHS (post mortem human subjects /Leichen) hat Forman et.al. [20] gezeigt, dass es bei Far-Side Versuchen zu Schädigungen des Spinalen Ligament, verschiedenen Brüchen und Verschiebungen im Bereich C6-C7 bis hin zu Ligament Abrissen gekommen ist. Diese Verletzungen bewertet er mit AIS2 Level (AIS 2005 Code). Adäquate Belastungsgrenzwerte für Nacken- und Lendenwirbelsäule könnten die möglichen Verletzungsrisiken in diesen Körperregionen bewertbar und damit optimierbar zu machen.

5. Insassenschutzstrategien und -technologien

Allgemein ist das Ziel des Insassenschutzes im Far-Side Lastfall eine möglichst schonende Begrenzung der seitlichen Verlagerungsbewegung des Insassen, die durch ein Unfallereignis auf der gegenüberliegenden Fahrzeugseite ausgelöst wird. Zusätzlich ist im Falle von mehreren Insassen auf der ersten Sitzreihe eine Bewegungsbegrenzung und eine dämpfende Separation notwendig, um hohe Kontaktkräfte untereinander zu vermeiden. Im Gegensatz zum

klassischen „Near-Side“ Lastfall stehen dem Insassen nur wenige fahrzeugseitige Abstützmöglichkeiten zur Verfügung. Der Bewegungsraum der unteren Extremitäten wird durch den Fußraum und die Mittelkonsole klar begrenzt. Die seitliche Beckenbewegung wird, wenn vorhanden, von einer Mittelkonsole limitiert. Abhängig vom Design reduziert eine ausgeprägte Sitzkontur zumindest teilweise die laterale Torsobewegung, wobei die Schrägstellung des Aufpralls zu einer Vorwärtsbewegung des Insassen führt und die Stützwirkung der Sitzwange begrenzt. Zusätzlich werden beide Körperregionen normalerweise vom Gurtsystem umfasst. Der Beckengurt kann insbesondere in Verbindung mit geeigneter Straffung die seitliche Verlagerung und ein Kippen des Beckens um die Fahrzeug Längsachse begrenzen. Diese Reduktion trägt dazu bei die Gesamtverlagerung des Far Side Insassen zu reduzieren. Dagegen hat der Schultergurt jedoch nur begrenzten Einfluss auf die laterale Oberkörperverlagerung. Eine Straffung kann ebenfalls die Kopplung des Insassen an den Sitz intensivieren, jedoch ein Herausgleiten des Oberkörpers aus dem Schrägschultergurt aber zumeist nicht verhindern.

Neben dem eher geringen Rückhalt über das Gurtsystem empfiehlt sich eine insassengerechte Rückhaltung aus einer flächigen Abstützung von Torso, Schulter und Kopf bestehen. Dabei sollte neben der Bewegungseingrenzung auf den Schutz vor lokalen Kontaktpartnern geachtet werden. Gleichzeitig ist eine große Relativbewegung der Körperregionen insbesondere zwischen Torso und Kopf zu vermeiden. Außerdem sollte für den Interaktionsfall (zwei vordere Insassen) ein flächig ausreichendes Polsterelement mit geeignetem Innendruck und Dimensionen zwischen den Insassen positioniert werden, um einen direkten Kopfkontakt zwischen den Insassen sicher vermeiden zu können.

6. Diskussion

Die Bewertung des Far Side Verletzungsrisikos soll analog der beiden Standardcrashszenarien erfolgen und der gemessene gegenstoßseitige B-Säulen-Puls auf den Versuchsschlitten appliziert werden. Diese Pulse sind Fahrzeug individuell, so dass beide Charakteristika bei der Auswahl der besten Rückhaltestrategie betrachtet werden müssen. Wie bekannt, hängt die laterale Anschubbewegung des Crashfahrzeugs beim Barrierenaufprall stark von dessen Masse ab. Neben einigen Unterschieden in der Deformation ergibt sich aber ein umgekehrter proportionaler Zusammenhang zwischen ΔV und Masse, je schwerer das Fahrzeug desto geringer das ΔV . Im Gegensatz dazu ist die Anprallgeschwindigkeit beim Pfahlaufprall unter Laborbedingungen immer gleich und die kleinen ΔV Unterschiede stammen vor allem aus dem spezifischem Reboundverhalten der Fahrzeuge. Dies bedeutet, dass bei sehr leichten und kleinen Fahrzeugen tendenziell der Puls des Barrierencrashs zum Auslegungslastfall werden

kann, wohin bei größeren Fahrzeugen der Pfahlaufprall die höchsten Anforderungen bzgl. ΔV und Intrusion definiert. Neben dem Fahrzeugsitz und dem Gurtsystem ist eine möglicherweise installierte Mittelkonsole der einzige direkte KontaktPartner des Insassen im Far-Side Lastfall. Im Falle einer festen Installation kann diese zur Begrenzung der Verlagerungsbewegung beitragen. Dabei muss beachtet werden, dass einerseits die Steifigkeit der Konsole nicht zu überhöhten Rippenbelastung führen darf und andererseits eine gute Abstützung des Torsos und eine mangelnde Stützung des Kopfes zu starken Relativbewegungen und einer erhöhten Nackenbelastung führt. Eine geeignete Kopfabstützung kann dieser Belastung begegnen. Gleichzeitig wird durch eine Mittelkonsole auch die laterale Beugung des Torsos relativ zum Becken begrenzt. Die Bewegungsfreiheit des Beckens wird durch zwei bzw. drei Komponenten begrenzt. Vor allem eine mögliche, ausladende Mittelkonsole limitiert den lateralen Bewegungsraum, wobei dieser gleichzeitig durch den Beckengurt eingeschränkt wird. Ohne eine Mittelkonsole erfolgt dieser Rückhalt alleinig aus Sitzflächenwange und Gurt. Außerdem begrenzt der Beckengurt ebenfalls das Kippen des Beckens, insbesondere wenn der Gurt gestrafft wird. Diese Einschränkung des Bewegungsraums beeinflusst sogar über Lendenwirbelsäule, Oberkörper, Nacken bis zum Kopf die Gesamtverlagerungsweite (Exkursion) des Insassen und damit das Risiko auf einen verletzungsverursachenden Interieurkontakt (z.B. des Kopfes). Bei der Definition eines geeigneten Rückhaltekonzeptes müssen folgende drei Punkte vornehmlich adressiert werden. Als erstes sollte der laterale Bewegungsraum des Far Side Insassen

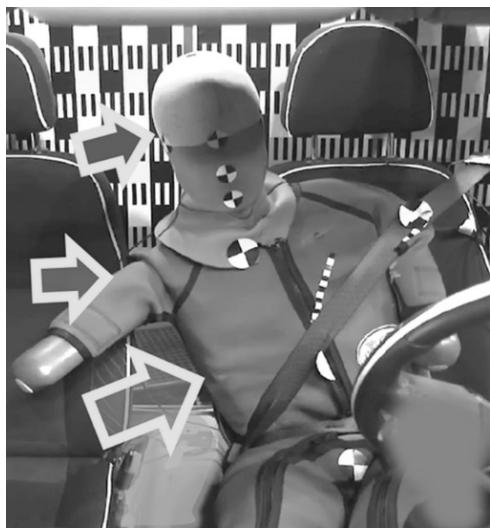


Bild 11: Unterstützung WorldSID

durch eine flächige Abstützung von Torsos und Kopf begrenzt werden, wobei der mögliche maximale Verzögerungsweg zur Limitierung der Insassenbewegung ausgenutzt werden sollte. Zweitens sollten zur Begrenzung von Verletzungsrisiken eine lokale Krafteinleitung in den Insassen vermieden werden und drittens empfiehlt sich die Bildung eines Puffers zur Risikominimierung im Interaktionsfall durch eine optimierte Kombination aus Dicke, Steifigkeit, Energieabsorptionsfähigkeit und Abdeckbereich. Die Stützfunktion für den Torsos kann durch unterschiedliche Maßnahmen erfolgen,

wobei ein aufblasbares Element aus steifen luftgefüllten Kammern mit geeigneter Anbindung an den Sitz vielerlei Vorteile hat. Neben der günstigeren Gestaltung des Abdeckbereiches bei sitzfestem Einbau (Schutzeinheit folgt der vom Insassen gewählten Sitzeinstellung) kann ein solches System auch die Dämpfungsfunktion für den Interaktionsfall übernehmen. Dabei ist zu beachten, dass sich der zeitliche Verlauf der Insassenkinematik deutlich vom klassischen Seitenaufprall unterscheidet und seine Rückhalte- und Schutzfunktion zu einem späteren Zeitpunkt und über einen längeren Zeitraum bereitgestellt werden muss. Die dazu notwendigen technischen Lösungen sind verfügbar. Sie umfassen sowohl gezielt abgedichtete Luftsäcke, die in der Lage sind den Füllgasdruck adäquat lange zu halten und deren Geometrie eine stabile Verbindung zwischen Insassentorso/ -kopf und dem Sitz bietet. Die flächige Anbindung des Insassen erlaubt eine frühzeitige Ankopplung mit geeigneter Rückhaltekraft. Die Füllung des Luftsacks erfolgt mittels eines Gasgenerators, der den notwendigen Innendruck zur richtigen Zeit und auf dem notwendigen Druckniveau zur Verfügung stellen kann.

Solche aufblasbare Rückhaltesysteme auf der Mittelkonsoleseite des Fahrersitzes können genau diesem Ansatz gerecht werden. Far Side Insassenschutzsysteme sind bereits seit einigen Jahren in verschiedeneren Fahrzeugen verfügbar und haben ihre Wirksamkeit bereits im Feldgeschehen unter Beweis stellen können (NHTSA, 2013) [21].

7. Zusammenfassung

Der Far Side Lastfall ist ein Aspekt des Seitenaufpralls bei dem einerseits der Anstoß auf der dem Fahrer abgewandten Fahrzeugseite stattfindet oder andererseits zusätzlich eine Interaktion der beiden vorderen Insassen auftreten kann. In Far Side Aufprallkonfigurationen erleiden ca. 11% aller verletzten Fahrzeuginsassen ihre Verletzungen. Die Verbraucherschutzorganisation Euro NCAP beabsichtigt zukünftig diesen Aspekt bei der Bewertung des Erwachsenen-Insassenschutzes in ihr Beurteilungssystem zu integrieren. Analog zu den Seitencrashtests werden in den Schlittenversuchen sowohl der Barrieren- als auch der Pfahlaufprall abgebildet und die Insassenbelastung mit einem WorldSID Dummy ausgewertet. Neben den am Dummy gemessenen Insassenbelastungen, werden voraussichtlich die Dummy- Verlagerungsbewegungen ein wichtiges Bewertungskriterium sein. Außerdem ist beabsichtigt, neben dem möglichen Verletzungsrisiko mit dem Fahrzeuginterieur auch das Verletzungsrisiko durch die Interaktion mit einem weiteren Insassen durch entsprechende Verlagerungskriterien zu bewerten. Diese Verlagerungskriterien können potenziell eine dominante Rolle in der Bewertung sein. Um diese Kriterien einzuhalten, muss die Verlagerungsbewegung geeignet beschränkt werden, ohne

dabei einzelne Körperbereiche des Insassen / Dummies zu überlasten oder zu vernachlässigen. Eine sinnvolle Möglichkeit für ein solch ausbalanciertes Insassenschutzsystem stellt der Einbau eines speziellen Airbags dar, der in der Lage ist, durch entsprechendes Design eine geeignete Kopplung des Insassen zum Sitz zu erzeugen. Solche Systeme müssen über eine ausreichende Stabilität verfügen, um den Bewegungsraum von Kopf und Torso zu limitieren. Gleichzeitig bildet er ein Dämpfungselement zwischen den Insassen und hilft harte Kontakte zwischen beiden zu vermeiden.

Nach derzeitigem Planungstand des Euro NCAP wird voraussichtlich ab Anfang 2018 eine Beobachtungsphase starten, um die Möglichkeiten und Herausforderungen in aktuellen Neufahrzeugen zu untersuchen, ohne dass diese Ergebnisse bereits in das Bewertungssystem einfließen werden. Die Bewertung des Insassenschutzes im Far Side soll dann ab 2020 in die Gesamt- Sternebewertung einfließen.

Literaturverzeichnis

- [1] Craig Newland et.al. (2008). Stapp Car Crash Journal Vol 52 Nov 2008 p.327-347Craig Newlan. Occupant-to-Occupant Interaction and Impact Injury Risk in Side Impact Crashes, (p. 21).
- [2] Digges, K., Dalmotas, D., "Injuries To Restrained Occupants In Far-Side Crashes", ESV Conference 2001; Paper 351
- [3] Thomas, S., Wiik, R., & Brown, J. (08. 04 2013). The Front Center Airbag. SAE paper 2013-01-1156.
- [4] Feist, F., Gugler, J., & Cuerden, R. (2006). APROSYS Methodology to Address Non Struck Side Injuries Deliverable Report D115A.
- [5] Sander und Boström. (2010). Analysis of far-side impacts in Europe—occurrence, injury outcome and countermeasures. Airbag 2010 Conference.
- [6] Welsh et. al. (2008). EEVC Working Group 21 Report Side Impact Analysis May 2008 WP1 Overview of Side Impacts. EEVC.
- [7] EU Commission. (June 2016). European Commission, Traffic Safety Basic Facts on Car Occupants., European Commission, Directorate General for Transport.
- [8] Valletta Declaration on Road Safety. (2017). Valletta Declaration on Road Safety
- [9] Sandner, V. (2017). Euro NCAP: Adult Occupant Protection. Safety Update 2017. Aschaffenburg: carhs.training.gmbh.

- [10] © Euro NCAP
- [11] Euro NCAP. (June 2015). VEHICLE SPECIFICATION, SPONSORSHIP; TESTING AND RETESTING V7.0. Von <https://www.euroncap.com/en/for-engineers/protocols/general/> abgerufen
- [12] EEVC , E.-S. (2004). EEVC Doc252, Status of side impact dummy developments.
- [13] Digges, K. (2009). A SAFETY RATING FOR FAR-SIDE CRASHES. ESV paper 09-0217.
- [14] Humanetics Service Bulletin WSID 50th Neck Shroud & Suit Options Dec 2016
- [15] EuroNCAP. (Nov 2015). ASSESSMENT PROTOCOL – ADULT OCCUPANT PROTECTION Version 7.0.3. <https://www.euroncap.com/en/for-engineers/protocols/adult-occupant-protection/euro-ncap-assessment-protocol-aop-v703.pdf>.
- [16] Takhounts, E. G. (2013). Development of Brain Injury Criteria (BrIC). Proceedings of the 57th Stapp Car Crash Conference. Orlando Fl.: Stapp Car Crash Conference.
- [17] NHTSA. (2015). NHTSA-2015-0119-0001_New car assessment program.pdf. (S. 71). www.regulations.gov: NHTSA-2015-0119.
- [18] Trump Decree. (Jan Jan 2017). Regulatory Freeze Pending Review. Von FR Doc. 2017-01766 Federal Register. abgerufen
- [19] Willinger, R., Sahoo, D., & Deck, C. (2016). Brain injury tolerance limit based on computation of axonal strain. Accident Analysis and Prevention 92, S. 53-70.
- [20] Forman, J. L., & et.al. (2013). Occupant Kinematics and Shoulder Belt Retention in Far-Side Lateral and Oblique Collisions: A Parametric Study . Stapp Car Crash Journal Vol 57 Nov 2013 pp.343-385 (S. 43). Stapp Association.
- [21] NHTSA. (2013). Special Crash Investigation (SCI) Case CR14014.

Schutz von schwächeren Verkehrsteilnehmern: kommende Anforderungen aus Gesetzgebung und Euro NCAP

Protection of Vulnerable Road Users: Upcoming Requirements from Vehicle Regulation and Euro NCAP

**Dr.-Ing. P. Steiniger, A. Hellmann, M.Sc., Dipl.-Ing. M. Wisch,
Dr. J. Gail, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach**

Zusammenfassung

Systeme der aktiven Fahrzeugsicherheit, insbesondere Notbremsassistenzsysteme und automatische Notbremsysteme, haben in den letzten zwei Dekaden große technische Fortschritte gemacht, und das im Wesentlichen ohne „Druck“ von Gesetzgeber oder unabhängigen Testorganisationen – diese können aber durch passende Anforderungen den Vormarsch der Systeme in die Breite und die Ausnutzung von ansonsten für den Hersteller vielleicht nicht wirtschaftlichen Potentialen unterstützen.

Dieser Bericht hat das Ziel, einen Überblick über die kommenden Anforderungen an Schutzsysteme für schwächere Verkehrsteilnehmer zu geben und diese Anforderungen in den Kontext Euro NCAP (=welchen Einfluss haben diese Anforderungen auf die Gesamtbeurteilung?) sowie Gesetzgebung (schwächere Anforderungen, aber dafür ein Markteintrittskriterium) zu stellen:

- Anforderungen und Testprozeduren für Notbremsassistenz Fahrradunfälle 2018 und 2020 in Euro NCAP,
- Anforderungen und Testprozeduren für Notbremsassistenz bei Nachtunfällen mit Fußgängern in Euro NCAP 2018,
- Anforderungen und Testprozeduren für Abbiegeassistenzsysteme zum Schutz von Radfahrern in Unfallsituationen mit rechtsabbiegenden Lkw innerhalb der Fahrzeugtypgenehmigung.

Abstract

Active vehicle safety systems, such as braking assist systems and automated emergency braking systems, have made tremendous progress over the last two decades, even without pressure from regulators or consumer protection organizations - these two can, however, accelerate a broad introduction of these systems by setting appropriate requirements. This

could as well allow vehicle manufacturers to exploit potentials that would otherwise not be possible on an economic basis.

This paper tries to give an overview over upcoming requirements for Vulnerable Road User protection systems and aims at putting these into the context of Euro NCAP (=what is the influence of these requirements towards the overall assessment?) and vehicle regulations (weaker requirements, but these serve as market entry criteria):

- Requirements and test procedures for Automated Emergency Braking (AEB) for bicycle accidents 2018 and 2020 in Euro NCAP,
- Requirements and test procedures for Automated Emergency Braking (AEB) for nighttime pedestrian accidents 2018 in Euro NCAP,
- Requirements and test procedures for Blind Spot Information Systems (BSIS) to protect bicyclists in accident situations with right-turning trucks in vehicle regulations.

1 Einleitung

Automatische Notbremssysteme für Pkw-Pkw-Unfälle sind bereits seit 2003 Stand der Technik. Anhand einer Sensorik erfassen diese Systeme das vordere Fahrzeugumfeld, bewerten die Kollisionsgefahr und bremsen - falls erforderlich - automatisch.

Die Vermeidung von Unfällen mit schwächeren Verkehrsteilnehmern (Fußgänger oder Fahrrad) durch Systeme der aktiven Fahrzeugsicherheit erfordert technisch deutlich anspruchsvollere Systeme als für Pkw-Pkw-Kollisionen. In letzter Zeit scheinen diese Schwierigkeiten grundsätzlich gelöst zu sein; immer mehr Systeme erhalten in unabhängigen Tests immer bessere Resultate.

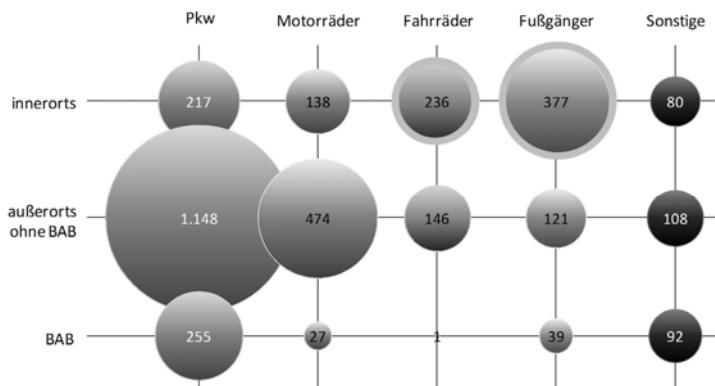


Bild 1: Im Verkehr Getötete nach Verkehrsbeteiligung und Ortslage, Zahlen für D 2015

Parallel dazu geraten Unfälle von Fahrrädern und Fußgängern im Innerortsbereich immer mehr in den Fokus; sie belegen die Plätze 3 (Fahrrad) und 5 (Fußgänger) bei der Anzahl der im Verkehr Getöteten (nach: Landstraßenunfällen von Pkw, Motorrädern, auf Platz 4: Pkw-Unfälle auf Autobahnen), siehe **Bild 1**.

Es ist daher verständlich, dass sowohl Gesetzgeber als auch Verbraucherschutzorganisationen angesichts des technischen Fortschritts höhere Anforderungen an Notbremssysteme zur Vermeidung dieser Unfälle stellen. Die aktuellen und erwarteten Anforderungen werden im Folgenden beschrieben.

2 Anforderungen an Notbremssysteme

Anforderungen für technische Systeme werden zunächst vom Hersteller entwickelt. Zusätzlich dazu gibt es zwei Gruppen von externen Anforderungen: Anforderungen für die Typgenehmigung eines Fahrzeugs, die üblicherweise in Typgenehmigungsvorschriften detailliert werden [1], und Anforderungen, die von unabhängigen Verbraucherschutzorganisationen (zum Beispiel verschiedenen sogenannten "New Car Assessment Programmes", NCAPs, z.B. [2]) gesetzt werden.

Gemeinsame Zielsetzung von Gesetzgeber und Verbraucherschutzorganisationen ist, als notwendig erachtete Anforderungen an Fahrzeugsicherheit und Umweltschutz durchzusetzen. Grundsätzlich unterscheiden sich beide Herangehensweisen aber durch den Fokus:

Technische Vorschriften müssen von allen Fahrzeugen erfüllt werden, die im relevanten Markt zugelassen werden sollen - sind also verpflichtend für alle Fahrzeuge. Entsprechend hoch sind die Hürden für die Einführung der Vorschriften, die in der Regel Mindeststandards fordern. Im Prozess der Definition von Vorschriften Regel sind belastbare Analysen des Nutzen-Kosten-Verhältnisses für die Einführung erforderlich (siehe z.B. [3]). Wenn die Systeme noch nicht breit im Markt eingeführt sind erfordern Nutzen-Kosten-Analysen sinnvolle Annahmen.

Die Erfüllung von Anforderungen des Verbraucherschutzes ist für den Fahrzeughersteller hingegen grundsätzlich freiwillig. Je nach Anerkennung der Verbraucherschutzorganisation in der Öffentlichkeit bedeutet eine gute Bewertung aber einen Verkaufsvorteil (und entsprechend eine schlechte Bewertung einen Nachteil), so dass sich eine gute Verbraucherschutz-Bewertung sicherlich in einigen Lastenheften für einige Fahrzeugbaureihen findet. Über diese Verbindung trägt der Verbraucherschutz - auch ohne technisches Detailverständnis beim Verbraucher - zu einer zunehmenden Verbreitung von Sicherheitssystemen bei.

In der Regel werden die Anforderungen und entsprechenden Testverfahren von den Verbraucherschutzorganisationen (unter Einbeziehung ihrer Mitglieder) im Alleingang festgelegt.

Verbraucherschutztests eignen sich daher insbesondere dafür, technische Innovationen zu fördern, für die ein Nutzen im Unfallgeschehen erwartet wird.

Die technischen Vorschriften und Anforderungen des Verbraucherschutzes ergänzen sich also: während der Verbraucherschutz dafür sorgt, Sicherheitssysteme schnell in eine Vielzahl von Fahrzeugen zu bekommen, sorgt der Gesetzgeber dafür, dass - einige Zeit später - ausnahmslos alle Fahrzeuge ausgerüstet werden müssen.

2.1 Anforderungen aus gesetzliche Vorschriften

Vorschriften für die Fahrzeugtypgenehmigung werden zumindest heute fast nur noch international geregelt. Die europäische Union und viele andere Länder sind Vertragspartner des Abkommens über die Harmonisierung der Fahrzeugvorschriften von 1958, bekannt durch die unter diesem Abkommen entwickelten UN R-Vorschriften (früher: UN ECE-Regelungen). Die Aktivitäten dort werden diskussionsbegleitend transparent kommuniziert [4]. Stimmberechtigte Partner sind dort die Vertragsstaaten, vertreten durch die national zuständigen Ministerien. Derzeit hat nur die Vorschrift UN R13h ("Bedingungen für die Genehmigung von Personenkraftwagen hinsichtlich der Bremsen") einen Bezug zu aktiver Fahrzeugsicherheit für schwächere Verkehrsteilnehmer: dort werden unter anderem Anforderungen an Bremsassistentensysteme definiert. Im November 2017 startet aber gerade eine Arbeitsgruppe der Vereinten Nationen, die Anforderungen für verpflichtende Notbremsysteme mit dem Ziel der schrittweisen verpflichtenden Einführung in den 20er Jahren (vorgesehen sind folgende Zeitpunkte: Pkw-Fußgänger 2024, Pkw-Fahrrad 2026) [5]. Darüber hinaus hat Deutschland einen Vorschlag für ein Lkw-Abbiegeassistentensystem unterbreitet, für den eine Verabschließung als Vorschrift im Oktober 2018 mit dem Ziel der verpflichtenden Einführung zum Jahr 2020 erwartet wird [6].

Diese Aktivitäten im gesetzlichen Bereich profitieren in hohem Maße von Testkonzepten, Testwerkzeugen und Erfahrungen, die im Verbraucherschutz gesammelt wurden.

2.2 Anforderungen aus dem Verbraucherschutz

Wesentliches Merkmal von Versuchen des Verbraucherschutzes ist, dass diese Versuche grundsätzlich ohne fahrzeughersteller- oder systemherstellerspezifisches Wissen durchführbar sein müssen. Da die Ergebnisse den Verkaufserfolg eines Fahrzeugs deutlich beeinflussen können, besteht die Forderung nach einem hochreproduzierbaren Verfahren mit transparenten Bewertungskriterien. Für die Definition der Bewertungskriterien und entsprechenden Anforderungen kann der jeweils lokal gesetzlich verankerte Sicherheitsstandard (in der EU sicherlich ein anderer Stand als beispielsweise im Asiatisch-pazifischen Raum) vorausgesetzt werden: Die Bewertungsmaßstäbe gehen weit darüber hinaus.

Verbraucherschutztests werden weltweit von den New-Car-Assessment-Programmes (NCAP) durchgeführt und bewertet.

Die Testverfahren für Notbremsassistenz der außereuropäischen NCAPS basieren in der Regel auf dem von Euro NCAP entwickelten Testverfahren (siehe [7]), oftmals auch unter Nutzung gleicher Testwerkzeuge, aber Bewertung und Testparameter unterscheiden sich.

2.3 Unfälle schwächerer Verkehrsteilnehmer

Beiden Konzepten (gesetzliche Vorschriften und Verbraucherschutz) ist gemein, dass Anforderungen und Testverfahren aus dem Unfallgeschehen abgeleitet werden.

Unter dem Begriff "Schwächerer Verkehrsteilnehmer" oder auch "Ungeschützter Verkehrsteilnehmer" werden in der Regel verschiedene Verkehrsteilnehmer zusammengefasst:

- Fußgängerinnen und Fußgänger,
- Fahrradfahrerinnen und Fahrradfahrer,
- Motorradfahrerinnen und Motorradfahrer.

Das Unfallgeschehen aller drei Gruppen von Verkehrsteilnehmenden unterscheidet sich deutlich, insbesondere unterscheidet sich aber das Unfallgeschehen von Motorrädern von den beiden anderen Gruppen: Motorräder sind Kraftfahrzeuge, die auf Straßen fahren, Fußgängerinnen und Fußgänger bewegen sich üblicherweise auf dem Bürgersteig, Fahrräder - sofern vorhanden - auf Fahrradwegen. Unfälle unter Beteiligung von Motorrädern werden daher im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

2.3.1 Unfälle zwischen Pkw und Fußgängern

Im Rahmen des FP7-Forschungsprojekts "AsPeCSS" [8] wurden in-depth und nationale Verkehrsunfalldaten aus verschiedenen europäischen Ländern (speziell Deutschland und Großbritannien) hinsichtlich Kollisionen zwischen PKW und Fußgängern untersucht und weitere Detailanalysen durchgeführt, die sich grob zu folgenden Themenfeldern zusammenfassen lassen:

- Aggregation von Verkehrsunfalldaten zwischen PKW und Fußgänger nach Unfalltyp bzw. Anprallkonfiguration zu Unfallszenarien (Accident Scenarios)
- Anteile der verletzten Fußgänger nach Verletzungsschweren
- Dunkelheit (z.B. Häufigkeit des Eintretens; einhergehende Sicht einschränkungen durch Witterungsverhältnisse)
- Untersuchung bedeutsamer Unfallparameter (z.B. Fußgänger-Alter; Fußgänger-Anprallpunkte; PKW-Detailinformationen wie Ausgangs- und Kollisionsgeschwindigkeit, Bremsverhalten)

Die Daten wurden im Rahmen des H2020-Projekts PROSPECT für Deutschland aktualisiert [9].

Tabelle 1: Überblick zu Pkw-Fußgänger-Unfallszenarien in städtischen und nicht-städtischen Regionen nach Verletzungsschweren und Lichtverhältnissen

Accident Scenarios	ID	Description	Light condition	Fatalities	KSI	All
	1	Crossing a straight road from near-side; No obstruction	All (day/dark)	23 (7/16)	23 (14/9)	19 (13/6)
	2	Crossing a straight road from off-side; No obstruction	All (day/dark)	37 (5/32)	22 (9/13)	16 (9/7)
	3	Crossing at a junction from the near- or off-side; vehicle turning across traffic	All (day/dark)	3 (2/1)	11 (5/6)	11 (5/6)
	4	Crossing at a junction from the near- or off-side; vehicle not turning across traffic	All (day/dark)	1 (0.5/0.5)	3 (1/2)	5 (3/2)
	5	Crossing a straight road from near-side; With obstruction	All (day/dark)	5 (3/2)	10 (8/2)	7 (6/1)
	6	Crossing a straight road from off-side; With obstruction	All (day/dark)	3 (1/2)	6 (5/1)	5 (4/1)
	7	Along the carriageway on a straight road; No obstruction	All (day/dark)	11 (2/9)	5 (2/3)	7 (5/2)
	8	Driving backwards	All (day/dark)	4 (3/1)	6 (5/1)	7 (6/1)
	0	Others	All (day/dark)	13 (5/8)	14 (9/5)	23 (17/6)
Urban and non-urban		TOTAL	All (day/dark)	100 (28/72)	100 (58/42)	100 (65/35)

Als Ergebnis der Unfalldatenanalyse stellten sich sieben Unfallszenarios, dargestellt in **Tabelle 1**, heraus. Dargestellt sind repräsentative Unfallzahlen aus fünf deutschen Bundesländern, 2009-2014, 54.241 Unfälle mit 526 getöteten, 13.183 schwer- und 40.440 leichtverletzten Fußgängern; Fußgängerverletzungsschwere in Prozentangaben.

Deutlich wird, dass am häufigsten kreuzende Konfliktsituationen eintreten, die zu Kollisionen zwischen einem Fußgänger und einem PKW führten. Kleinere Anteile fielen dabei auf sichtverdeckte Situationen sowie Kollisionen im Längsverkehr (Fußgänger lief entlang der Straße). Unfälle im Kreuzungsbereich treten nicht häufig auf, und Unfälle beim Rückwärtsfahren oder Parken wurden von den Datensätzen ausgeschlossen, da sie nur eine sehr geringe Relevanz hinsichtlich yorausschauender Fußgängerschutzsysteme aufweisen.

Auffallend ist, dass insbesondere in Bezug auf die Getöteten nächtliche Unfälle eine besondere Relevanz haben. Nächtliche Unfälle unterscheiden sich auch in ihrer Struktur: Nachts sind Szenarien in Längsrichtung deutlich relevanter als tagsüber, und generell ist das Risiko,

nachts Opfer eines Verkehrsunfalls zu werden, auch im Hinblick auf die geringere Verkehrs-dichte, größer als tagsüber.

2.3.2 Unfälle zwischen Pkw und Fahrradfahrer

Die Unfallstruktur von Fahrrad-Pkw-Unfällen wurde im Rahmen des Forschungsprojektes "CATS" [10] anhand einer vergleichbaren Methodik untersucht.

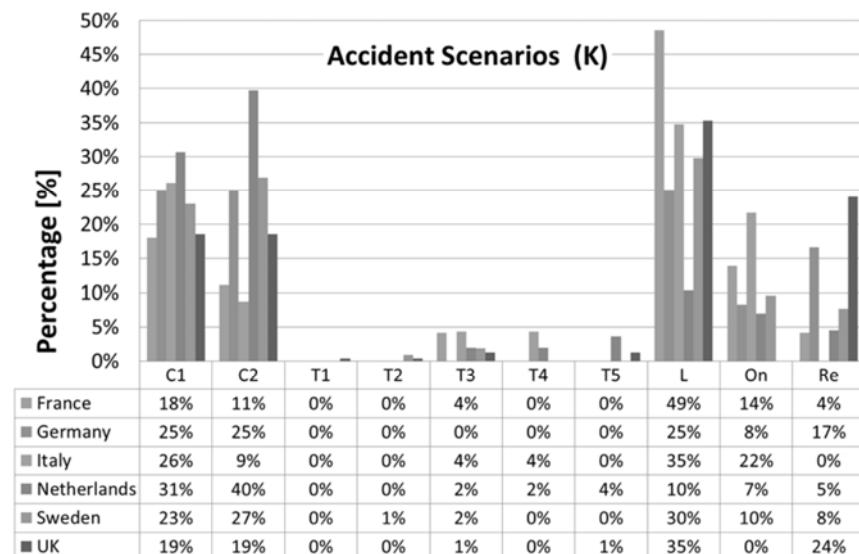


Bild 2: Unfallstruktur von tödlichen Fahrradunfällen im europäischen Vergleich, aus [10 CATS]. Dargestellt sind kreuzende Szenarien (C1, C2), Kreuzungsszenarien (T1 - T5), Längsszenarien (L), Szenarien, bei denen sich die Kollisionspartner entgegenkommen (On) und Rest (Re).

Im Gegensatz zu Fußgängerunfällen ist die verfügbare Infrastruktur innerhalb der europäischen Union sehr unterschiedlich: Während z.B. in den Niederlanden, aber teilweise auch in Skandinavien eine gut ausgebauten Infrastruktur mit Radwegen existiert, fahren Radfahrer beispielsweise in England und Südeuropa überwiegend auf der Fahrbahn. Ziel der Analyse war es daher, die Struktur der Unfälle auch zwischen verschiedenen Mitgliedsstaaten der EU zu vergleichen.

Im Ergebnis zeigen sich nicht die erwarteten deutlichen Unterschiede. Ganz überwiegend dominieren auch bei den Fahrradunfällen kreuzende Situationen (C1, C2 in **Bild 2**), gefolgt von Unfällen im Längsverkehr (L) und Begegnungsverkehr (On).

Die Verteilung der Unfälle hinsichtlich Tageszeit (s. [10], S. 16) zeigt, dass zwar das Risiko, nachts bei einem Fahrradunfall getötet zu werden, höher ist; allerdings findet die überwiegende Mehrzahl der Unfälle tagsüber statt, die Nacht ist damit nicht derart dominant wie bei Pkw-Fußgänger-Unfällen.

2.3.3 Unfälle zwischen Lkw und Radfahrern

Unfälle unter gleichzeitiger Beteiligung von Lkw und Radfahrern sind häufig folgenschwer. Abbiegeunfälle gehören dabei zu den schweren Radfahrerunfällen. Besonders schwerwiegend sind die Folgen für den Radfahrer, wenn dieser in einer „Toten Winkel“-Situation mit einem Güterkraftfahrzeug kollidiert. Eine Hochrechnung (Potenzialabschätzung) auf das Bundesgebiet für das Jahr 2012 (dem Jahr, für das eine Detailuntersuchung durchgeführt wurde) ergab, dass rund 640 Unfälle mit Personenschaden mit 23 getöteten und weiteren 118 schwer-verletzten Radfahrern auf die Unfallsituation zwischen rechtsabbiegenden Güterkraftfahrzeugen und geradeausfahrenden Radfahrern, die in einem Zusammenhang mit dem „Toten Winkel“ eines Güterkraftfahrzeuges stehen können, zurückzuführen sind. Damit stellen diese Unfälle 1 % aller Radfahrerunfälle sowie rund 6 % der insgesamt 406 getöteten Radfahrer im Jahre 2012. Die schweren „Toten Winkel“-Unfälle sind überwiegend geprägt von schweren Güterkraftfahrzeugen mit zulässigem Gesamtgewicht über 7,5 t sowie Sattelschleppern [11].

Eine Auswertung der Unfalldatenbank GIDAS zeigt, dass die Unfälle überwiegend im Geschwindigkeitsbereich bis etwa 20 km/h passieren [12].

2.4 Technische Grenzen

Idealerweise sollen Testfälle so definiert sein, dass alle Unfallsituationen abgedeckt werden. Es gibt aber - neben vielen andern - zwei entscheidende technische Grenzen, die die Fähigkeiten von Notbremssystemen einschränken: Der Sensorwinkel und die Frage nach最早 möglichem Bremsbeginn.

Gerade Unfälle zwischen Pkw und schwächeren Verkehrsteilnehmern sind im Wesentlichen Unfälle im Querverkehr. Während im Längsverkehr die Bewegungsrichtungen der beteiligten Verkehrsteilnehmer parallel sind und der Winkel zwischen Zielobjekt und Fahrzeulgängsachse in der Regel sehr klein ist, sind die Bewegungsrichtungen im Querverkehr annähernd senkrecht zueinander. Je schneller der schwache Verkehrsteilnehmer, desto flacher der Winkel, unter dem sich die Kollisionspartner nähern, und desto größer der erforderliche Sensorblickwinkel, siehe Bild 3.

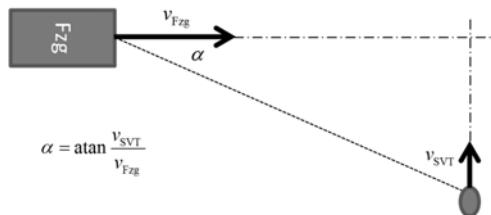


Bild 3: Erforderlicher Sensorsichtwinkel bei Querverkehrsunfällen

Die Ermittlung des Bremsbeginns erfordert im Längsverkehr die Abwägung, ob ein Unfall möglicherweise durch ein Ausweichmanöver vermieden werden könnte, und für den Querverkehr zusätzlich eine Einschätzung, ab welchem seitlichen Abstand ein schwächerer Verkehrsteilnehmer bei unkritischem Verhalten zum Stehen kommen würde. Daraus ergibt sich, dass der Bremsbeginn keinesfalls beliebig früh, und damit - auch bei ausreichender Sensorabdeckung - keinesfalls alle Unfälle vermieden werden können.

Beide Randbedingungen fließen in die Entwicklung von Anforderungen und Testfällen ein.

3 Testkonzept

Um externe Anforderungen an Sicherheitssysteme in einen internen Produktentwicklungsprozess eines unabhängigen Industrieunternehmens zu integrieren ist es erforderlich, passend zu den jeweiligen Anforderungen Validierungstests zu definieren (dies gilt für alle Arten von externen Anforderungen). Dazu werden üblicherweise Tests mit Bestehenskriterien spezifiziert. Im konkreten Fall stellen die Tests aus dem Unfallgeschehen abgeleitete Szenarien nach und bewerten den Erfolg, beispielsweise anhand der im jeweiligen Versuch gemessenen Geschwindigkeitsreduktion durch eine automatisierte Bremsung. Auch die jeweils anzulegenden Bestehenskriterien sind in der Regel aus dem Unfallgeschehen abgeleitet.

3.1 Versuchsmethodik

Das in Abschnitt 2.3 skizzierte Unfallgeschehen lässt sich grundsätzlich in drei verschiedene Konfigurationen aufteilen:

- Szenarien im Querverkehr: schwächerer Verkehrsteilnehmer und Pkw bewegen sich orthogonal zueinander, in der Form, das ohne eine Intervention eines Sicherheitssystems eine Kollision erfolgen würde,
- Szenarien im Längsverkehr: schwächerer Verkehrsteilnehmer und Pkw bewegen sich in gleicher Richtung, ebenfalls so, dass ohne Intervention eine Kollision stattfinden würde,
- Abbiegeszenarien: Fahrrad und Lkw bewegen sich zunächst durch einen seitlichen Abstand getrennt in gleicher Richtung; zu einem zu spezifizierenden Zeitpunkt be-

ginn der Lkw einen Abbiegevorgang. Die Parameter sind so gewählt, dass ohne Intervention eine Kollision zwischen Fahrrad und einem näher zu spezifizierenden Punkt des Lkw stattfinden würde.

Zur Durchführung dieser Versuche sind dann grundsätzlich erforderlich:

- Zielobjekte (Dummies), die soweit möglich in ihren relevanten Eigenschaften Fahrrad-Fahrer-Kombination und Fußgänger entsprechen,
- Bewegungssysteme, mit denen die Zielobjekte auf einer unterschiedlich langen, geraden Strecke und mit einem spezifizierten Geschwindigkeitsprofil bewegt werden können,
- Messtechnik, um die eventuelle Intervention eines Sicherheitssystems zu bestimmen,
- eine Methode, um das Versuchsfahrzeug innerhalb bestimmter Toleranzen im Versuch zu bewegen.

Für einzelne Versucharten sind zusätzlich noch Verdeckungsobjekte sowie ein mit realer Straßenbeleuchtung vergleichbares Beleuchtungssystem für Nachtversuche erforderlich.

3.2 Zielobjekte

Zielobjekte zur Repräsentation von Fußgängern müssen für alle relevanten Sensoren als Person erkennbar sein, insbesondere müssen die Zielobjekte optisch und in ihrer RADAR-Rückstrahlung passen. Dabei müssen sie leicht sein, dürfen dem Versuchsfahrzeug bei Anprallen keine deutlichen Schäden zufügen, und sie müssen mehrmals verwendbar sein. Für ein natürliches Erscheinungsbild für optische und RADAR-Sensoren erforderlich ist eine Bewegung mindestens der Beine (beziehungsweise - für das Fahrrad - der Räder) passend zur Geschwindigkeit.

Die bei Euro NCAP [7] spezifizierten Zielobjekte für Erwachsenen, Kind und Fahrrad-Fahrer erfüllen alle genannten Anforderungen, siehe **Bild 4**. Die Bewegung der Beine des Fußgängers erfolgt über Modellbauservos, die von einem Mikrocontroller passend angesteuert werden; die Räder des Fahrrades werden durch Reibung vom Boden angetrieben.



Bild 4: Testobjekte Erwachsener (links), Kind (Mitte), Fahrrad und Fahrer (rechts) [7]

Exakte Bemaßungen der Zielobjekte sind ebenfalls in [7] angegeben; das Zielobjekt des Erwachsenen (ebenfalls als Fahrradfahrer verwendet) repräsentiert einen 50%-Mann, das Kinder-Zielobjekt ein 6-jähriges Kind. Das Fahrrad ähnelt einem klassischen Hollandrad. Alle Zielobjekte wurden begleitend zum Entwicklungsprozess von Fahrzeug- und Sensorherstellern auf ihre Eigenschaften überprüft.

3.3 Bewegungsanlage

Bei den Euro NCAP-Laboren werden derzeit zwei verschiedene Bewegungssysteme eingesetzt, die beide den gleichen Ansatz verfolgen: Der Träger für das Zielobjekt wird durch einen (je nach Versuchsart) einzeln oder doppelt angebrachten Zahnriemen bewegt. Die Steuerung der Zielobjekt-Bewegung erfolgt üblicherweise unter Berücksichtigung der Fahrzeugbewegung; entweder geschieht dies über Lichtschranken oder über eine drahtlose Übertragung von Positionsdaten.



Bild 5: 4a Surfboard (www.4activesystems.at/en/) als Beispiel für eine Bewegungsanlage, Aufbau mit doppeltem (links) und einzelnen (rechts) Riemen

3.4 Beleuchtung

Teile der Nachtversuche (nur Fußgänger) werden bei künstlicher Beleuchtung durchgeführt. Anhand von Messungen der Leuchtdichte an realen Unfallstellen und unter Beachtung einschlägiger Richtlinien für die Straßenbeleuchtung wurde eine Spezifikation für Leuchtenprodukt, Leuchtdichte und Aufstellort definiert [7].

Zum Einsatz kommen - zumindest bei allen Euro NCAP-Laboren - fünf Leuchten des Typs Schuch, 47_LED (47 2403 ABX CL), die in einer Höhe von ca. 5 Metern über der Fahrbahn, untereinander mit einem Abstand von 25 Metern und 4 m neben der Pkw-Bewegungssachse aufgestellt werden, siehe **Bild 6**. Ein Beispiel des Versuchsaufbaus ist in **Bild 5** (links) zu sehen. Detaillierte Spezifikationen finden sich in [7].

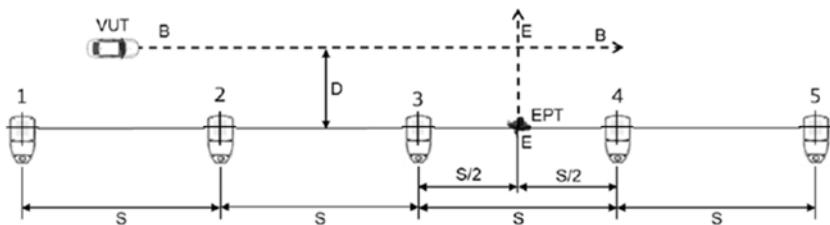


Bild 6: Positionierung der Leuchten für Nachtests, Abstand s: 25m, Abstand D: 4 m [7]

4 Derzeitige und zukünftige Tests im Verbraucherschutz

Die Gesamtbewertung eines Fahrzeugs in Euro NCAP (bewertet wird stets nur die minimale Serienausstattung eines Fahrzeugs in EU-28) ergibt sich aus den Teilbewertungen in vier verschiedenen Bereichen (Insassenschutz, Fußgängerschutz, Kinderschutz, Sicherheitsassistenz) insofern, als dass je Sternewertung in jedem dieser Bereiche eine Mindestpunktzahl erreicht werden muss. Derzeit (2016/2017) sind im Bereich Fußgängerschutz 12,5% der Punkte durch aktive Sicherheit erreichbar; ab 2018 werden dies 25% der Punkte sein. Zur Einordnung: Für eine Bewertung "5 Sterne" ist das Erreichen von 60% im Bereich Fußgängerschutz erforderlich. Notbremssysteme haben daher einen großen Einfluss auf die Sternenbewertung.

Die Parameter der Testdurchführung sind in **Tabelle 2** angegeben, eine Beispieldiagramm für den Versuchsaufbau in **Bild 7**.

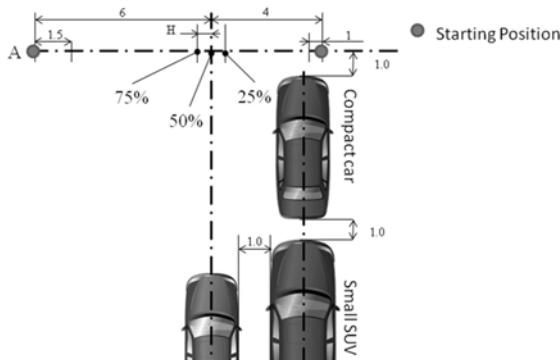


Bild 7: Beispiel Skizze Versuchsaufbau für Fußgänger-Versuche (dargestellt mit Verdeckungsfahrzeugen) nach [7]. Bei Fahrradversuchen wird das Fahrrad ab einem Seitenabstand von 17 m erscheinen.

Bei den Versuchen, wie sie in Euro NCAP durchgeführt werden, sind extrem kleine Toleranzen für Geschwindigkeits- und Pfadabweichung des Versuchsfahrzeugs definiert. Zur Einhaltung dieser Toleranzen ist es erforderlich, die Tests unter Nutzung von Fahrrobotern durchzuführen.

Die angegebenen Bereiche der Fahrzeug-Ausgangsgeschwindigkeit sind leiten sich, wie die Szenarien, aus dem Unfallgeschehen ab. Innerhalb des Bereichs werden alle durch 5 ganz-zahlig teilbaren Fahrgeschwindigkeiten geprüft, ab einer Geschwindigkeitsschwelle von 45 km/h in der Regel aber nur dann, wenn die vorhergehende Fahrgeschwindigkeit zu einer Geschwindigkeitsreduktion größer als 20 km/h geführt hat. Eine vollständige Durchführung des Versuchsprogramms erfordert 78 einzelne, gültige Fahrten.

Teilweise (bei allen Längsszenarien mit Anprallpunkt bei 25% der Fahrzeugbreite) wird nicht die Geschwindigkeitsreduktion geprüft, sondern geprüft, ob eine Fahrerwarnung mindestens 1,7 Sekunden vor dem erwarteten Aufprall gegeben wurde. Wenn das der Fall ist, dann wird davon ausgegangen, dass ein solcher Unfall durch manuelles Ausweichen noch rechtzeitig vermieden werden kann.

Tabelle 2: Übersicht über Testszenarien in EuroNCAP nach [7]

NCAP-Name ¹	CPNA25	CPNA75	CPFA	CPNC	CPLA25	CPLA50	CBNA50	CBLA25	CBLA50
Ziel	Erw.	Erw.	Erw.	Kind	Erw.	Erw.	Fahrrad	Fahrrad	Fahrrad
Anprallpunkt	25%	75%	50%	50%	25%	50%	50%	25%	50%
Richtung	Quer	Quer	Quer	Quer	Längs	Längs	Quer	Quer	Längs
v_{Ziel} [km/h]	5	5	8	5	5	5	15	20	15
$v_{Fahrzeug}$ [km/h]	20-60 km/h	20-60 km/h	20-60 km/h	20-60 km/h	50-80 km/h	20-60 km/h	20-60 km/h	50-80 km/h	25-60 km/h
Bewertungskriterium	Red. d. Geschw.	Red. d. Geschw.	Red. d. Geschw.	Red. d. Geschw.	Warnzeit	Red. d. Geschw.	Red. d. Geschw.	Warnzeit	Red. d. Geschw.
Startseite (Rechtsverkehr)	Rechts	Rechts	Links	Rechts	-	-	Rechts	-	-
Tag	2016	2016	2016	2016	2018	2018	2018	2018	2018
Nacht	2018	2018	-	-	2018	2018	-	-	-
max. Anzahl	9	9	9	9	7	9	9	7	8

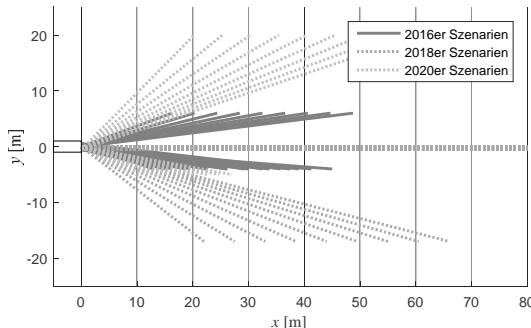


Bild 8: Bewegung der Zielobjekte relativ zum Fahrzeug für Szenarien (größter Winkel 2018: 37°, größter Winkel 2020: 45°)

5 Geplante Tests zur Abbiegeassistenz für Lkw

Deutschland hat einen Vorschlag für Anforderungen an ein Abbiegeassistenzsystem bei den Vereinten Nationen eingereicht [6]. Dort werden - unter Nutzung des bereits aus dem Verbraucherschutz bekannten Zielobjektes und der dort verwendeten Bewegungsrichtung - bisher 12 verschiedene Testfälle definiert. Der Versuchsaufbau ist in **Bild 9** dargestellt.

¹ Nomenklatur: C Car, P Pedestrian, B Bike, A Adult, N/F Near/Far Side, L - Longitudinal, C (hinten) Child, Zahlenangabe: Anprallposition in % bezogen auf die Fahrzeugbreite ohne Spiegel.

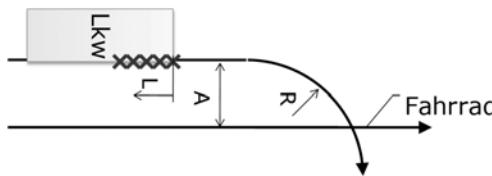


Bild 9: Versuchsaufbau Lkw-Fahrrad-Tests: Abstand der ursprünglichen Bewegungspfade A, Kurvenradius R, Abstand des Anprallpunktes von der Fahrzeugfront L

Aus dem Unfallgeschehen ist bekannt, dass die Unfälle überwiegend bei guten äußeren Bedingungen geschehen (Tags, gutes Wetter, keine Sichtverdeckung zwischen Lkw und Fahrrad), sowie dass sich - zumindest in Deutschland - die Verkehrsteilnehmer im Verlauf annähernd konstant bewegen.

Aus der Unfallanalyse ergeben sich folgende Parameterbereiche:

- Fahrgeschwindigkeit Lkw: $v_{Lkw} = 10$ bis 20 km/h
- Fahrgeschwindigkeit Fahrrad: $v_{Rad} = 10$ bis 20 km/h
- seitlicher Abstand der Fahrradtrajektorie zur Trajektorie der rechten Kante des Lkw (vor Beginn des Abbiegevorgangs): $A = 1,5$ bis $4,5$ m
- Kurvenradius des Abbiegevorgangs: $R = 5, 10, 25$ m
- Anprallstelle des Fahrrads am Lkw: $L = 0$ bis 6 m

Eine systematische Variation dieser Parameter beschreibt den Bereich, in dem sich Lkw und Fahrrad bewegen können, und damit auch die erforderlichen Sensorsichtbereiche. Für das Vorschriftstestverfahren werden gezielt Parameterkombinationen so ausgewählt, dass der Sensorsichtbereich mit möglichst wenig Testfällen möglichst gut abgedeckt wird.

Im Gegensatz zu Tests im Verbraucherschutz werden die Fahrversuche hier von menschlichen Versuchsfahrern gefahren: Bei Lkw hängt die exakt gefahrene Trajektorie stark vom Fahrzeugtyp und der Konfiguration (z.B.: Sattelzug mit oder ohne Auflieger) ab. Daher wird für die Fahrversuche ein Korridor vorgegeben, der im Verlauf des Versuchs eingehalten werden muss, siehe **Bild 10**.

Als Bestehenskriterium für diese Versuchsart wird derzeit vorgeschlagen, dass eine Fahrerinformation so früh gegeben wird, dass der Lkw noch rechtzeitig und komfortabel (mit einer Reaktionszeit von 1,2 Sekunden und einer Verzögerung von 5 m/s 2) zum Stehen kommen kann. Eine Information ist, im Gegensatz zu einer Fahrerwarnung, niedrigschwellig und idealerweise nicht störend - die Analyse der Unfalldaten zeigt nämlich, dass in realen Verkehrssituationen diese Information bereits vor Einleitung des Abbiegevorgangs gegeben werden

muss - effektiv wird also eine Information für jedes überholte oder überholende Fahrrad gegeben werden. Ein hochintensives, störendes Warngeräusch wäre für eine solche Systemauslegung nicht akzeptabel.

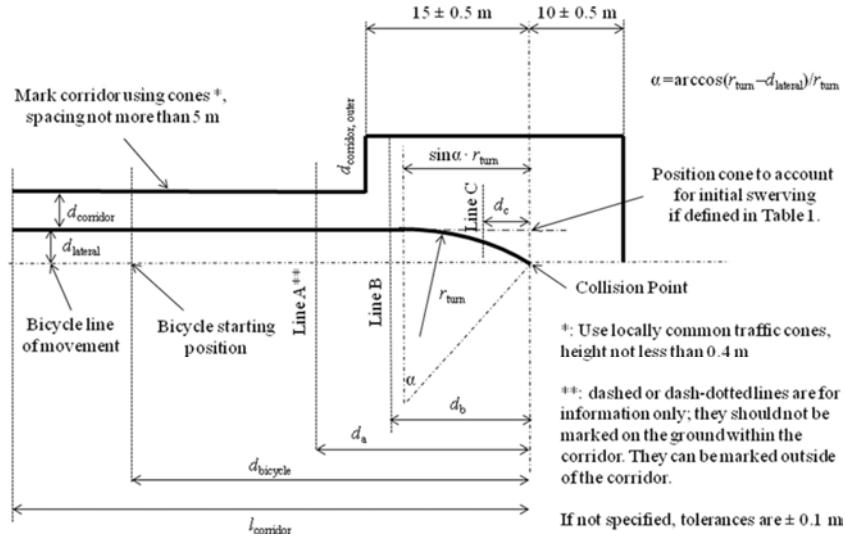


Bild 10: Versuchsdurchführung Fahrversuche zur Abbiegeassistenz [6]

6 Ausblick

Nicht nur in Deutschland, auch in der Europäischen Kommission werden Unfälle zwischen rechtsabbiegenden Lkw und Fahrrädern als drängendes Problem wahrgenommen. Dementsprechend wird erwartet, dass entsprechende Systeme zu einem frühen Zeitpunkt - beispielsweise im Rahmen der ab 2020 greifenden Überarbeitung der General Safety Regulation der EU [13] - verpflichtend eingeführt werden. Dafür ist eine Verabschiedung der Vorschrift in den Fachgremien der Vereinten Nationen im Oktober nächsten Jahres erforderlich. Dieser Zeitplan erscheint realistisch.

Tests von Notbremssystemen zum Schutz von Fußgängern sind bereits seit 2016 Teil des Versuchsprogramms im Verbraucherschutz, zum Beispiel bei Euro NCAP. Ab 2018 werden die bisherigen Tests mit kreuzenden Fußgängern um Nachttests und Tests von Längsszenarien ergänzt; ebenfalls ab 2018 werden erstmals Notbremssysteme zum Schutz von Fahrradfahrern bewertet. Es ist daher davon auszugehen, dass die Bewertungsverfahren ausreichend robust und anerkannt sind.

Unfälle mit Fußgängern und Fahrrädern sind ein dominierender Unfalltyp in der Europäischen Union - eine Verbesserung der Situation ist Ziel der Politik. Aus diesem Grund hat die Europäische Kommission angekündigt, Notbremssysteme zum Schutz von Fußgängern ab 2024 und zum Schutz von Radfahrern ab 2026 verpflichtend zu machen. Die entsprechende Vorschriftenentwicklung beginnt aktuell, und wird im Wesentlichen auf der Nutzung von vorhandenen Testverfahren - sicherlich aber mit anderen Bestehenskriterien - beruhen [13], [5]. Während so die "einfachen" Notbremsassistentensysteme in der Vorschriftenwelt ankommen werden, wird bei Euro NCAP an der Bewertung komplexerer Systeme gearbeitet. Bereits kommuniziert ist, dass anspruchsvollere Fahrradunfälle (mit größeren Fahrradgeschwindigkeiten und / oder späterer Sichtbarkeit) und Fußgängerunfälle im Kreuzungsbereich in den nächsten Jahren in das Versuchsprogramm eingeführt werden.

Allles in allem wird daher erwartet, dass sowohl durch die Abdeckung im Verbraucherschutz (Forderung nach anspruchsvollen Systemen) als auch durch die verpflichtende Einführung einfacherer Systeme für Fahrzeuge das Sicherheitsniveau für schwächere Verkehrsteilnehmer in den nächsten Jahren massiv ansteigen wird.

7 Literatur

- [1] Europäische Kommission: "*Richtlinie 2007/46/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeughängern [...]*". EU Law and Publications: Brüssel, 2007.
- [2] Euro NCAP: "About Euro NCAP". Verfügbar unter <https://www.euroncap.com/en/about-euro-ncap/>.
- [3] Seidl M et al: "In depth cost-effectiveness analysis for the identified measures and features regarding the way forward for EU vehicle safety. Final Report". EU Law and Publications: Brüssel, 2017.
- [4] UN ECE WP.29, verfügbar unter <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs.html>
- [5] IWG AEBS: "Revised ToR and RoP of the IWG on AEBS". Dokument GRRF-84-03.
- [6] Deutschland: "Proposal for a new Regulation on uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to the Blind Spot Information System". Dokument ECE/TRANS/WP.29/GRSG/2017/11
- [7] Euro NCAP: "Test Protocol - AEB VRU Systems, Version 2.0.1, August 2017". Euro NCAP: Leuven, 2017.
- [8] Wisch M, Seiniger P, Pastor C, Edwards M, Visvikis C: "*Scenarios and weighting factors for pre-crash assessment of integrated pedestrian safety systems*". AsPeCSS D1.1, verfügbar unter www.AsPeCSS-project.eu, 2013.
- [9] Wisch M, Lerner M, et al: "*Accident Analysis, Naturalistic Driving Studies and Project Implications - part A (Deliverable 2.1)*". European Commission FP8 Horizon 2020, PROSPECT, GA No 634149, 2016.
- [10] Op den Camp O et al: "*CATS Final project summary report*", Helmond, 2016. Verfügbar unter <http://publications.tno.nl/publication/34622256/JhJVII/TNO-2016-R10921.pdf>.
- [11] Schreck B, Pöppel-Decker M: "*Unfallgeschehen zwischen rechtsabbiegenden Güterkraftfahrzeugen und geradeausfahrenden Radfahrern*", In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit 4.2014, Seite 239-242.
- [12] Schreck B & Seiniger P: "*Abbiege-Assistenzsystem für Lkw, Grundlagen für ein Testverfahren*". Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft F104, Bergisch Gladbach, 2014.
- [13] Europäische Kommission: "*Status of the review of the General Safety and Pedestrian Safety Regulations*". Dokument GRRF-83-19.

IIHS Test und Potentiale zur Verbesserung der Verkehrssicherheit

Dipl.-Ing. **Sven Bogdanow**, Dr.-Ing. **Benedikt Kleinert**,
Dr.rer.nat. **Michael Marutzky**, IAV GmbH, Gifhorn

Kurzfassung

Dieser Beitrag befasst sich mit der Fragestellung, welche Test- und Validierungsmethoden für die Scheinwerfersysteme der Zukunft als notwendig erachtet werden können und welchen Mehrwert sie zur Steigerung der Verkehrssicherheit haben.

1. Motivation

Zwischen den Jahren 1991 und 2015 konnten unter anderem durch den Einzug neuer Beleuchtungstechnologien und moderner Fahrerassistenzsysteme die Unfälle mit Personenschäden bei Dunkelheit um 41,73% von 101.289 auf 59.017 reduziert werden. Die Summe der Unfälle mit Personenschäden ist hingegen um 20,6% gefallen (siehe Abbildung 1.1). Zieht man zusätzlich die Zahlen für Unfälle mit Todesfolge heran, wird der Einfluss der immer besseren Technik auf die Fahrzeugsicherheit ersichtlich. Die Unfälle mit Getöteten bei Dunkelheit konnten sogar um 79,3% von 4.903 auf 1.015 reduziert werden, bei einem gesamten Rückgang von 69,5% (siehe Abbildung 1.2).

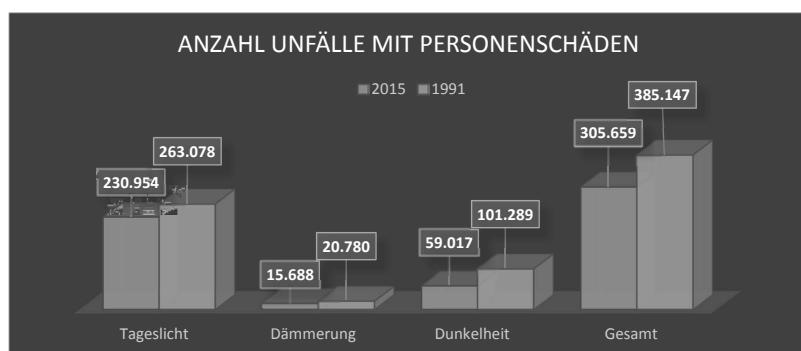


Bild 1.1: Unfällen mit Personenschäden nach Helligkeit nach [1]

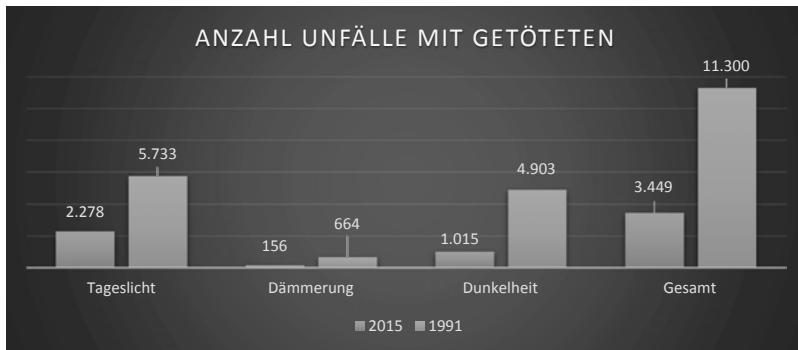


Bild 1.2: Unfälle mit Getöteten nach Helligkeit nach [1]

Abbildung 1.3 betrachtet zusätzlich die Ortslage, in der sich die Unfälle bei Nacht ereignen. Hier kann ein sehr positiver Beitrag zur Reduzierung der Getöteten ausgewiesen werden. Die Zahl der Getöteten im Bereich „Außerorts ohne Autobahn“ sank im Betrachtungszeitraum um 81,4%. Dennoch wird deutlich, dass speziell im Bereich „Außerorts ohne Autobahn“ Handlungsbedarf besteht, um die Zahl der Verkehrstoten, durch eine weitere Verbesserung der Fahrzeugsicherheit, zu reduzieren.

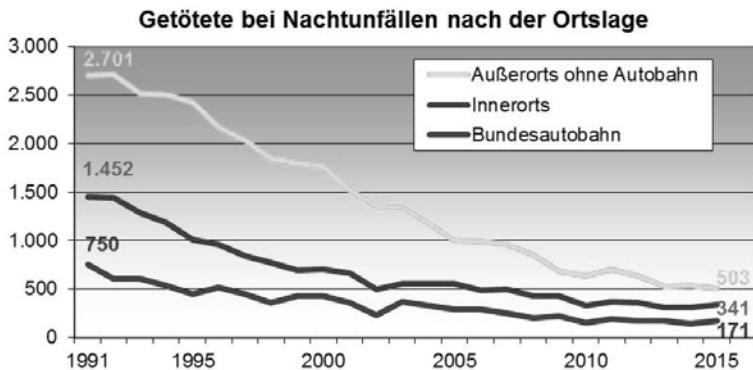


Bild 1.3: Zahl der Getöteten bei Nachtunfällen nach Ortslage im Betrachtungszeitraum 1991 bis 2015 [2]

Zu diesem Ergebnis tragen verschiedene Faktoren bei. Unter anderem sind es die Fahrbahn-eigenschaften, -markierungen sowie die aktive und passive Fahrzeugsicherheit und heute ver-

fügbare Fahrerassistenzsysteme. Darüber hinaus leisten auch die automobilen Beleuchtungseinrichtungen einen Beitrag zur Verkehrssicherheit. Eine exakte Ableitung auf den Einfluss kann allerdings nicht getätigt werden. Automobilforen lassen allerdings erkennen, dass moderne Beleuchtungstechnologien positiv wahrgenommen werden und ihnen beigemessen wird, dass sie einen Mehrwert an Verkehrssicherheit bieten. [3], [4] Das zeigen auch die steigenden Verkaufszahlen der PKW mit LED-Scheinwerfer-Ausstattung. Zwischen den Jahren 2012 und 2015 ist eine Zunahme der PKW mit moderner LED-Lichttechnik von 24,52% zu verzeichnen. [5]



Bild. 1.4: Anzahl der Fahrzeugbesitzer eines PKWs mit LED-Scheinwerfern nach [5]

Die Verkaufszahlen für PKW insgesamt sind im selben Zeitraum mit durchschnittlich 1,13% weitaus weniger gestiegen. Daraus lässt sich ableiten, dass die allgemeine Wahrnehmung und das Sicherheitsempfinden durch neue Beleuchtungstechnologien, trotz höherer Anschaffungskosten, erhöht ist. In Kombination mit den Fahrerassistenzsystemen ist den neuen Beleuchtungstechnologien daher ein hoher Stellenwert zuzusprechen, weshalb diese näher betrachtet werden sollen. Im Folgenden werden die dynamischen Beleuchtungssysteme und ihre Potentiale unter Berücksichtigung von verschiedenen Aspekten betrachteten.

2. Einflussfaktoren auf die Sichtverhältnisse im Straßenverkehr

Für eine sichere Erkennung von Verkehrssituationen und Straßenverhältnissen sind Kennwerte wie Geometrie, Lichtstärke, Beleuchtungsstärke, Blendung und die Lichtverteilung der Scheinwerfer zu betrachten. Diese sind über Gesetzesvorgaben, wie zum Beispiel die ECE-Regelungen (Economic Commission for Europe) für rund 50 Länder definiert. In Amerika finden hingegen die Vorschriften der FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standard) Anwendung.

Darüber hinaus werden durch die Automobilhersteller zusätzliche Anforderungen an das Design, die Qualität, die Markendifferenzierung und Wahrnehmung gestellt. Einen Schwerpunkt im Bereich der LED-Technologie setzt dabei die Differenzierung der Marke und der Fahrzeugklasse durch spezielle Tag- und Nachtdesigns.

Speziell die Blendung ist unter Berücksichtigung der Physiologie des menschlichen Auges ein wichtiger Aspekt. Die Möglichkeit mit Hochleistungs-LED viel Licht auf möglichst keinen Flächen zu erzeugen, kann bei entgegenkommenden Verkehrsteilnehmern zu einer physio- und psychologischen Blendung führen. Dies hängt unter anderem vom biologischen Aufbau des menschlichen Auges und dem Adaptationszustand ab. Großflächig leuchtende Elemente empfindet das menschliche Auge weniger störend als kleine punktähnliche Flächen mit gleichem Lichtstrom. Dieser Effekt wird meist durch die biologisch bedingte Alterung des Auges und die damit verbundenen drei häufigsten Augenkrankheiten verstärkt.

Berücksichtigt man die altersbedingten Augenleiden und kombiniert diese mit dem Megatrend „Silver Society“, bzw. dem demografischen Wandel, so ist im Jahr 2025 mit einer erhöhten Blendung im Straßenverkehr zu rechnen. Die prognostizierte Altersverteilung zeigt Abbildung 2.1. Dem Thema Alter und Blendung ist daher bei der Entwicklung künftiger Lichttechnik gezielt Aufmerksamkeit zu schenken.

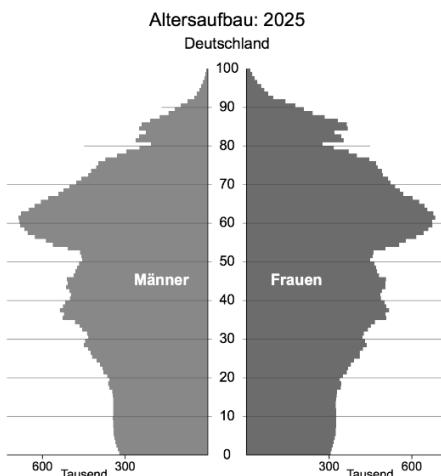


Bild 2.1: Alterspyramide [6]

Um das Kapitel Einflussfaktoren auf die Erkennbarkeit bei Dunkelheit abzurunden, darf die Straßendeckschicht nicht außer Acht gelassen werden. Diese trägt sowohl zur Erkennbarkeit als auch zur Blendung bei. Untersuchungen bei IAV haben ergeben, dass die subjektiv wahrgenommene Blendung für entgegenkommende Verkehrsteilnehmer durch den Zustand der Straßendeckschicht erheblich verschlechtert werden kann. Es zeigte sich, dass durch eine nasse Fahrbahndeckschicht eine deutlich verstärkte Vorwärtsreflektion resultiert, die einen erheblichen Einfluss auf die Blendung entgegenkommender oder vorausfahrender Verkehrsteilnehmer hat. Der über die nasse Fahrbahn reflektierte indirekte Anteil führt zu Blend-beleuchtungsstärken im Messpunkt B50L der ECE Regelung R123, die weit über dem zulässigen Grenzwert liegen. Da für die Bewertung des Blendpotentials der direkte und indirekte Anteil summiert werden müssen, liegt bei nasser Fahrbahn die Blendung für entgegenkommende Verkehrsteilnehmer weit über dem gesetzlich zulässigen Grenzwert. [7]

3. Vergleich der Verfahren zur Bewertung der Blendung durch Kfz-Scheinwerfer

Um die im vorangegangen Absatz beschriebene Blendung zu bewerten, stehen drei unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Das erste basiert auf den, in der ECE Regelung R123 definierten, Gesetzesanforderungen. Dies ist ein für die Mitgliedsländer der United Nations Economic Commission for Europe zulassungsrelevantes Kriterium. Hierbei wird auf Komponentenebene die Blendbeleuchtungsstärke vorrangig im Punkt B50L (siehe Abbildung 3.1) gemessen und auf die Einhaltung des vorgeschriebenen Grenzwertes überprüft. Dazu wird ein Scheinwerfer in Fahrzeugeinbaurlage auf die Messeinrichtung (Goniometer) gespannt und die Lichtverteilung inklusive der zulassungsrelevanten Messpunkte gemessen. Da die Messung unter reproduzierbaren Laborbedingungen erfolgt, wird der, über die Fahrbahn verursachte, indirekte Blendanteil dabei nicht berücksichtigt.

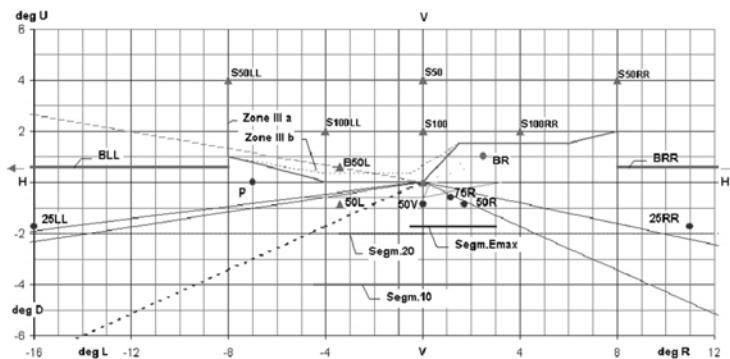
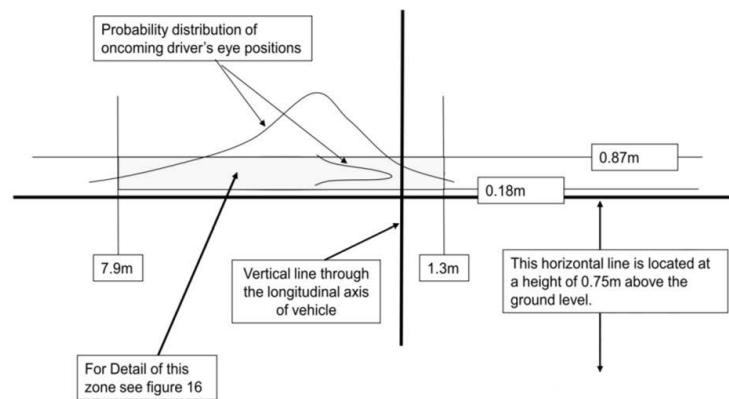


Bild 3.1: Messschirm zur Bewertung der Abblendnichtverteilung nach ECE R123 [8]

Das nächste Verfahren ist die „Performance Assessment Method for Vehicle Headlighting Systems“ [9]. Bei dieser Bewertungsmethode wird die Blendung nicht vorrangig an einen Punkt, sondern innerhalb einer Zone unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeitsverteilung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer gewichtet, bewertet. Diese Zone ist in Abbildung 3.2 zu sehen und wird auf die Fahrzeulgängsachse des eigenen Fahrzeuges referenziert.



Quelle: TC 4-45

Bild 3.2: Definition der Blendungszone der CIE [9]

Seit 2016 gibt es ein neues Verfahren aus den USA. Im Rahmen des „Headlight Test and Rating Protocol“ des Insurance Institute for Highway Safety (IIHS) wird die Blendung dabei im dynamischen Passivvorgang erfasst. [10] Hierfür fährt ein Fahrzeug eine Gerade, zwei

Rechtskurven und zwei Linkskurven mit jeweils einem Kurvenradius von 150m und 250m entlang. Am Ende des jeweiligen Streckenabschnittes stehen photo-sensitive Messköpfe, welche die Beleuchtungsstärke während des Passiervorgangs messen (siehe Abbildung 3.3).

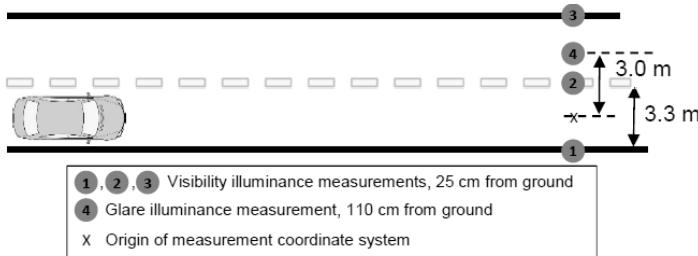


Bild 3.3: IIHS Rating Verfahren –Draufsicht auf das Testsetup für die Gerade [10]

Dieses Verfahren ermöglicht eine sehr praxisnahe Bewertung der Blendung, da ebenfalls Aspekte wie Fahrzeugdynamik, Fahrbahneigenschaften, sowie das Scheinwerfersystem-verhalten mit in die Bewertung eingehen. In der Auswertung finden unter anderen die Eigenschaften von Fahrbahnstruktur, Fahrzeugposition, Abweichungen von der Ideallinie, Geschwindigkeit und der Einfluss der Lichtassistentenzsysteme Berücksichtigung. Um die Reproduzierbarkeit so gut wie möglich zu gewährleisten, werden im Vorfeld die Fahrzeugeigenschaften genau festgelegt. Hierzu zählt zum Beispiel die maximale Zuladung für Messequipment inklusive Fahrer, der Reifendruck, der Füllstand des Tanks und die Gewichtsverteilung im Fahrzeug. Da es sich bei dem Verfahren um einen Consumertest in einer realen Umgebung handelt, werden auch Anforderungen an die Umgebungshelligkeit, die Temperatur und die Fahrbahnbeschaffenheit gesetzt. Daraus resultiert, dass beispielsweise bei Regen oder niedrigen Temperaturen keine Messungen durchgeführt werden dürfen.

Die Ergebnisse werden in „Demerits“ dargestellt, wobei insbesondere Sichtweite und Blendung in die Bewertung mit eingehen. Ein niedriger Wert bedeutet ein gutes Rating und umgekehrt. Die Rating-Skala selbst ist in vier Kategorien unterteilt:

Good	$\leq 10,5$ Demerits
Acceptable	von <10 bis $\leq 20,5$ Demerits
Marginal	von $<20,5$ bis $\leq 30,5$ Demerits
Poor	$> 30,5$ Demerits

Dadurch erhält man eine gute Vergleichbarkeit der verschiedenen Scheinwerfersysteme, deren Lichtfunktionen und der eingesetzten Technologien. Da der Test allerdings in einem realen Umfeld und händisch gefahren wird, gibt es Einschränkungen in der Reproduzierbarkeit. Je nach Fahrzeugklasse, Lage des Fahrzeugschwerpunktes und den unterschiedlichen Neigungswinkeln und erforderlichen Lenkkorrekturen, kann die Querbeschleunigung variieren. Dies macht sich speziell in den Kurvenfahrten an der horizontal ausgerichteten Hell-Dunkel-Grenze bemerkbar. Die Reproduzierbarkeit dieses Tests ist daher nicht mit den exakten Go-niometermessungen vergleichbar. Dennoch wirken im realen Fahrbetrieb genau diese Kräfte auf ein Fahrzeug und damit auf das fest an der Karosserie montierte Scheinwerfersystem. Deshalb erachten wir dieses Verfahren für den quantitativen Vergleich von verschiedenen Scheinwerfersystemen als geeignet. Die Gesetzesanforderungen, wie zum Beispiel die ECE Regelungen, sind trotzdem zwingend erforderlich. Sie ermöglichen eine qualitative Bewertung der verschiedenen Lichtverteilungen und den damit verbundenen sicherheits-relevanten Aspekten.

4. Ergänzende Bewertungsverfahren im Entwicklungsprozess

Um die Potentiale der beschriebenen Testverfahren optimal heben zu können, besteht die Notwendigkeit, die Entwicklungslandschaft und die Testverfahren im speziellen, um gewisse Aspekt zu erweitern. Durch den Einzug von Scheinwerfersystemen mit hochauflösenden, dynamischen Lichtverteilungen und den damit verbundenen Möglichkeiten, die Lichtverteilungen situativ anzupassen, bedarf es weiteren Betrachtungsfällen. Im Speziellen empfiehlt es sich, auf die Blendung bei Schlechtwettersituationen näher einzugehen. Durch die veränderten Reflexionseigenschaften der Fahrbahn wird die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer erhöht. Dies kann jeder Verkehrsteilnehmer bei nasser Fahrbahn durch die ausgeprägten „Lichtkeulen“ entgegenkommender Fahrzeuge und deren Scheinwerfer selbst erfahren. Diese kritischen Situationen können mittlerweile frühzeitig im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden. Hierzu hat IAV in den letzten Jahren eine Entwicklungsumgebung geschaffen, die es ermöglicht, in frühen Entwicklungsphasen das Blendpotential bei einem geraden Passiervorgang zu bewerten. Hierfür wurden verschiedene Asphaltmodelle entwickelt, die das Reflexionsverhalten im trockenen und nassen Fahrbahnzustand beschreiben und die Grundlage für die Entwicklungsumgebung CAGE (Computer Aided Glare Evaluation) bilden. Mit Hilfe der Software kann basierend auf Messungen oder lichttechnischen Simulationen die Blendung im Passiervorgang prognostiziert werden (siehe Abbildung 4.1).

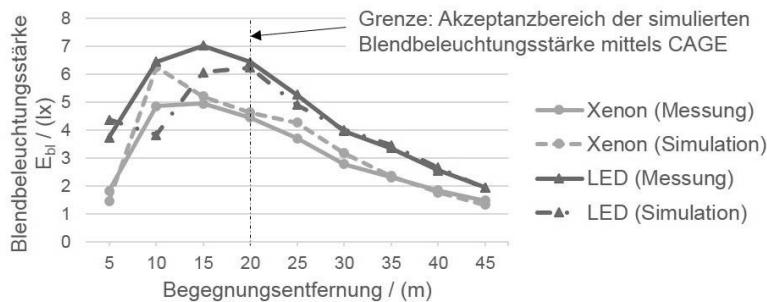


Bild 4.1: Abgleich Messergebnis und Simulation mittels CAGE
(Computer Aided Glare Evaluation) [8]

Dabei werden zusätzliche Parameter wie die Anbauhöhe und der Anbauabstand der Scheinwerfer im Bereich „Parameter Input“ der Eingabemaske von CAGE berücksichtigt (siehe Abbildung 4.2). Mit dem Ziel der Blendungsreduzierung, um speziell für die „Silver Society“ die Verkehrssicherheit zu erhöhen, können aus den mit CAGE simulierten Ergebnissen, neue Verhaltensprofile an die Dynamik der Lichtverteilung gestellt werden.

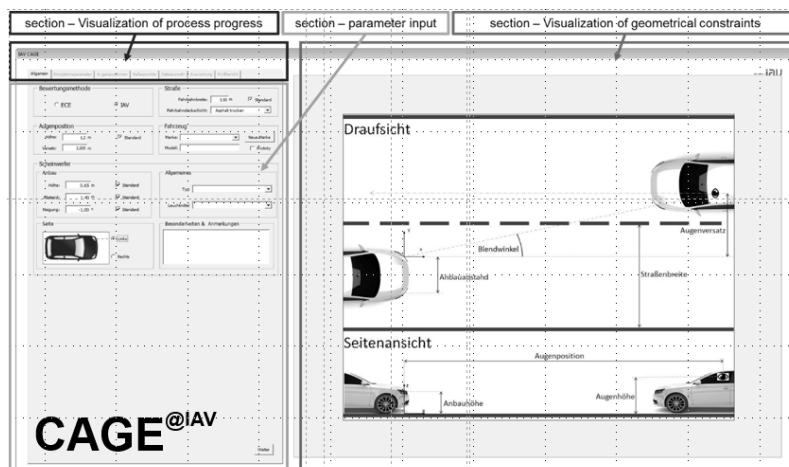


Bild 4.2: Eingabemaske der Entwicklungsumgebung CAGE
(Computer Aided Glare Evaluation) [8]

5. Ausblick

Durch die immer weiter steigende Anzahl an separaten ansteuerbaren Lichtquellen (zum Beispiel LED-Matrix, Laserlicht) in einem Scheinwerfersystem, können immer höher aufgelöste Lichtverteilungen generiert werden. Dies bietet dem Fahrer immer das optimale Licht, passend zur jeweiligen Situation. Im Gegensatz zu älteren Scheinwerfersystemen kann mit modernen Scheinwerfern sogar im höchsten Maße auf die Bedürfnisse anderer Verkehrsteilnehmer eingegangen werden. Hierfür ist es erforderlich, mit der Unterstützung der Digitalisierung das „Situationsbewusstsein“ des Fahrzeugs zu erhöhen, um Lichtassistenzfunktionen wie Baustellenlicht, Markierungslicht, blendfreies Dauerfernlicht, Bergkuppenlicht und Schlechtwetterlicht zu optimiert. Was in Zukunft vorstellbar ist, zeigt das „Digital Light“ Konzept von Mercedes Benz. Hier wird durch die extrem hohe Auflösung sogar das „Schreiben“ mit Licht möglich, was neue Wege zur Car2X-Kommunikation eröffnet.

Es lässt sich erahnen, welchen positiven Einfluss diese neuartigen Lichtassistenzfunktionen auf die Verkehrssicherheit haben werden. Um jedoch schon in der Entwicklung die speziellen Anforderungen an die Lichtassistenzfunktionen absichern zu können, bedarf es neuer Entwicklungsumgebungen, wie zum Beispiel IAV CAGE und der IAV Licht- und Fahrerassistenzhalle als dazugehörige Messumgebung (siehe Abbildung 4.3).

Darüber hinaus werden aktuell bei IAV weitere Entwicklungstools entwickelt. Mit diesen sollen künftig auch Nebelsituationen [11] und der Einfluss der visuellen Kommunikation auf die Verkehrssicherheit [12] bewertet werden. Im nächsten Schritt ist zusätzlich ein IIHS Simulations-Tool geplant, welches zusätzliche Fahrzeugparameter berücksichtigt, um frühzeitig vor IIHS Messungen deren Ergebnisse prognostizieren zu können.



Bild 4.3: Innenansicht IAV Licht- und Fahrerassistentenhalle (Quelle IAV)

8. Literatur

- [1] https://www.adac.de/_mmm/pdf/statistik_6_10_lichtverhaeltnisse_42820.pdf; aufgerufen 10.10.2017
- [2] https://www.adac.de/_mmm/pdf/statistik_6_3_Nachtunfaelle_42814.pdf; aufgerufen am 10.10.2017
- [3] <https://www.skoda-kodiaq-forum.de/index.php?thread/405-led-hauptscheinwerfer/>; aufgerufen am 10.10.2017
- [4] <https://www.motor-talk.de/forum/eure-erfahrungen-zu-den-led-high-performance-scheinwerfer-t5081890.html>; aufgerufen am 10.10.2017
- [5] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/268164/umfrage/ausstattung-des-pkw--led-scheinwerfer-abblendlicht-fernlicht/>; aufgerufen am 10.10.2017
- [6] <http://www.generationen-marketing.de/single-post/2015/04/06/Viele-Firmen-profitierten-vom-Megatrend-Demografie-und-nutzen-langfristige-Wachstumspotenziale>; aufgerufen am 10.10.2017
- [7] Kleinert, B.; Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht bei spiegelnden Fahrbahnoberflächen; Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2016
- [8] ECE; Uniform provisions concerning the approval of adaptive front-lighting systems (AFS) for motor vehicles, Regelung R123, Genf, 2013

- [9] CIE; Technical Report 188:2010: Performance Assessment Method for Vehicle Head-lighting Systems, Wien, 2001
- [10] Insurance Institute for Highway Safety, *Headlight Test and Rating Protocol (Ver. II)*, November 2016
- [11] Marutzky, M., et al.; Glare and Perception in Fog: A New Light Simulation Method, In: 12th International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2017
- [12] Bogdanow, S., et al.; Digital Light: Visual Communication and Perception, In: 12th International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2017

SAFE ROADS in Indien und China – Nachhaltige Kommunikationskampagnen zur Fahrzeugsicherheit

Jochen Feese, Daimler AG, Sindelfingen

Motivation

Jährlich sterben weltweit mehr als 1.2 Millionen Menschen auf den Straßen. Betrachtet man bereits entwickelte Länder, so hatte sich in den letzten Jahrzehnten ein abnehmender Trend eingestellt. Heute müssen wir feststellen, dass die Anzahl der Getöteten im Straßenverkehr offenbar ein Plateau erreicht zu haben scheint. Daher wird die Suche nach weiteren Maßnahmen erforderlich.

Betrachtet man die Entwicklung von Schwellenländern, so gehen hohe Zuwachsrate in der Wirtschaftsleistung einher mit einem ständig wachsenden Mobilitätsanspruch, verbunden mit einem komplexen Verkehrsmix und weiteren Faktoren, die zu sehr hohen und einer ständig steigenden Anzahl an Getöteten führen.

Die Situation wird immer dramatischer. Indien hat bspw. die höchste Anzahl von gemeldeten Verkehrstoten in der Welt, knapp 151.000 Todesopfer im Jahr 2016. Dies entspricht mindestens 17 Menschen, die jede Stunde auf den Straßen sterben! Ohne gezielte Anstrengungen und neue Initiativen ist es wahrscheinlich, dass die Gesamtzahl der Verkehrstoten in Indien bis 2025 die Marke von einer Viertelmillion durchbrechen wird.

Deshalb ist es jetzt an der Zeit, dass Behörden, Verbraucherorganisationen und Automobilhersteller handeln - um viele Tausende Leben in Zukunft zu retten! Dies war unsere Motivation bei Mercedes-Benz, eine einzigartige CSR (Corporate Social Responsibility) Initiative zu starten, um das Sicherheitsbewusstsein der Bevölkerung in Indien zu erhöhen. Wir nannten sie SAFE ROADS.

Idee & Konzept

Die Idee hinter SAFE ROADS bestand darin, die Wahrnehmung des Themas Sicherheit in der indischen Öffentlichkeit hinsichtlich fahrzeug- und straßensicherheitsrelevanten Aspekten zu erhöhen und eine neue "Sicherheitskultur" unter den Menschen in Indien zu gestalten. Wir glauben, dass der Markenname Mercedes-Benz diese Aufgabe hervorragend unterstützt, da Sicherheit einer unserer Markenkernwerte, wenn nicht sogar DER Markenkernwert auf Basis von mehr als 75 Jahren eigener Sicherheitsgeschichte ist.

Das Konzept beinhaltete von Anfang an die Kombination einer Ausstellung und Präsentationen zu Schlüsselthemen. Sicherheitsthemen sollten nicht nur kommuniziert, sondern auch über Exponate erlebbar gemacht werden (Bild 1). Dies sollte die Möglichkeit bieten, Sicherheit zu thematisieren und gleichzeitig eine ganz persönliche Erfahrung (touch & feel) für das Publikum zu erlauben.



Bild 1: Erstes Konzept

Präsentationen und Ausstellung sollten alle relevanten Schlüsselfaktoren ansprechen, die zum Unfallrisiko in Indien beitragen, wie bspw. die Verkehrssituation (zunehmende Fahrzeugflotte, hohe Anzahl gefährdeter Verkehrsteilnehmer), Verhaltensfaktoren (Erfahrung von Fahrern, Geschwindigkeitsüberschreitungen, Drogenkonsum, auch in Verbindung mit Durchsetzung von Verkehrsgesetzen), Infrastruktur (bspw. Straßengestaltung, Wartungskontrollen).

Realisierung

Um dieses Konzept zu realisieren, mussten alle Daimler internen Stakeholder in einem gemeinsamen Steuerkreis gebündelt werden. Hauptantriebskräfte waren die Pkw Entwicklungseinrichtungen in Deutschland und Indien der Daimler AG. Aber auch unsere Vertriebsorganisation in Indien, die Kommunikationsabteilungen in Indien und Deutschland sowie Daimler Financial Services India und Daimler India Commercial Vehicles unterstützten die Initiative. Externe Stakeholder wie JP Research India PVT Ltd, ARAI, NATRIP, IRF und viele andere wurden um Mitwirkung angefragt. Sie unterstützten die Idee und den Geist von SAFE ROADS mit wichtigen Beiträgen.

Die ursprüngliche Planung für 2015 umfasste sechs große Städte, beginnend mit dem Kickoff in Neu Delhi. Aufgrund unerwarteter Überflutungen konnte der Event in Chennai jedoch nicht

realisiert werden (Bild 2). Im Jahr 2016 fand die Initiative SAFE ROADS in drei zusätzlichen Großstädten - Kochi, Hyderabad und Kalkutta - statt.

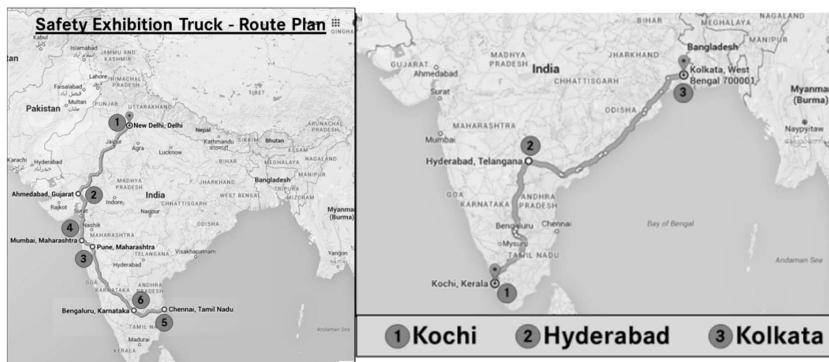


Bild 2: 2015/2016 SAFE ROADS Planung

Die Nutzung verschiedenster Kommunikationskanäle ermöglichte es, möglichst viele Menschen zu erreichen: Im Jahr 2015 wurde die Kickoff-Veranstaltung in Neu Delhi von rund 60 Journalisten begleitet und auflagenstarke regionale Medien berichteten über die Veranstaltungen in jeder Stadt. Mehr als 13,000 Menschen konnten die verschiedenen Exponate erleben. Über digitale Medien, bspw. Facebook und Twitter, erreichte die Initiative rund 5 Millionen Menschen. Vier 30minütige Episoden auf NDTV (einer von Indiens prominenten Fernsehsendern) verbreitete die Kernbotschaften über das ganze Land. Auch die Universitäten waren Gastgeber für SAFE ROADS und erlaubten es uns, tausende junger Menschen zu erreichen. Für die Veranstaltung in Bengaluru wurde auch der lokale Radiosender genutzt (Bild 3).



Bild 3: Exzellente Medien Resonanz (TV, Print, Digital)

Besonders das Rohbau-Modell zog die Aufmerksamkeit der Menschen auf sich. Es gab einen Einblick in die Fahrzeugstruktur, Position der Sensoren und Airbags (Bild 4).



Bild 4: Rohbau-Modell, inkl. Airbags und Sensoren

Bevor wir im nächsten Jahr SAFE ROADS fortsetzen, haben wir die Events analysiert und unsere Lessons Learned über die Ausstellung (Bild 5) abgeleitet.

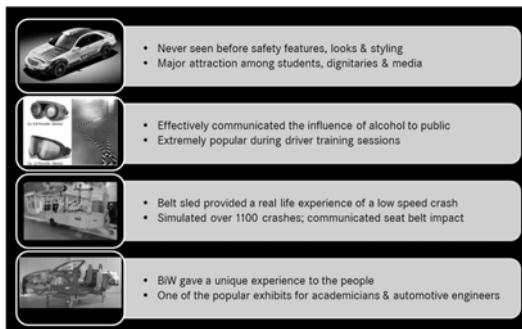


Bild 5: SAFE ROADS Lessons Learned zur Ausstellung

Anfang 2016 erhielt die SAFE ROADS Initiative eine Auszeichnung vom indischen Magazin AUTOCAR für die "BEST CSR CAMPAIGN for SAFETY".

Ende 2015 mussten wir unseren Gurtschlitten aufgrund von Einfuhrvorschriften zurück nach Deutschland verschiffen. Daher entschieden wir uns, einen neuen in Indien bauen zu lassen, um die Relevanz des Sicherheitsgurtes – der nach wie vor der Lebensretter Nr. 1 ist - weiterhin erlebbar zu demonstrieren (Bild 6).



Bild 6: Gurtschlitten, gebaut in Indien ("The Convincer")

Mehr als 40,000 Menschen konnten die Exponate erleben, da wir auch öffentliche Plätze wie große Einkaufszentren für die Ausstellung nutzten. Durch Printmedien konnten rund 14 Millionen Menschen unsere Botschaften erhalten. Erneut wurden digitale Medien, Fernsehen und Radio genutzt, um die Initiative breitflächig sichtbar werden zu lassen.

Im Jahr 2016 war das Highlight der Ausstellung ein aktuell gecrashtes Fahrzeug - ein Mercedes-Benz GLC. Die Fahrgastzelle des GLC blieb im Test mit der frontalen Offset-Barriere stabil. Das Auto erreichte die maximalen Punkte für den Schutz des Beifahrer-Dummys, mit gutem Schutz aller kritischen Körperbereiche. Die Dummywerte zeigten einen guten Schutz der Knie und des Oberschenkelknochens sowohl des Fahrers als auch des Beifahrers. Zudem hatte der GLC Maximalpunkte für den Schutz der 1,5 jährigen Kinderdummies in den Frontal-Offset-Prüfungen erreicht. (Quelle: Euro-NCAP Website). Er war also ein sehr gutes Beispiel für vorbildliche Fahrzeug Sicherheit (Bild 7).



Bild 7: SAFE ROADS Exponat – gecraschter GLC

Auf Youtube gibt es mehrere Videos über SAFE ROADS India, die einen guten Eindruck über die Konzeptionierung und die Schlüsselbotschaften vermitteln. Schließlich haben wir noch Anfang 2017 einige der Exponate für das Symposium zur internationalen Automobiltechnik (SIAT) in Pune bereitgestellt.

TRANSFORMATION

Der große Erfolg von SAFE ROADS India führte zu der Entscheidung, eine ähnliche Initiative in China durchzuführen. Wir haben das Konzept überarbeitet, angepasst und noch mehr sicherheitsrelevante Themen hinzugefügt. Im Prinzip wollen wir diesmal, dass sich die Menschen durch unsere integrale Sicherheitsstrategie (Bild 8) bewegen: Aus der sicheren Fahrphase kommend, in der das Fahrzeug den Fahrer unterstützt, das Aufkommen einer kritischen Situation erleben, in der das Fahrzeug sich selbst und seine Insassen auf einen drohenden Aufprall vorbereitet (z. B. durch Demonstration von PRE-SAFE® Technologien) bis hin zu den crashrelevanten Sicherheits- und Postcrash-Maßnahmen.



Bild 8: Der integrale Sicherheitsansatz, SAFE ROADS China

ZUSAMMENFASSUNG – NACHHALTIGKEIT

Die Initiative in Indien sollte nach ihrer Erfolgsgeschichte nicht einfach verschwinden. Wir wollten, dass dieses Licht brennt und ständig von der indischen Bevölkerung wahrgenommen wird. Wir haben uns also gefragt, wie wir es nachhaltig gestalten können und die Idee entstand, eine neue Sicherheitskonferenz in Indien zu etablieren. Diese sollte genau wie unsere Initiative Elemente enthalten, die ein Erleben von Sicherheit erlauben ("touch & feel" – Ausstellung). Wir haben die bestehenden Konferenzen in Indien gescannt, um unserer Konzept zu überprüfen. Die Planung sieht vor, dass alle zwei Jahre eine solche Sicherheitskonferenz in Neu-Delhi stattfinden wird, erstmals am 22./23.11.2017. Hauptherausforderungen waren dabei die Suche nach Sponsoren, die bereit sind, dieses Konzept zu unterstützen.

Wir hoffen, dass der SAFE ROADS India Summit sich zu einem starken Element innerhalb der indischen Fachwelt für Sicherheitstechnologien und für die indische Bevölkerung entwickelt.

Das Verbesserungspotential von Systemen der Passiven Sicherheit für 50% Insassen

F. Bosma, P.A. van Hooijdonk, M.G.A. Tijssens,

TASS International, Rijswijk, die Niederlande;

K. Kietlinski, M. Unger, J. Schüling,

TASS International, Wiesbaden

Zusammenfassung

Diese Veröffentlichung präsentiert eine Simulationsstudie über die Auswirkungen unterschiedlicher Crash-Geschwindigkeiten (aufgrund des Pre-Crash-Einsatzes eines automatisierten Bremssystems) auf die Verletzungen, die die Fahrzeuginsassen bei einem nachfolgenden Crash erleiden. Die für die Studie verwendete Methodik wurde bereits beschrieben (1) und zeigt die Auswirkungen von veränderten Pre-Crash-Bedingungen durch Notbremfung. Die vorliegende Studie konzentriert sich auf die Untersuchung der Verbesserungspotenziale bestehender State-of-the-Art-Rückhaltesysteme, um die Insassen noch besser zu schützen unter verschiedenen Kollisionsbedingungen, die durch den Einsatz von autonome Notbremfung (AEB) verursacht wurden.

In der Simulationsstudie wird ein generischer PKW (D-Klasse) einem Referenztest von 56 km/h USNCAP Full Width Frontal Test mit vorhergehender Notbremfung aus Fahrzeugtests abgeleiteten ca. 0,8 g ausgesetzt. Um die Wirkung der Kollisionsgeschwindigkeit auf die Effizienz des Insassenschutzes zu untersuchen, wurde eine Crash-Puls-Skalierungsmethode entwickelt und dementsprechend angewendet. Dies erlaubte es, den Fall bei jeder zufälligen Crash-Geschwindigkeit unter 56 km/h zu untersuchen. Alle Simulationen werden in MADYMO (ein Multibody, numerischer Solver) durchgeführt und verwenden 3 verschiedene 50%-ige Insassenmodelle: Active Human Model (AHM), Hybrid III und THOR.

Die Ergebnisse zeigen erhebliche Kapazitäten eines DOE-optimierten Sicherheitssystems bei der Verringerung des AIS 2+ Verletzungsrisikos für die vielfältige Kollisionsgeschwindigkeit, insbesondere im Bereich von 25-40 km/h Delta V. Die Einführung der Anpassungsfähigkeit der Rückhaltesystemeinstellungen auf die vielfältige Kollisionsgeschwindigkeiten (anders als durch Testprotokolle spezifiziert) führte zu einer deutlichen Verbesserung des Insassenschutzes. Es ist daher zu erwarten, dass die Einführung weiterer Systemanpassungen an die anderen Crash-Zustands-Parameter eine ähnliche oder sogar ausgeprägtere positive Wirkung haben wird. Weitere Untersuchungen konzentrieren sich auf die Anpassung von Rückhaltesystemen an die variablen Insassenparameter (Größe, BMI, Alter), Insassen außerhalb

der Normposition und auch Kollisionsbedingungen, z.B. Crash-Winkel oder Crash-Schweregrad auf der Grundlage der prädiktiven Erkennung und Klassifizierung von Kollisionsteilnehmern.

1. EINFÜHRUNG

Straßenfahrzeuge werden zunehmend mit aktiven Sicherheitssystemen ausgestattet, die dem Fahrer bei der Vermeidung von Kollisionen, z.B. autonome Notbremsung (AEB) oder Spurhaltung (LKA) unterstützen. Diese Systeme verwenden Sensing-Technologien wie Radar, LIDAR und Kameras und werden als Sicherheitssysteme konzipiert und eingeführt, die helfen, Unfälle oder Verletzungen zu vermeiden, wenn Unfälle unumgänglich sind.

Bisherige Untersuchungen über die Wirkung eines autonomen Bremsen und/oder Ausweichlenkung auf die Position des Insassen haben gezeigt, dass der Insasse, der aus der Normposition heraus ist, zu einem veränderten Verletzungsmechanismus während des Unfalls führen kann (2)(3). Darüber hinaus sind Gegenmaßnahmen wie die Vorhersagevorspannung (3) wirksam bei der Verringerung der Außer-Position-Situation des Insassen, vorausgesetzt, dass der Zeitpunkt der Vorspannung des Bandes optimal gewählt wird.

Mit der Einführung von aktiven Sicherheitssystemen sind Möglichkeiten zur Abschätzung der Bedingungen einer drohenden Kollision entstanden. Im Falle einer bevorstehenden Kollision, die nicht vermieden werden kann, schafft die Information über die erwarteten Crashbedingungen (z.B. Richtung, Delta-v) oder über die reisenden Insassen (z.B. Größe, BMI, Alter, Ausgangsposition) Möglichkeiten zur Voreinstellung und Kontrolle der Insassen-Rückhaltesysteme, um einen maximalen Schutz für die jeweilige Kollision zu gewährleisten. Die derzeitigen State-of-the-Art Insassen-Sicherheitssysteme sind sehr ausgereift in der Bereitstellung eines maximalen Schutzes für die Crash-Bedingungen, die durch gesetzliche oder Verbraucher-Test-Protokolle definiert sind. Jedoch wird das Schutzniveau der Insassen, die durch dieselben Rückhaltesicherheitssysteme gesichert sind, nicht für nicht standardisierte Kollisionsbedingungen, z.B. für Fälle, in denen nach dem Einsatz eines autonomen Bremssystems die Kollisionsgeschwindigkeit reduziert wird und die Anfangspositionen des Insassen durch Pre-Crash-Bremsbelastung verändert werden, überprüft.

Die Schaffung von Insassensicherheitssystemen, die sich intelligent an die Vielfalt im Status, Anthropometrie und Alter der Insassen anpassen und sich ändernde Bedingungen von Straßenkollisionen berücksichtigen, ist die nächste Herausforderung bei der Entwicklung von Insassensicherheitssystemen. Eine neuere Studie über Insassenklassifizierung und Adaptierung (4) stellte einen ausgewogenen Betrieb des motorisierten Sitzgurt, Gurtlastgrenzen

und Airbag Zündzeiten vor und zeigte die Bedeutung der Verwendung von Insassen-Status Informationen, um ihren Schutz während des Crashes zu verbessern.

Diese Veröffentlichung baut auf der früher vorgestellten Methodik auf (1), die es Entwicklern ermöglicht, verschiedene Unfälle zu untersuchen und eine angemessene Anpassung an die vorhandenen Rückhaltesysteme zu implementieren, um sie für unterschiedliche Kollisionsbedingungen weiter zu optimieren.

Die Methodik wird in der Beispielfallstudie einer frontalen Kollision gezeigt, der die Aktivierung von AEB vorausgeht.

2. METHODIK

Das integrierte Sicherheitssystem ist ein Fahrzeugsicherheitssystem, in dem aktive Sicherheitssysteme und passive Sicherheitssysteme kontinuierlich Informationen über den Insassenzustand und den Fahrzeugzustand austauschen, um den Insassen den maximalen Schutz zu bieten. Integrierte Sicherheit ist eine relativ neue Domäne in der Automobilsicherheitslandschaft und Entwicklungsprozesse beginnen sich anzupassen, um eine weitere Integration von passivem und aktivem Sicherheitssystemdesign zu ermöglichen. Die vorgeschlagene Methodik (1) des Aufbaus solcher Systeme ist in Abbildung 1 dargestellt.



Bild 1: Integrierte Sicherheitsmethodik: Entwicklung & Testschleifen zur Erprobung des Nutzens für menschliche Insassen bei Unfällen im wirklichen Leben

Der im Innenkasten (grau) beschriebene Prozess veranschaulicht den aktuellen Ansatz zur Sicherheitssystementwicklung, bei dem die In-Crash-Systemvariablen (z.B. DAB- oder PAB-Parameter, Vorspanner und Lastbegrenzer-Einstellungen etc.) unter Laborbedingungen geprüft werden und die Effizienz der Systemeinstellungen wird dann an anthropometrischen Prüflingen gemessen.

Der Entwicklungsprozess (außen orange) für die dargestellte Methodik schlägt vor, alle Systemvariablen, die in einem kompletten Pre- und In-Crash-Ereignis relevant sind, einzubeziehen (z.B. Pre-Crash-Insassen-Zustandsregelungseinstellungen), mit computergesteuerten Real-Life-Crash-Bedingungen basierend auf Unfalldatendatenbanken zu testen und schließlich die Wirkung des Sicherheitssystems mit ein menschliches Modell, das prädiktives und biofidelisch gültiges Verhalten sowohl für Vor- als auch für In-Crash-Phasen eines vollständiges Kollisionsereignis bietet zu messen.

Der Entwicklungsprozess zur Erstellung von Sicherheitssystemen wird weiter auf die in Abbildung 2 dargestellten konsekutiven Schritte unterbrochen. Schritt 1 stellt ein Referenzmodell mit modernster Systemkonfiguration dar, das nach den aktuellen Entwicklungsstandards entwickelt wurde (grauer Kasten in Abbildung 1). In Schritt 2 wird der ATD durch ein aktives menschliches Modell (AHM) ersetzt, dass das menschliche Verhalten sowohl bei niedrigen Beschleunigungen (Pre-Crash) als auch bei High-G-Bedingungen (in-Crash) gut vorhersagen kann. Schritt 3 führt Pre-Crash-Bedingungen ein, die den Insassen-Eintrittszustand in die In-Crash-Phase beeinflussen. Im untersuchten Fall handelt es sich um eine Notbremung. Schritt 3 wird eine Referenz für die nächsten Schritte 4 und 5, bei denen die Insassen-Rückhaltesysteme (die sowohl im Vor- als auch im Crash arbeiten) in DOE-Prozessen entworfen werden, um sich an unterschiedliche Crash-Bedingungen anzupassen. In Schritt 4 werden die Labortestbedingungen variiert (z.B. verringerte Crashgeschwindigkeit und Insasse aus der Normposition aufgrund des Einsatzes von AEB) und in Schritt 5 werden Testprotokollbedingungen vollständig durch die Bedingungen ersetzt, die nach Straßenunfalldatenbanken folgen. Da jedes Fahrzeugsicherheitssystem den gesetzlichen Anforderungen genügen muss und auch in der Industrie anerkannte Verbrauchertests gut erfüllen sollte, wird in Schritt 6 das in den Schritten 4 und 5 erstellte adaptive System schließlich mit dem ursprünglichen System unter den Bedingungen der jeweiligen Testprotokolle überprüft.

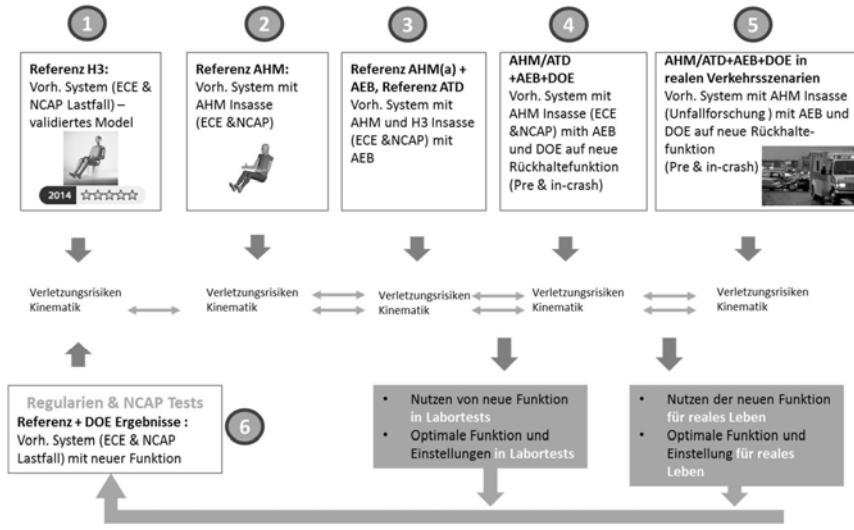


Bild 2: Konzeptentwicklung und Testverfahren

Die Methodik baut daher auf den derzeit akzeptierten passiven Sicherheitsentwicklungsprozessen auf und erweitert diese um integrierte Sicherheitssysteme, die gleichermaßen gut oder besser funktionieren als das ursprüngliche System, das die gesetzlichen und Verbrauchertestbedingungen erfüllt.

Die Methodik (1) nutzt das Active Human Model (AHM), einen 50% -igen Menschen, der die Insassenkinematik bei dynamischen Manövern in der Pre-Crash-Phase vorhersagen kann, sowie die biofidelische Reaktion bei High-g-Crash-Bedingungen (5)(6)(7).

Die Simulationen werden alle in MADYMO durchgeführt: Ein numerischer Solver, der das Insassenverhalten, seine Umgebung, die Kontaktinteraktion und alle anderen physikalischen Phänomene, die für die Nachbildung eines vollständigen Kollisionsereignisses relevant sind, berechnet.

3. APPLIKATION

Die Methodik wird durch die Fokussierung auf einen vordefinierten frontalen Kollisionsunfall verdeutlicht, bei dem ein bestehendes passives Sicherheitsdesign mit einem AEB-System ergänzt wird. In einer früheren Studie analysierten wir, wie diese Veränderung die Sicherheit des Insassen durch die Fokussierung auf die menschliche Kinematik und die daraus resultie-

renden Veränderungen der Verletzungsmechanismen für eine Reihe von generischen Fahrzeugmodellen (1) beeinflusst hat. Hier stellte sich heraus, dass die Wirkung der veränderten Vorkollisionsbedingungen als Folge der AEB eine positive Auswirkung auf das Verletzungsrisiko durch eine Vorspannung der Sicherheitsgurte hatte, was zu einer weicheren Abbau der Insassengeschwindigkeit führte. Ähnliche Ergebnisse wurden später von anderen Forschern bestätigt (8).

In dieser Arbeit erweitern wir unsere Analyse auf alle Repräsentationen von 50%-igen Menschen, d. h. dem Hybrid-III, dem THOR und dem aktiven Menschen und berücksichtigen auch Effekte der variablen Aufprallgeschwindigkeit auf den Crash-Puls und die Airbag-Triggerzeit. Wir beschränken notwendigerweise die Studie auf ein generisches Fahrzeug aus unserer Modelldatenbank (ein Fahrzeug der Klasse D) in einem Lastfall, dem 35mph USN-CAP Full Width Frontal Test. Für diesen Lastfall konzentrieren wir uns auf die Schätzung des Verletzungsrisikos bei niedrigeren Aufprallgeschwindigkeiten als Folge der AEB.

3.1 Crash-Puls-Skalierung

Um in MADYMO Crash-Simulationen mit unterschiedlichen Aufprallgeschwindigkeiten durchführen zu können, d.h. Aufprallgeschwindigkeiten, die niedriger sind als die Protokollaufprallgeschwindigkeiten, haben wir eine Methode entwickelt, um den Crash-Puls bei diesen niedrigeren Aufprallgeschwindigkeiten "vorherzusagen". Ziel ist es, den Nutzen eines AEB-Systems zu quantifizieren und die Effektivität verschiedener AEB-Systeme und AEB-Algorithmen zu vergleichen (9).

Bei der herkömmlichen Simulationsmethode wird der Fahrzeug-Crash-Impuls (umgekehrt) auf den Insassen angewendet, oder der Fahrzeug-Crash-Impuls wird an die inneren Fahrzeugteile angelegt (wie bei einem Schlitten-Test), siehe Abbildung 3.

Beschleunigungspuls

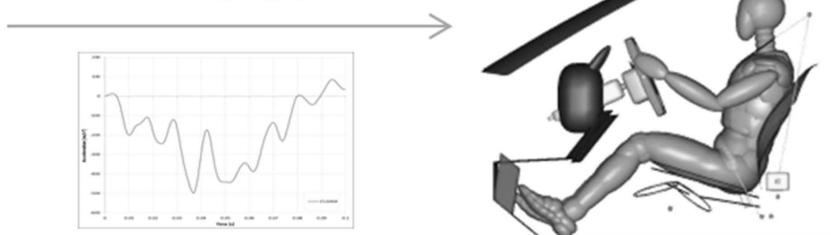


Bild 3: Schematische Darstellung der traditionellen Methode der Anwendung eines Crash-Pulses in einer MADYMO-Insassensimulation

Für jede Crash-Simulation mit einer anderen Aufprallgeschwindigkeit muss der Beschleunigungsimpuls modifiziert werden. In unserem Fall haben wir nur die Verfügbarkeit von Impulsen von Crashes aus der Protokollgeschwindigkeit (35 mph, USNCAP). Um die Aufprallgeschwindigkeit als Variable in unsere Simulationen einzubeziehen, stützen wir die Simulationen auf ein einzelnes Modell, das mit der Protokollgeschwindigkeit (35 mph USNCAP) validiert ist, und ergänzen diese mit einer Crash-Puls-Skalierungsmethode, siehe Abbildung 4.

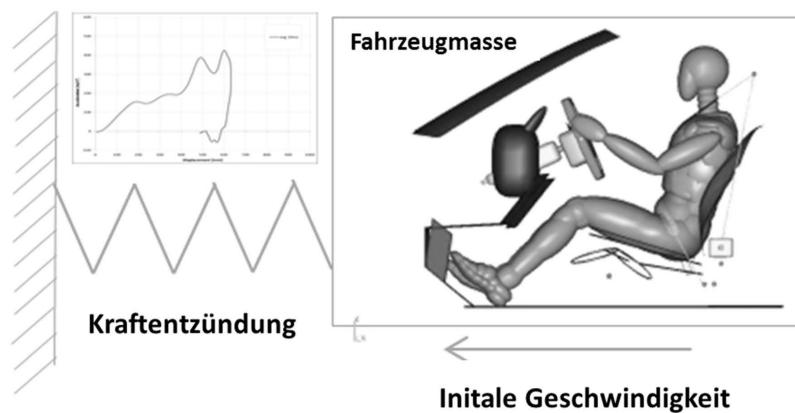


Bild 4: Schematische Darstellung der Crash-Puls-Skalierung in einer MADYMO-Insassensimulation

Die Innenteile sind an einem Körper mit der Fahrzeugmasse befestigt, der die erforderliche Anfangsgeschwindigkeit (= Aufprallgeschwindigkeit) erhält. Die Fahrzeugsteifigkeit wird durch die Force-Ablenkungscharakteristik des Fahrzeugs dargestellt. Die erforderliche Kraftablenkungscharakteristik ergibt sich aus der Fahrzeugbeschleunigung der USNCAP-Crash-Tests, die in der Nähe des Insassen (z.B. B-Säule) gemessen wurden, und folgte dem in Abbildung 5 gezeigten Verfahren.

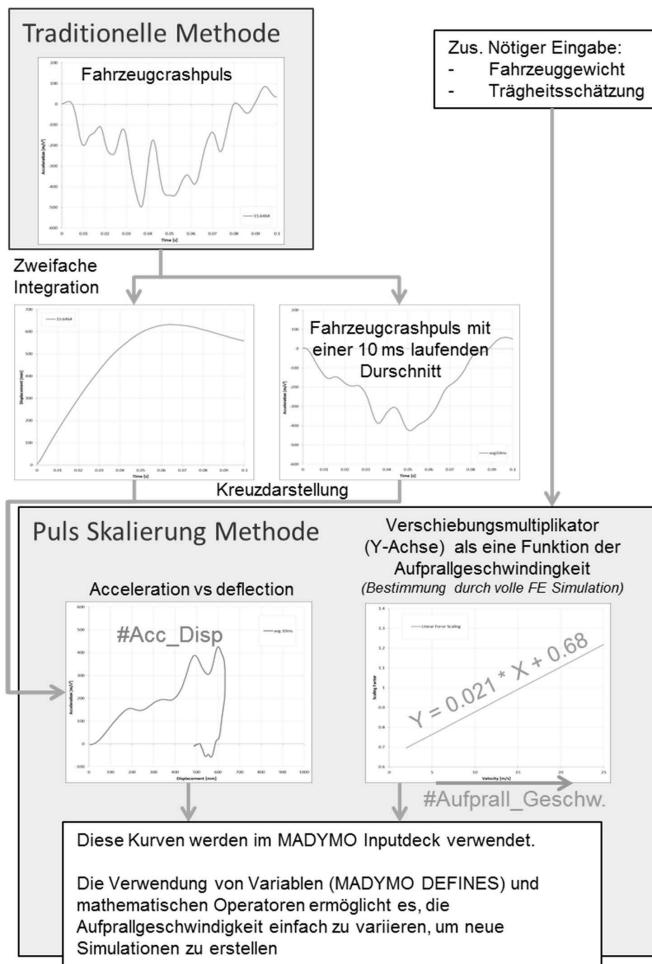


Bild 5: Übergangsprozess zur Crash-Puls-Skalierung -Methode

Zusätzlich besteht die Notwendigkeit, eine gewisse Skalierung auf die berechnete Fahrzeugsteifigkeitscharakteristik anzuwenden, um Verhältnisabhängigkeiten zu ermöglichen. Es wird erwartet, dass sich eine Fahrzeugfront mit steigenden Aufprallgeschwindigkeiten steifer verhalten wird. Daher wurde eine Reihe von FE-Simulationen an zwei Toyota-Vollfahrzeug-FE-Modellen (10)(11) durchgeführt, um die generische Fahrzeugversteifung als Funktion der Aufprallgeschwindigkeit zu bestimmen. Dazu wurde der USNCAP 35 mph Full Width Frontal (FWF) Crashfall als Referenz verwendet und 5 zusätzliche Aufprallgeschwindigkeiten wurden wie in Tabelle 1 gezeigt simuliert.

Tabelle 1: FE-Modell Simulationsmatrix

	FWF [m/s]	FWF [m/s]	FWF [m/s]	FWF [m/s]	FWF [m/s]	FWF [m/s]
Camry	5.555	8.047	11.176	13.889	15.646	19.444
Yaris	5.555	8.047	11.176	13.889	15.646	19.444

Aus der FE-Simulation wurde die Fahrzeugbeschleunigung als Funktion der Verschiebung verwendet, um die Energie als Funktion der Verschiebung zu berechnen. Diese Energiefunktionen zeigten einen deutlichen Trend, dass bei niedrigeren Aufprallgeschwindigkeiten für die gleiche Deformationsmenge weniger Energie abgeführt wurde. Siehe Abbildung 6 als Beispiel aus den Yaris-Simulationen, bei denen die Energiekurve aus dem 15,64 m/s-Aufprall auf die 5,55 m/s Energiekurve skaliert wird. Dieses Skalierungsprinzip wurde für beide Fahrzeuge und alle simulierten Aufprallgeschwindigkeiten durchgeführt. Die Skalierungsfaktoren als Funktion der Aufprallgeschwindigkeit sind auch in Abbildung 6 dargestellt.

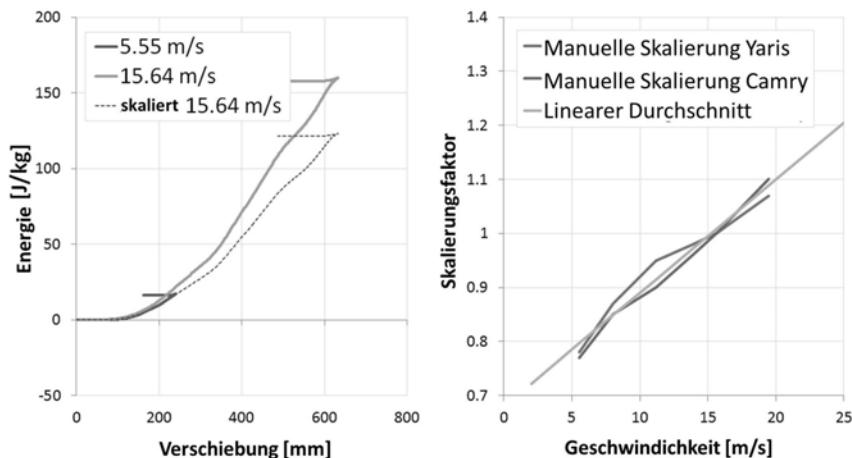


Bild 6: Crash Puls Steifigkeitskompensation

Daraus wurde eine mittlere Skalierungsfunktion (siehe Abbildung 5) so berechnet, dass die Fahrzeugsteifigkeit automatisch auf die entsprechende Steifigkeit für die gewählte Fahrzeugaufprallgeschwindigkeit skaliert wird. Diese durchschnittliche Skalierungsfunktion wird auch auf unser generisches D-Klassen Fahrzeug angewendet, wie es in dieser Simulationsstudie verwendet wird.

In Abbildung 7 werden die Fd-Kurven-Methodenimpulse aus dem Toyota Yaris mit den traditionellen Methodenpulsen verglichen, die auf den in dieser Studie durchgeföhrten Serien-FE-Simulationen basieren. Der Basis-Fd-Kurven-Impuls wird auf der Basis des 15,6 m/s-Impulsschlags erzeugt. Bei den anderen Aufprallgeschwindigkeiten wird dieser Impuls automatisch nach dem oben beschriebenen Methode skaliert.

Für die Crashfälle, bei denen die Aufprallgeschwindigkeit niedriger ist als die Geschwindigkeit, auf der die Fd-Kurve basiert, entsprechen die Geschwindigkeitsprofile den Geschwindigkeitsprofilen aus den FE-Simulationen für beide untersuchten Fahrzeuge (Yaris und Camry).

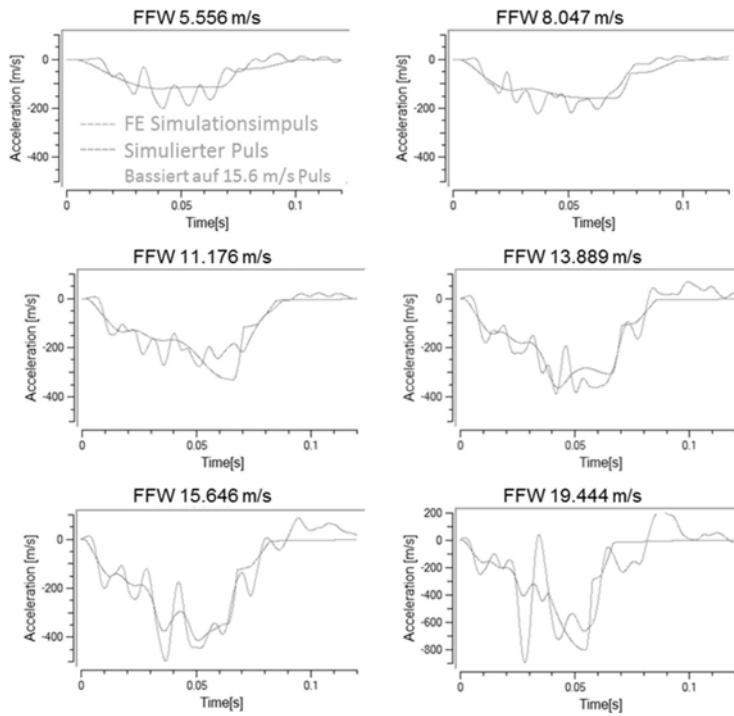


Bild 7: Toyota Yaris FE-Impulse im Vergleich zu 15,6 m/s skalierten Impulsen

3.2 Airbag-Zündung

Mit der Fähigkeit, Fahrzeugstöße bei unterschiedlichen Aufprallgeschwindigkeiten zu simulieren, müssen wir auch das Abfeuern der Sicherheitssysteme wie Airbag und Gurtvorspanner anpassen. Eine allgemein verwendete Richtlinie, um die Zeitanforderung dafür zu setzen, ist die sogenannte 5"-30ms-Regel (11). Diese Regel basiert auf der Annahme, dass ein nicht angeschnallter Insasse sich 5 Zoll bewegt, bevor der Airbag vollständig ausgelöst ist und die vollständige Airbagauslösung 30 ms dauert. In einem Beispiel, in dem sich ein nicht angeschnallter Insasse 5 Zoll in 50 ms bewegt, entspricht die Airbag-Zündzeitanforderung dann 50ms-30ms = 20 ms.

Für unser generisches D-Klasse-Fahrzeug haben wir die Zündzeitberechnungen nach der 5"-30ms-Regel durchgeführt und diese gegen die Aufprallgeschwindigkeit aufgetragen, wie

in Abbildung 8 dargestellt. Für die MADYMO-Simulationen haben wir eine Konstruktion in der MADYMO-Eingabedatei mit DEFINES und regulären Ausdrücken erstellt, sodass unterhalb von 20 km/h die Airbags nicht ausgelöst werden und über 65 km/h eine konstante Zündzeit bei 8 ms eingehalten wird. Für die Aufprallgeschwindigkeiten zwischen 20 und 65 km/h wird die entsprechende Zündzeit automatisch berechnet. Bei den MADYMO-Simulationen wird die Airbag-Triggerung dann automatisch geändert, wenn sich die Aufprallgeschwindigkeit ändert.

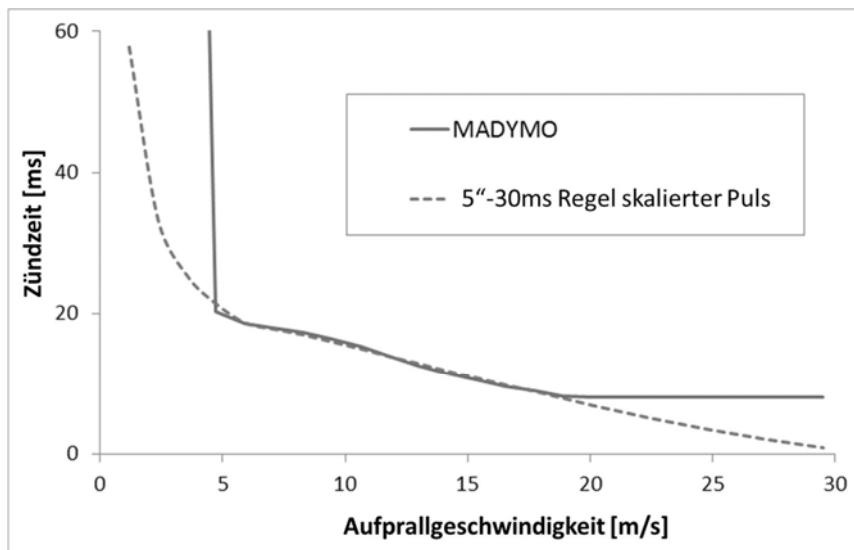


Bild 8: Airbag-Zündzeit als Funktion der Aufprallgeschwindigkeit

3.3 Bremsimpuls

Zur Simulation des AEB-Events wählten wir zwei Verzögerungsstufen, 0.4 g und 0.8 g. Die Bremsverzögerungen wurden aus einer Reihe von Freiwilligentests entnommen, die wir durchgeführt haben, um die Prækollisionsbewegung unseres MADYMO AHM zu verbessern. Diese Kurven sind in Abbildung 9 dargestellt.

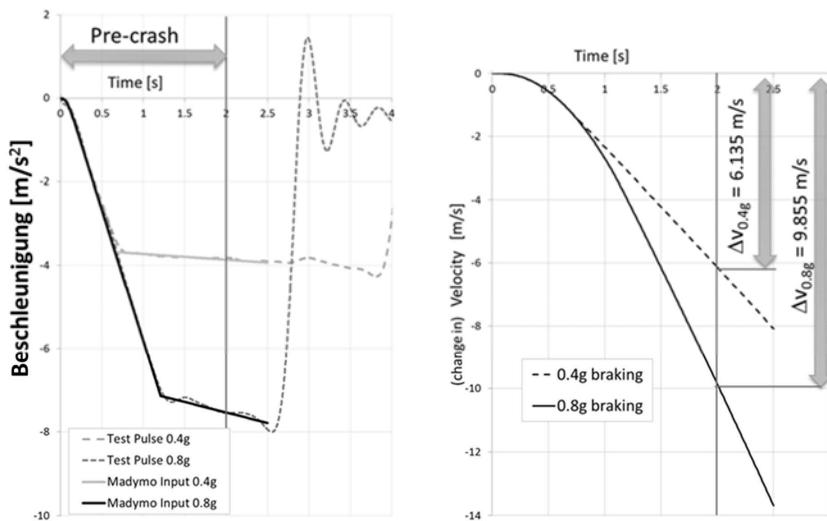


Bild 9: Bremsimpulse, die in der Simulationsstudie verwendet werden

3.4 Simulationsaufbau

In der vorgestellten Studie haben wir separate MADYMO-Modelle für Fahrer und Beifahrer mit 50% -igen Insassen (HybridIII, THOR und AHM) erstellt. Für die Vorkollisionsphase haben wir uns entschieden, diese Bewegung über ein FREE_ROT_DISP-Gelenk zu beschreiben, dass die AEB-Bremsbewegung beschreibt. Obwohl wir uns in der vorgestellten Studie auf AEB konzentrieren, erlaubt uns die gewählte Methode, jede Prækollisionsbewegung über diese Methode zu simulieren (siehe Abbildung 10).

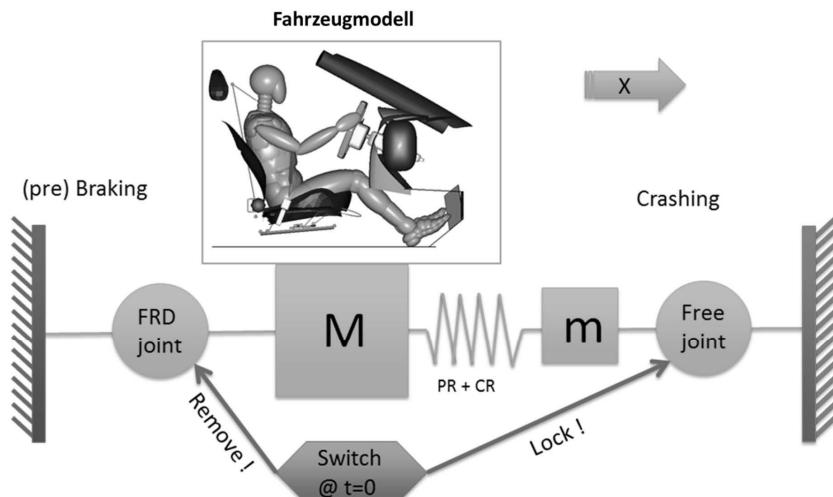


Bild 10: MADYMO-Modell-Setup

In der gewählten Einstellung simulieren wir 2 Sekunden der Vorkollisionsphase. Bei $t = 0$ wechselt das Modell in die Crashphase mit der berechneten Crash-Steifigkeit, die aus der Pulse Skalierungs-Methode für dieses D-Klasse-Fahrzeug abgeleitet wurde. Zwölf verschiedene Aufprallgeschwindigkeiten wurden von 5 bis 60 km/h in Schritten von 5 km/h simuliert.

3.5 AIS Verletzungen

Zur Schätzung und Quantifizierung des relativen Nutzens der Aufprallgeschwindigkeitsreduzierung als Folge der AEB haben wir in unserer Simulationsstudie AIS2+ (siehe Tabelle 2) Verletzungsrisiken (12)(13)(14) verwendet. Der AIS-Schweregrad ist eine relative Skala der Lebensbedrohung. Die meisten Protokolle basieren auf dem Risiko von AIS3+ Verletzungen mit dem Ziel, Todesopfer zu reduzieren. Allerdings gibt es auch Verletzungen mit geringerer AIS-Schwere (15), die einen erheblichen Verlust an Körperfunktionen verursachen können und daher als Belastung in der Gesellschaft gelten. Wir wissen durchaus, dass ein grundlegender Verletzungswert fehlt, der dieses Risiko des Verlustes von Körperfunktionen entspricht. Die Berechnung der Risiken für geringere Schwereverletzungen ist ein Anfang, um diese Art von Verletzungen zu beurteilen, die die Todesfälle nicht beeinflussen, aber einen großen Einfluss auf die langfristige Gesundheit und Trauma haben können.

Es ist zu beachten, dass einige der verwendeten AIS2+ -Funktionen einen großen Versatz bei Nullbelastung zeigen, was zu einem Pjont von 0.316 führt. Die absoluten Verletzungsrisikoprognosen erwägen wir daher als nicht ganz richtig. Um die relativen Verletzungsrisikoverbesserungen zu bewerten, haben wir diese Funktionen auf Null verschoben.

Tabelle 2: Verletzung Risikokurven für AIS2+ in dieser Studie verwendet

Body Region	Hybrid-III, THOR, AHM
Head (12) <i>HIC15</i>	MAIS 2: $[1 + \exp((2.49 + 200 \cdot \text{HIC}) \cdot 0.00483 \cdot \text{HIC})]^{-1}$
Neck (13) <i>Nij</i>	$p(\text{AIS} \geq 2) = \frac{1}{1 + e^{2.054 - 1.195 \cdot Nij}}$
Chest (13) <i>Defl. [mm]</i> <i>Chest3ms [g]</i> <i>CTI</i>	$p(\text{AIS} \geq 2) = \frac{1}{1 + e^{(1.8706 - 0.04439 \cdot D_{\text{max}})}}$ $p(\text{AIS} \geq 2) = \frac{1}{1 + e^{(1.2324 - 0.0576 \cdot A_{\text{ct}})}}$ $p(\text{AIS} \geq 2) = \frac{1}{1 + e^{(4.847 - 6.036 \cdot CTI)}}$ $P_{\text{chest}}(\text{AIS} \geq 2) = \max(P_{D_{\text{max}}}, P_{A_{\text{ct}}}, P_{CTI})$
Femur (13) <i>Force [kN]</i>	$P(\text{AIS} \geq 2) = \frac{1}{1 + e^{(5.795 - 0.5196 \cdot F)}}$
All (14)	$P_{\text{joint}} = 1 - (1 - P_{\text{head}}) \times (1 - P_{\text{neck}}) \times (1 - P_{\text{chest}}) \times (1 - P_{\text{femur}})$

4. STUDIENERGEBNISSE

Für die Ergebnisse von Schritt 1, 2 und 3 der Methodik verweisen wir auf Tijssens et al. (1) für eine detaillierte Beschreibung hin. In dieser Veröffentlichung konzentrieren wir uns auf die Vorstellung der Ergebnisse von Schritt 4.

4.1 Schritt 4: Referenz und AEB

In Tijssens et. al. (1) berichteten wir, dass die AHM eine signifikant größere Vorwärtsbewegung aufgrund einer Aktivierung von AEB im Vergleich zu einem Hybrid-III unter den gleichen Belastungsbedingungen zeigte. In unserer neueren Studie verglichen wir nun die Vorwärtsbewegung der Insassen, wenn sie dem 0.4g und 0.8g Bremsimpuls mit und ohne Aktivierung neuer Rückhaltefunktionen ausgesetzt wurden. In der aktuellen Studie haben wir den motorisierten Sitzgurt (MSB) den Modellen hinzugefügt, die zur gleichen Zeit von AEB aktiviert werden.

Wir berechneten die relativen Positionsverschiebungen der Insassen und verglichen diese mit den Ausgangspositionen. Die ausgewählten Ausgangsstellen sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Relative Verschiebungsstellenausgänge

AHM	Hybrid-III	THOR
Head	Head	Head
T1	NeckPlateLow	ThoracicSpineUp
T12	ThoracicSpine	ThoracicSpineLow
	LumbarLC1	
Pelvis	Pelvis	Pelvis

Wenn man die relativen Bewegungen zwischen den drei simulierten Insassen betrachtet, hat man gesehen, dass der AHM im Vergleich zu Hybrid-III und THOR mehr Vorwärtsbewegungen zeigt. Dies ist in der linken Bewegungsreihe für den Beifahrer in Abbildung 11 zu sehen. Vergleiche dieser Ergebnisse mit den Freiwilligen Tests, die wir durchgeführt haben, machen deutlich, dass die AHM näher an dem liegt, was wir in diesen Tests bei den Freiwilligen gemessen haben. Obwohl die Hybrid-III und die THOR auch eine Vorwärtsbewegung zeigen, wird festgestellt, dass der AHM näher an einer wirklichen Lebenssituation liegt.

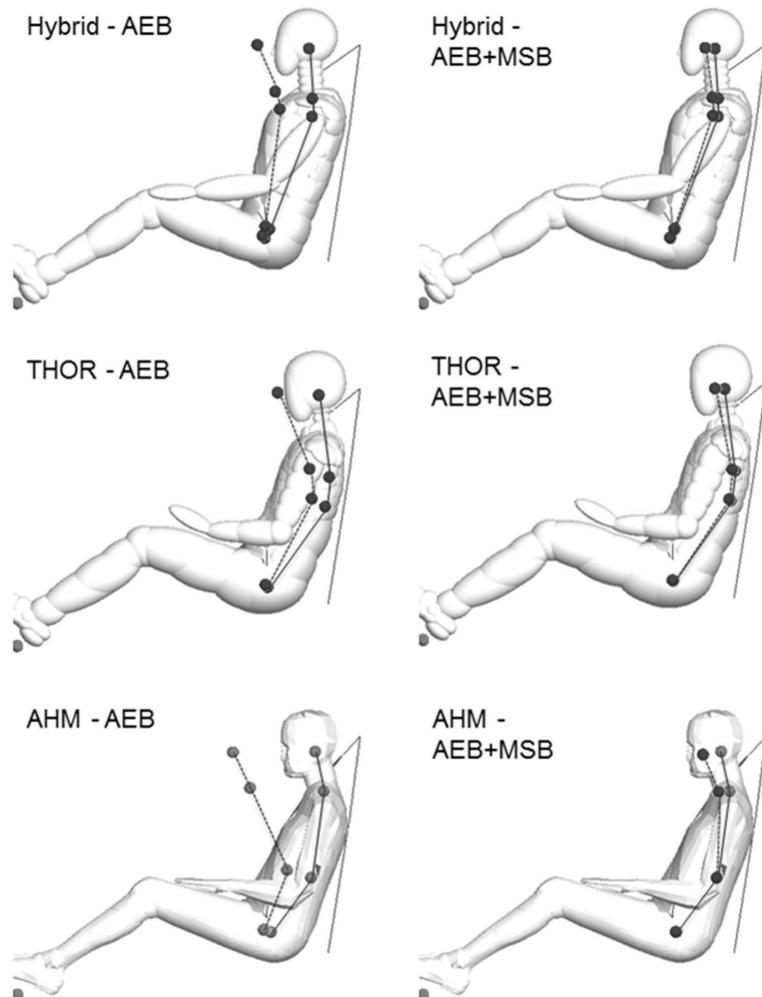


Bild 11: Beifahrer -AEB-Positionen im Vergleich zu Anfangspositionen mit 0,8 g Bremsen

Bei der Aktivierung des MSB beobachteten wir eine signifikante Reduktion der Vorwärtsbewegung der Insassen, siehe die rechte Spalte der Insassenbewegungen von Abbildung 11, wobei der AHM nach wie vor eine signifikant größere Vorwärtsbewegung im Vergleich zu Hybrid-III und THOR zeigt.

4.2 Schritt 4: DOE Ergebnisse

In der vorgestellten Studie haben wir die Aufprallgeschwindigkeit als Variable verwendet, um den Nutzen eines AEB-Systems für ein Standard-State-of-the-Art-Rückhaltesystem zu quantifizieren. Wir haben diese Simulationen mit dem AHM, Hybrid-III und THOR für Fahrer und Beifahrer durchgeführt. Mit der durchgeführten Simulationsstudie sind wir in der Lage, die AIS2+ Risikowerte in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit darzustellen und zeigen den relativen Nutzen des AEB-Systems, siehe Abbildung 12.

Aus den Graphen geht hervor, dass bei einer Abnahme der Aufprallgeschwindigkeit von 16 m/s auf ca. 12 m/s eine deutliche Reduzierung des AIS2+ Verletzungsrisikos besteht. Beim Vergleich der Hybrid-III, THOR und AHM wird ein ähnlicher Trend gezeigt. Zwischen 12 m/s und 16 m/s Aufprallgeschwindigkeit wird eine ähnliche Verletzungsrisikovorhersage geschätzt. Wenn die Aufprallgeschwindigkeit weiter unter 12 m/s auf ca. 5 m/s sinkt, beobachten wir einen horizontalen Trend im erzielten Nutzen aus der Aufprallgeschwindigkeitsreduzierung durch AEB, wobei der THOR eine etwas höhere Verletzungsrisikoprognoze gegenüber dem Hybrid-III und dem AHM zeigt. Die Analyse der einzelnen Verletzungsergebnisse zeigt, dass der Hauptbeitrag zum erwähnten horizontalen Trend das Risiko der Verletzungsgefahr ist.

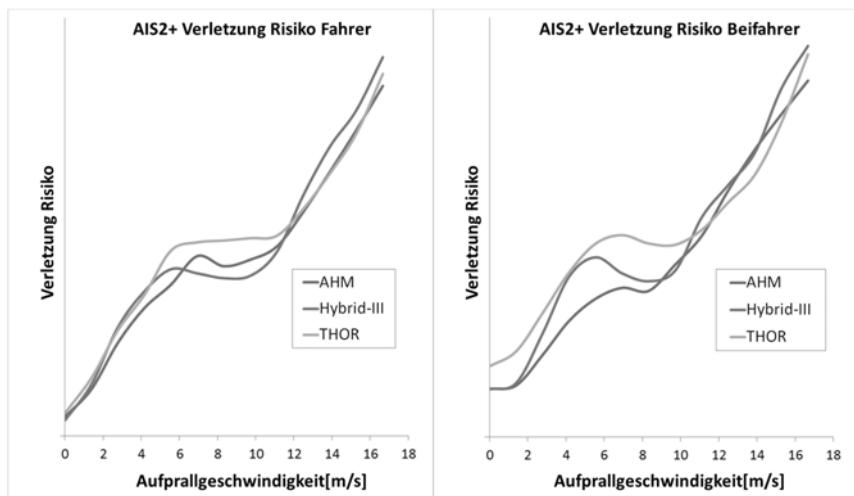


Bild 12: AIS2+ Verletzungsrisiko für Fahrer (links) und Beifahrer (rechts) mit Standard-Rückhaltesystem.

Weiter in Schritt 4, ließen wir mehrere DOE's, in denen wir die Rückhalteparameter zusammen mit der Aufprallgeschwindigkeit geändert haben laufen. Von diesen berichten wir über 2 DOE-Sessions in dieser Veröffentlichung, DOE1 und DOE2. Die gewählten Variationen und Einstellungen sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: DOE Simulationsmatrix

Setting	DOE1	DOE2
No. of runs / occupant	144	72
Impact speed [m/s]	1 - 16.6667	4.4 - 16.6667
Load Limiter Level [N]	400 - 3600	400 – 3600
MSB	Activated	Activated
Airbag	Activated	De-activated

Für die Erzeugung eines zufälligen Satzes von Designs verwendeten wir den Hypercube-Algorithmus von Altair HyperStudy, wie in Abbildung 13 gezeigt. Die gezeigten Designs wurden in den XMADgic Simulation Generator (16) exportiert, der alle MADYMO Simulations-eingangsdecke erzeugte.

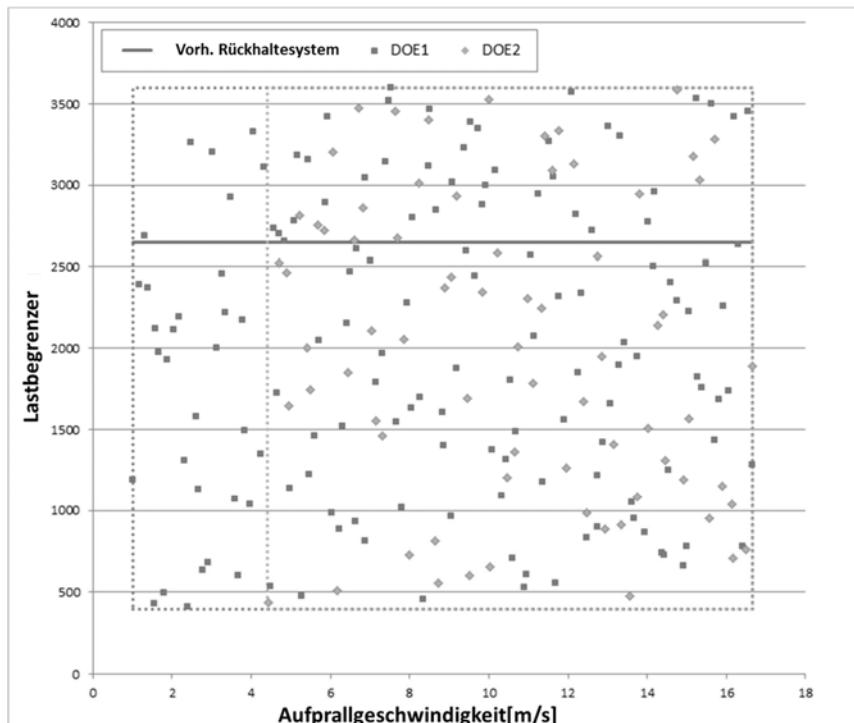


Bild 13: DOE-Designvariablen

Für DOE1 und DOE2 ließen wir insgesamt 1296 Simulationen mit einer Simulationszeit von 2.13 s laufen. Mit einer durchschnittlichen Laufzeit von 4 Stunden pro Simulation und bei Verwendung 1 CPU pro Simulationslauf benötigten wir 5300 Stunden CPU-Zeit. Die Simulationen liefen auf einem Linux-Cluster mit 72 CPUs und haben diesen für 3 Tage belegt.

Als Beispiel sind die Ergebnisse der DOE-Läufe der Fahrer und Beifahrer in Abbildung 14 – Abbildung 19 dargestellt. Wir beobachten, dass:

- Die Leistungsfähigkeit des Rückhaltesystems zeigt im Entwicklungsbereich (Aufprallgeschwindigkeit 15,6 m/s) eine optimale Leistung mit dem Standard-Rückhaltesystem.
- Für den unteren Bereich der Aufprallgeschwindigkeiten können bis zu 12 m/s signifikante Verbesserungen des Verletzungsrisikos erreicht werden.

- Bei einem deaktivierten Airbag (mit aktivierte Gurtstraffern) ist auch eine Verbesserung des AIS2+ Verletzungsrisikos möglich.
- Es zeigt deutlich den Vorteil des Airbags bei höheren Aufprallgeschwindigkeiten, vor allem für den AHM-Fahrer und den Beifahrer. Über den Aufprallgeschwindigkeiten von 12 m/s steigt das AIS2+ Verletzungsrisiko deutlich an, was vor allem durch das Nacken-Verletzungsrisiko verursacht wird.
- Für Aufprallgeschwindigkeiten zwischen 4 m/s und 8 m/s für den Hybrid-III- und AHM-Fahrer wird die beste Leistung erreicht, ohne den Airbag auszulösen.

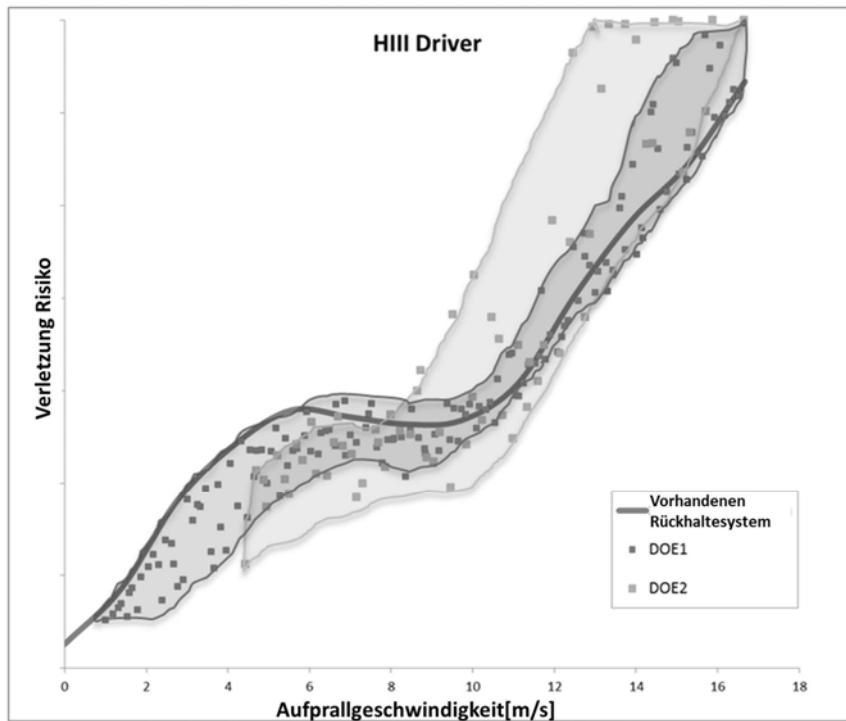


Bild 14: DOE AIS2+ Ergebnisse für HybridIII 50% -Fahrer

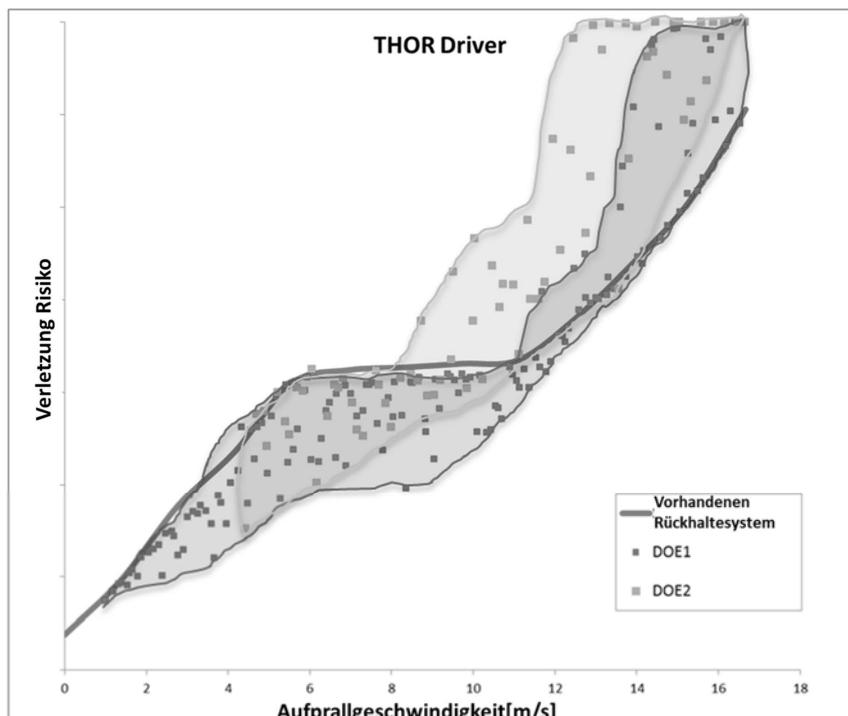


Bild 15: DOE AIS2+ Ergebnisse für THOR 50% -Fahrer

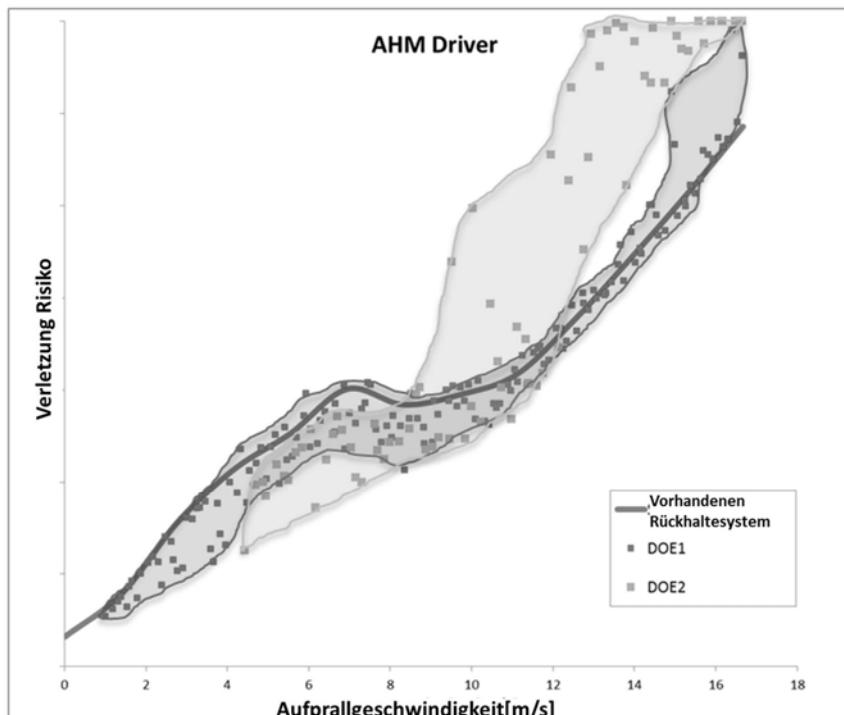


Bild 16: DOE AIS2+ Ergebnisse für AHM 50% -Fahrer

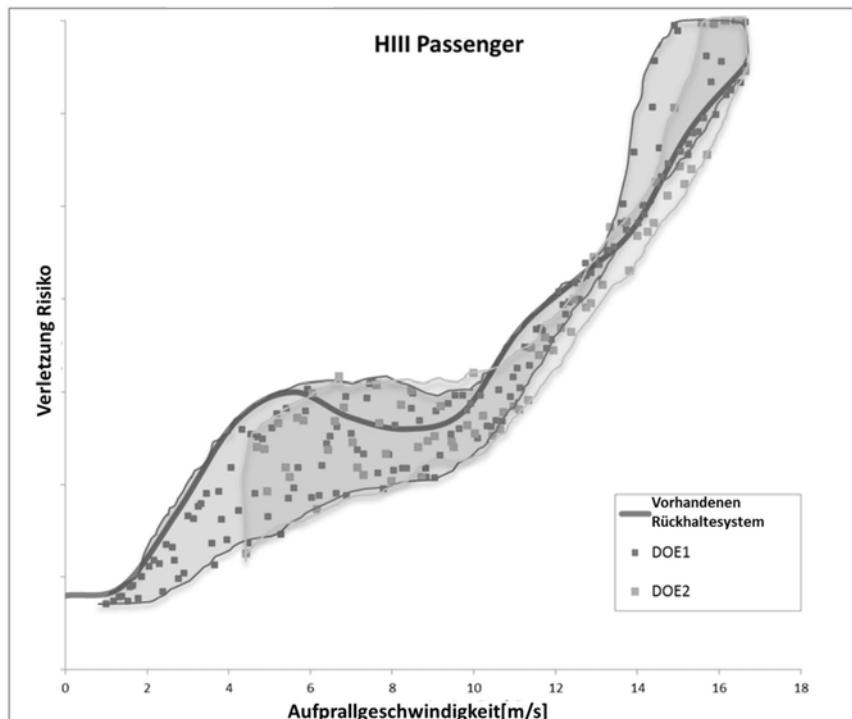


Bild 17: DOE AIS2+ Ergebnisse für HybridIII 50% - Beifahrer

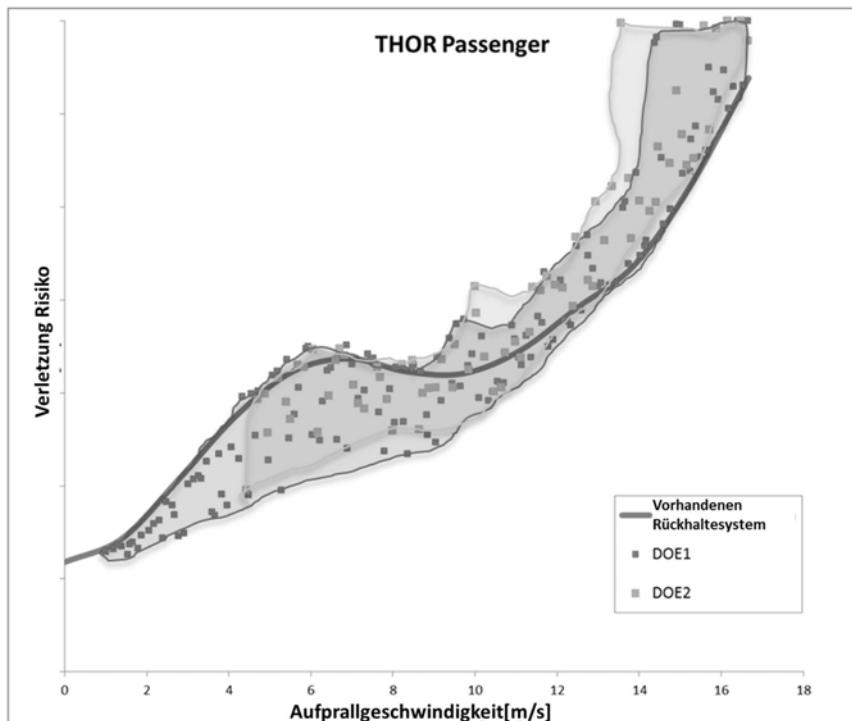


Bild 18: DOE AIS2+ Ergebnisse für THOR 50% - Beifahrer

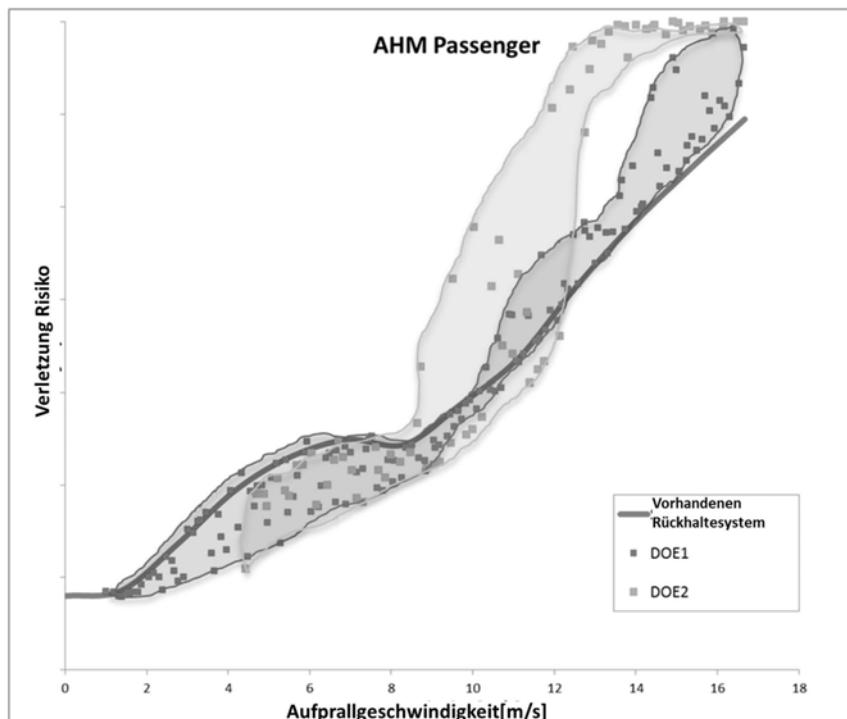


Bild 19: DOE AIS2+ Ergebnisse für AHM 50% - Beifahrer

Das Verbesserungspotential des Rückhaltesystems als Funktion der Aufprallgeschwindigkeit ist in Abbildung 20 und Abbildung 21 dargestellt, die dieses Potential gegenüber dem theoretisch niedrigsten AIS2+ Verletzungsrisikowert (0,316) zeigen.

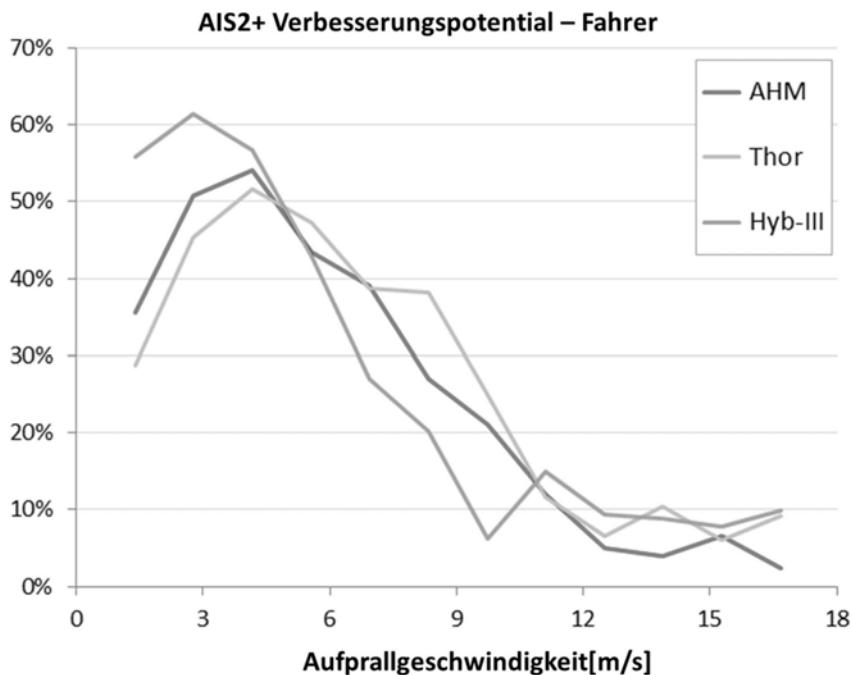


Bild 20: Theoretisches Verbesserungspotential AIS2+ als Funktion der Aufprallgeschwindigkeit für den Fahrer

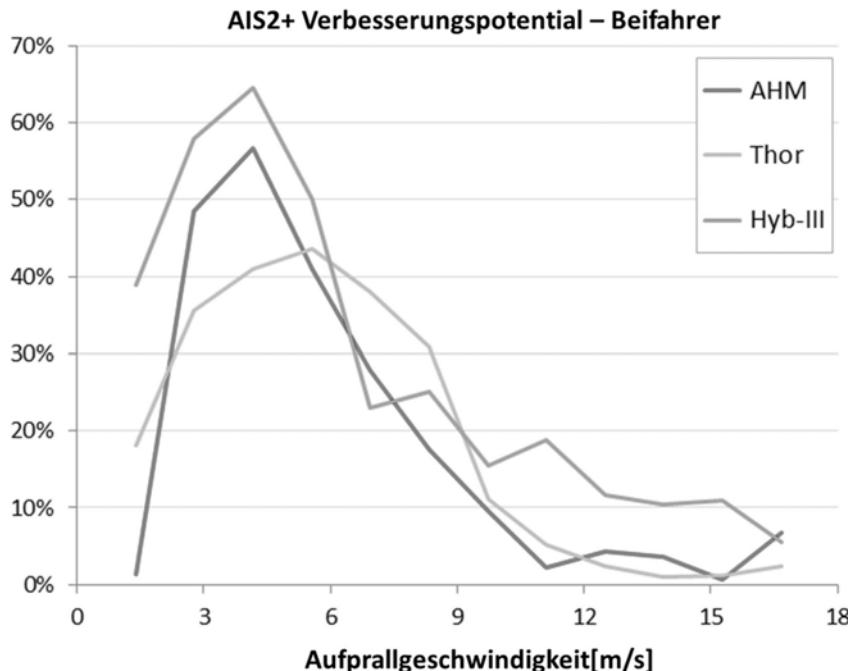


Bild 21: Theoretisches Verbesserungspotential AIS2+ als Funktion der Aufprallgeschwindigkeit für den Beifahrer

Bei der Analyse der Ergebnisse zeigt sich, dass für den unteren Bereich der Aufprallgeschwindigkeiten ein Lastbegrenzer, der mit einem niedrigeren Kraftniveau arbeitet, dem AEB-System den erwarteten Nutzen, wie in Abbildung 20 und Abbildung 21 dargestellt bieten kann. Als Beispiel hierfür wurden das AIS2+ Verletzungsrisiko für die Brustkrümmung des AHM-Fahrers als Funktion der Aufprallgeschwindigkeit für alle berechneten DOE1-Ergebnisse aus unserer Studie aufgetragen, siehe Abbildung 22. In dieser Darstellung ist das AIS2+ Verletzungsrisiko für das Standard-Rückhaltesystem mit einem Lastbegrenzerwert von 2650N (orange) verglichen mit einem System mit einem Lastbegrenzerwert von 400N (blau). Dieses Beispiel zeigt, dass für die höheren Aufprallgeschwindigkeiten (Protokollaufprallgeschwindigkeiten) das Standard-Rückhaltesystem den besten Schutz bietet. Bei Aufprallgeschwindigkeiten von bis zu ca. 9 m/s zeigt ein Lastbegrenzerwert von 400N die beste Leistung.

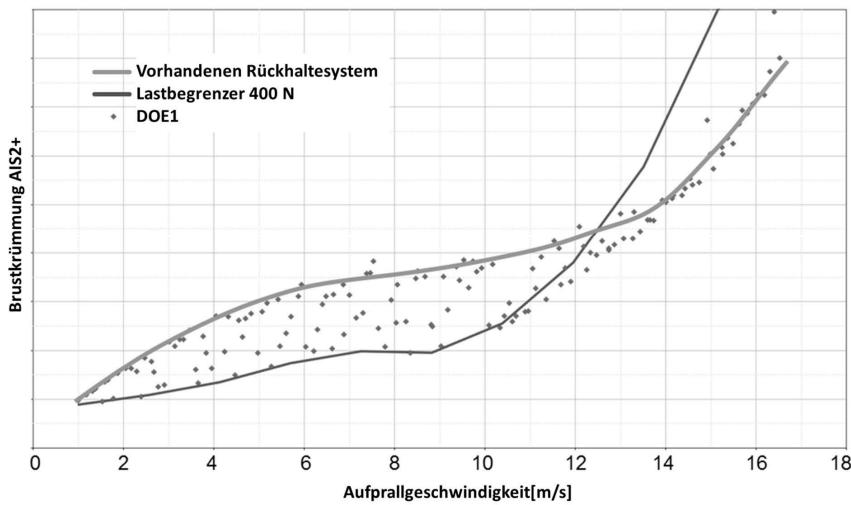


Bild 22: AHM-Fahrer-Brustkrümmung AIS2+ Verletzungsrisiko

5. DISKUSSION

Mit der vorgestellten Studie wird eine Simulationsmethode eingeführt, um die relative Verbesserung des AIS2+ Verletzungsrisikos für Aufprallgeschwindigkeiten niedriger als die Protokollaufprallgeschwindigkeiten zu beurteilen. Als solches könnte diese Studie ein Anfang sein, um die Wirksamkeit eines AEB-Systems zu quantifizieren. Es ist deutlich sichtbar, dass AEB-Systeme für die Insassen viel Nutzen bieten, da sie die Aufprallgeschwindigkeit effektiv reduzieren. Allerdings stellen wir in unserer Studie fest, dass der erreichbare Nutzen reduziert wird, wenn die Aufprallgeschwindigkeit unter ca. 12 m/s gesenkt wird. Durch die Veränderung einiger Rückhalteparameter sehen wir die Möglichkeit, die verschiedenen Rückhaltesysteme (MSB, Airbag, Gurtladungsbegrenzer) so anzupassen, dass für die geringeren Aufprallgeschwindigkeiten mit den derzeit verfügbaren passiven Sicherheitsbauteilen eine optimale Leistung erzielt werden kann. Ein Sicherheitssystem, das sich zum Beispiel an die Crash-Situation anpasst, würde in diesem Fall den maximalen Nutzen eines AEB-Systems bieten. Deshalb ist es für die Entwicklung der Rückhaltesysteme und Sicherheitssysteme der nächsten Generation wichtig, dass sie in einer integrierten Weise entwickelt werden, wobei gleichzeitig sowohl aktive als auch passive Systeme berücksichtigt werden.

LIMITIERUNGEN DIESER STUDIE

Unsere Studie konzentrierte sich auf einen "generischen" D-Klasse Fahrzeug und die Ergebnisse können für andere Fahrzeuge abweichen. In der vorgestellten Studie haben wir nur 50% -ige Insassen "in" Position für einen Crash-Ladezustand aufgenommen. Crash-Impulse basieren nur auf einem USNCAP-Crash-Puls. Mit mehr Untersuchungen auf zusätzliche La-debedingungen wie ODB, Auto zu Auto und möglicherweise Auto zu jedem Objekt, könnte diese Methode weiter verbessert werden.

ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

In diesem Beitrag wird eine Methodik und eine Werkzeugkette vorgestellt, die die Konstruktion von integrierten Sicherheitssystemen ermöglicht, d. h. Sicherheitssysteme, bei denen die aktiven und passiven Sicherheitssysteme als ein System konzipiert ist, dass den Insassen optimal schützt. Wir haben die Wirksamkeit der Methodik durch eine Beispielsimulationsstudie gezeigt.

In dieser Studie wurde eine Crash-Puls-Skalierungsmethode entwickelt, die auf einem USNCAP Full Width Frontal Test basiert, wobei der verfügbare 35 mph Crash-Puls eines Fahrzeugs verwendet wird. Auch die Abhängigkeit der Fahrzeugfront unter Crashbedingungen wurde berücksichtigt und eine durchschnittliche Richtwert angenommen. Mit der vorgestellten Methode scheint es möglich, die Aufprallgeschwindigkeit als Variable in DOEs zu verwenden.

Es wurde eine Methode zum Zünden des Airbags auf Basis der sogenannten 5"-30ms-Regel entwickelt, die automatisch die Airbag-Zündung mit der Aufprallgeschwindigkeit in den MADYMO-Simulationen verbindet.

In unserer vorgestellten Studie haben wir echte Bremsimpulse aus Freiwilligentests verwendet, um das AEB-Ereignis zu simulieren.

Zum Start haben wir niedrigere Schwere Verletzungen (AIS2+), die in erster Linie keine Auswirkungen auf Todesfälle, sondern einen großen Einfluss auf langfristige Gesundheit und Trauma haben untersucht.

Die Simulationsmethode zeigte, dass sie bei der Durchführung einer DOE-Studie wirksam war und dazu beigetragen hat, den Nutzen der Reduzierung der Aufprallgeschwindigkeit mit einem AEB-System zu beurteilen. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass derzeitige Systeme für geringere Aufprallgeschwindigkeiten von 5 m/s bis 12 m/s suboptimal arbeiten können. Ein Sicherheitssystem, das sich an die Crash-Situation anpasst, wird im dargestellten Fall voraussichtlich seinen vollen Nutzen für ein AEB-System bieten.

REFERENZEN

- [1] Martin G.A. Tijssens, Freerk Bosma, Kajetan Kietlinski, A methodology and tool chain to design integrated safety systems, JSAE 2015;
- [2] Berg, A.; Rücker, P.; Domsch, C. Presentation and discussion of a crash test using a car with autonomous pre-crash-braking. Paper 11-0318, ESV Conference, Washington, D.C., June 2011;
- [3] Mages, M.; Seyffert, M. and Class, U. Analysis of the Pre-Crash Benefit of Reversible Belt Pre-Pretensioning in Different Accident Scenarios. Paper 11-0442, ESV Conference, Washington, D.C., June 2011;
- [4] Klier, W.; Lich, T.; Freienstein, H.; D'Addetta, G. A.; Köhler, A.; Reckziegel, B.; Shiozawa, K.; Schulz, A.; Cuvillier, M. Interior sensing for occupant protection, AirBag 2016, Mannheim, Germany;
- [5] Happee R., et al., "Mathematical human body models representing a mid size male and a small female for frontal, lateral and rearward impact loading", IRCOBI, Sept. 20-22, 2000; Montpellier, France;
- [6] Meijer, R. et al., "Development of a Multi-body Human Model that Predicts Active and Passive Human Behaviour." In Proceedings of the IRCOBI Conference, Dublin, Ireland, September 12-14, 2012;
- [7] Meijer, R. et al., "Modelling of Bracing in a Multi-Body Active Human Model" In Proceedings of the IRCOBI Conference, Gothenburg, Sweden, September 11-13, 2013;
- [8] Hiroyuki Saito, Tetsuya Matsushita, Bengt Pipkorn, Ola Boström, Evaluation of Frontal Impact Restraint System in Integrated Safety Scenario Using Human Body Model with PID Controlled Active Muscles, IRCOBI Conference 2016;
- [9] Tony Gioutsos, Jeff Blackburn, Measuring the Performance of Active Safety Algorithms and Systems, SAE 2014 Active Safety Systems Symposium, Aug. 2014;
- [10] Freerk Bosma, Paul van Hooijdonk, Martin Tijssens, Kajetan Kietlinski, Michiel Unger, A Methodology to study the effect of AEB on injuries on 50% occupants, JSAE, May 2017;

- [11] Matthew Huang, Vehicle Crash Mechanics, Book from CRC Press, 2002;
- [12] NHTSA, Actions to Reduce the Adverse Effects of Airbags, FMVSS208, Depowering, Feb. 1997;
- [13] Rolf Eppinger et al., Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems – II, NHTSA, Nov. 1999;
- [14] NHTSA, Federal Register, Vol. 73, No. 134, July 11, 2008;
- [15] Seiffert, U., Wech, L., Automotive Safety Handbook, second edition, table 7.2, SAE International, 2007;
- [16] XMADgic Help Manual, MADYMO Workspace 7.6.1., TASS International, 2016.

Kindermenschmodellierung in der Unfallrekonstruktion im Vergleich zum Q6 Dummy

J. Holtz M.Sc, Dr. G. Müller, Prof. Dr. S. Müller, TU Berlin, Berlin

Kurzfassung

Menschmodelle bieten viele Möglichkeiten Verletzungen bei der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen zu analysieren. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden drei Unfälle herangezogen, für die bereits Daten aus Vollfahrzeugversuchen zur Verfügung stehen. In allen Unfällen wurde ein Q6 Dummy zur Darstellung des verunglückten Kindes genutzt. Diese Fälle wurden mit FE-Modellen des Q6 Dummies und des Menschmodells simuliert und analysiert. Für die Auswertung der FE-Modelle wurden die Verletzungsdaten aus den Realunfällen herangezogen. Um die Unterschiede zwischen Mensch- und Dummymodell unabhängig von der Fahrzeugumgebung hervorzuheben, wurden beide Modelle zusätzlich auf der ECE-R129 Sitzbank verglichen mittels genormten Frontal- und Seitenaufprall.

Unterschiede in den Simulationsergebnissen zwischen dem Menschmodell und dem Q6 Dummy zeigten sich vor allem in dem untersuchten Seitenaufprall und dem Schrägaufprall. Die Verletzungen aus den vorhandenen Unfalldaten konnten mit dem Menschmodell abgebildet werden. Zusammenfassend wurde gezeigt, dass das Menschmodell gut geeignet ist zur Unfallrekonstruktion und damit beispielsweise Rückschlüsse auf die Sicherungsqualität des Kindes gezogen werden können.

1. Einleitung

Menschmodelle bieten viele Möglichkeiten Verletzungen bei der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen zu analysieren. Im Gegensatz zu Dummymodellen weisen diese numerischen Menschmodelle ein deutlich biofideleres Verhalten auf. Die stetige Weiterentwicklung der kommerziell vertriebenen Erwachsenenmodelle in den letzten Jahren zeigt den Erfolg solcher Modelle, wie beispielsweise THUMS¹ und GHBMC². Kindermenschmodelle sind noch nicht sehr weit verbreitet. Das hier verwendete Kindermodell aus dem EU-Projekt PIPER³ ist als Open-Source-Modell verfügbar und soll mit Synergieeffekten bei der Weiterentwicklung von Menschmodellen helfen.

¹ THUMS – Total Human Model for Safety

² GHBMC – Global Human Body Models Consortium

³ PIPER – Position and Personalize Advanced Human Body Models for Injury Prediction

In der Unfallrekonstruktion ist es wichtig Verletzungsmechanismen und –ursachen genau darstellen zu können, aufgrund der biofiden Einschränkung von Dummies durch Anforderungen, die für den Testbetrieb von Bedeutung sind wie Wiederholbarkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer Schädigung, können Dummies nicht ohne Einschränkung genutzt werden. Vor allem bei Unfällen mit komplexen kinematischen Sequenzen wie beispielsweise Schräganprall oder Unfälle mit großen rotatorischen Anteilen können Dummies im Gegensatz zu Menschmodellen ihre biofide Grenzen erreichen. Allerdings sollten auch die Restriktionen von Menschmodellen beachtet werden, die vor allem auf ihren eingeschränkten Validierungsmöglichkeiten basieren.

Daher ist es wichtig Unterschiede auf Basis bekannter Fälle zwischen Dummies und Menschmodellen zu analysieren. Für das hier analysierte Kindermenschmodell werden Fälle, die mit Q6 Dummy rekonstruiert wurden, herangezogen. In dieser Untersuchung werden Fälle genutzt, bei denen das Kind ausschließlich auf Boostern ohne Rückenlehne saß, da einerseits die Vergleichbarkeit gewährt ist und andererseits die Kinder exponierter im Fahrzeug sitzen und somit sensiv auf fahrzeugspezifische Parameter ansprechen [1, 2]. Der Einfluss des Kinderrückhaltesystems ist dadurch geringer als bei Kindern, die in Kinderitzen kleinerer Klassen sitzen.

2. Methoden

Im ersten Schritt wurden geeignete Unfälle für die Analyse herausgefiltert. Als Datenbasis diente die Unfalldatenbank aus dem EU-Projekt CASPER⁴. In dieser Datenbank befinden sich Unfälle, bei denen mindestens ein Kind als Insasse eines Pkw beteiligt war. Alle Fälle wurden in Vollfahrzeugversuchen rekonstruiert. Folgende Kriterien wurden in der Fallauswahl berücksichtigt:

- Die Rekonstruktion wurde mit einem Q6 Dummy durchgeführt
- Das Kind saß auf einem Booster ohne Rückenlehne
- Das Kind war korrekt gesichert
- Das Kind hatte keine Interaktion mit einem Airbag

In Folge dieser Analyse konnten drei Unfälle identifiziert werden, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden. Zusätzlich wurden noch die frontalen und seitlichen Schlittentests für die Kindersitzzulassung nach ECE-R129 als weitere analysierte Fälle herangezogen.

Im zweiten Schritt wurden die identifizierten Unfälle und Schlittenversuche mittels FEM modelliert, simuliert und mit den verfügbaren Unfall- und Rekonstruktionsdaten verglichen.

⁴ CASPER – Child Advanced Safety Project for European Roads

Die Fahrzeuginsenräume wurden auf Basis des generischen Innenraummodells aus dem EU-Projekt PIPER [3] modelliert und somit vereinfacht dargestellt. Da bei allen Fällen das Kind auf einem Boostersitz ohne Rückenlehne saß, wurde ein vereinfachter Boostersitz zur Vergleichbarkeit in allen Simulationen verwendet. Der Gurt wurde durch einen einfachen 3-Punkt-Gurt ohne Pretensioner oder Gurtkraftbegrenzer dargestellt, da diese in den Unfallfahrzeugen auch nicht verfügbar waren. Der Insasse wurde durch ein FE-Modell des Q6 Dummies dargestellt.

Im dritten Schritt wurden die vorigen Simulationen nochmals durchgeführt, allerdings wurde der Q6 Dummy durch ein Menschmodell ersetzt, alle weiteren Parameter blieben gleich. Zum Einsatz kam hier das Kindermodell aus dem EU-Projekt PIPER.

Ausgewertet wurden von den Simulationen und den Rekonstruktionsdaten die Messwerte der Dummies die mit äquivalenten Messpunkten am Menschmodell verglichen wurden. Außerdem wurde die Kinematik der jeweiligen Modellen verglichen.

3. Modelle

Es wurde das Q6 Dummy FE-Model Version 1.0 benutzt [4]. Als Menschmodell wurde das Kindermodell herangezogen, welches im Rahmen des EU-Projektes PIPER entwickelt wurde. Das Modell entspricht einem 50%-Perzentil sechs jährigen Kindes. Es steht als Open Source Modell zur Nutzung frei zur Verfügung und wurde im Rahmen dieser Untersuchung nicht verändert. Das Innenraummodell für den schrägen Lastfall wurde auf Basis eines Laserscans eines Fahrzeugs von der TU Berlin im Rahmen des CASPER EU-Projektes erstellt. Das Innenraummodell für die frontalen Lastfälle wurde abgeleitet aus dem „Parametric Environment Model“ aus dem PIPER Projekt [4]. Dieses wurde angepasst auf die entsprechenden Unfallrekonstruktionsfälle. Das von der TU Berlin entwickelte Gurtmodell ist ein 2D-Gurt im Kontaktbereich zum Insassen und ist an den Enden und am Gurtschloss durch 1D-Elemente vereinfacht. Es wurde die standardisierte ECE-R129 Sitzbank, Gurtaufnahmen und Seitenimpaktor verwendet. Die Modelle wurden entwickelt von der TU Berlin und basieren auf den vorhandenen Versuchseinrichtungen, welche geometrisch den geforderten ECE-R129-Maßen entsprechen. Der Kindersitz wurde eigens für diese Analyse modelliert. Dieser basiert auf den Kindersitzen aus den Unfallrekonstruktionen.

4. Analysierte Lastfälle

Lastfall 1 – Schräger Aufprall

In dem ersten analysierten Realunfall fuhr das Fahrzeug 1 mit 60 km/h auf das stehende Fahrzeug 2 mit einem Winkel von 40° (Abbildung 1). Das Fahrzeug 1 traf das stehende

Fahrzeug auf Höhe des vorderen Radkastens. In der Unfallrekonstruktion wurden die in Abbildung 1 dargestellten Beschleunigungsverläufe ermittelt, welche auch im Simulationsmodell verwendet wurden.

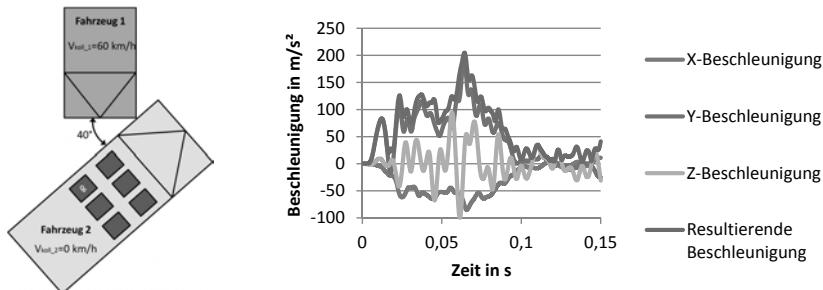


Bild 1: Unfallkonstellation und Fahrzeugverzögerungsverläufe für die erste Unfallrekonstruktion

Das auf der stoßzugewandten Seite sitzende 7 jährige Kind erlitt eine AIS 4 Kopfverletzung durch den Kopfaufprall auf die Scheibe. Es konnte kein Misuse festgestellt werden durch die Observation des Unfallwagens.

Lastfall 2 – Frontaler Aufprall mit großer Verzögerung

In dem zweiten analysierten Realunfall fuhren zwei Fahrzeuge ohne Offset frontal aufeinander. Es wurde ein EES von 70 km/h ermittelt. Dabei erlitt das Fahrzeug mit dem hier analysierten Insassen in der Unfallrekonstruktion eine Verzögerung mit einer maximalen Fahrzeugbeschleunigung von 54 g in Hauptlastrichtung. Auf dem Rücksitz saß fahrerseitig ein 8 jähriges Kind, welches jeweils AIS 4 Verletzungen am Kopf, in der Brust und im Abdominalbereich erlitt. Ein Kopfaufprall wurde nicht detektiert, auch konnte kein Hinweis auf Misuse gefunden werden.

Lastfall 3 – Frontaler Aufprall mit moderater Verzögerung

Im dritten analysierten Unfall fuhr ein Fahrzeug mit 84 km/h frontal in die Seite eines stehenden Fahrzeugs im 90° Winkel. Das stoßende Fahrzeug, in dem der hier analysierte Insasse saß erlitt eine maximal Beschleunigung von 25 g. Das 5 jährige Kind erlitt keine Verletzungen.

Lastfall 4 – Aufprall nach ECE-R129

Beim frontalen Aufprall nach ECE-R129 wird eine definierte Sitzbank mit einer Verzögerung von 25 g beaufschlagt. Im lateralen Aufprall wird zu dem vorgegebenen Geschwindigkeitskorridor ein Impaktor definiert, der die seitlich eindringende Tür darstellt. Dabei ist der Impaktor fest und die Sitzbank verschiebt sich relativ dazu (Abbildung 2).

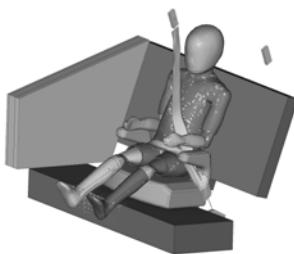


Bild 2: ECE-R129 Sitzbank mit vereinfachten Boostersitz, Q6 Dummy und Impaktor

5. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen analysierten Fälle dargestellt. Es werden dazu die Ergebnisse der Unfallrekonstruktionsversuche und der Simulationen mit Dummy und Menschmodell vorgestellt.

Lastfall 1 – Schräger Aufprall

Bei der ersten untersuchten Unfallrekonstruktion kam es vor allem zu schweren Kopfverletzungen. Diese konnten in der Unfallrekonstruktion im Versuch nicht nachgestellt werden. In den Simulationen zeigte allerdings der Kontakt zwischen Kopf und Scheibe deutliche Auswirkungen auf die Verletzungskriterien, beispielsweise lag der HIC₁₅ bei 1763 in der Simulation mit dem Menschmodell im Vergleich zu 21 im Realversuch und 356 in der Dummysimulation trotz Kopfkontakt mit der Scheibe (Tabelle 1).

Tabelle 1: Verletzungskriterien aus der ersten Unfallrekonstruktion

	Crashtest Q6	Simulation Q6	HBM ⁵ Simulation
a _{3ms} Kopf in g	23,80	48,16	47,46
HIC ₁₅	20,90	356,45	1762,82
max. Halskraft (res.) in kN	0,53	0,95	0,71
max. Halsmoment (res.) in Nm	27,06	37,18	8,35
Brusteindrückung in mm	N/A	5,89	29,76
a3ms Brust (res.) in g	25,59	30,66	50,90
a3ms Becken (res.) in g	21,15	34,45	25,54

⁵ HBM – Human Body Model

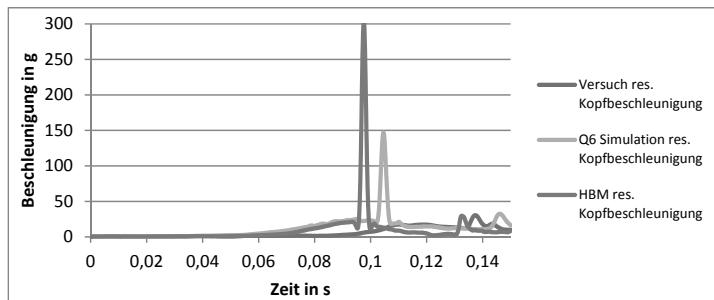


Bild 3: Resultierende Kopfbeschleunigung vergleichend zwischen Versuch, Q6 Simulation und HBM Simulation für die erste Unfallrekonstruktion

Auch in den Kurvenverläufen sind Ausschläge durch den Kopfaufprall deutlich sichtbar (Abbildung 3). Im Versuch findet dieser bei 135 ms statt. Bei den Simulationen geschah dies schon bei 100 ms. In der Visualisierung zeigt sich, dass vor allem nach dem Kopfaufprall der Kopf des HBM um die Z-Achse rotiert (Abbildung 4). Im restlichen kinematischen Ablauf sind sowohl Q6 Dummy, als auch HBM Simulation gleich.



Bild 4: Rotation des Kopfes ist bei dem Menschmodell nach dem Kopfaufprall größer als bei dem Q6 Dummy in der ersten Unfallrekonstruktion

Zusammenfassend zur ersten untersuchten Unfallrekonstruktion wurden die Kopfverletzungen in der physischen Unfallrekonstruktion und der Q6 Simulation nicht nachgestellt, allerdings in den Simulationen mit dem Menschmodell.

Lastfall 2 – Frontaler Aufprall mit großer Verzögerung

Aufgrund der hohen Fahrzeugverzögerungen konnten numerische Instabilitäten für die Q6 Dummy Simulation noch nicht behoben werden, daher werden hier nur die Versuchsdaten und die Simulationsdaten für das Menschmodell analysiert.

Die Auswertung der Versuchs- und Simulationsdaten ergab sehr hohe Kopfbelastungen von einem HIC_{15} -Wert von 2907 im Versuch und 2475 in der Simulation mit dem Menschmodell, obwohl es zu keinem Kopfanprall kam. Bei den Beschleunigungsaufnehmern in Brust und Becken kam es zu deutlichen Abweichungen (Tabelle 2). So liegt beispielsweise der a_{3ms} -Wert für die Brustbeschleunigung bei der Menschmodellierung bei 290 g im Vergleich zum Realversuch mit 79 g.

Beispielhaft wurden hier die resultierenden Beschleunigungsverläufe von Kopf, Brust und Becken in Abbildung 5 dargestellt. Die Kurven weisen Unterschiede auf und zeigen, dass der Bewegungsablauf im Vergleich zwischen Dummy in der Unfallrekonstruktion und dem Menschmodell in der Simulationsumgebung nicht ähnlich ist. Dies ist auch in den Videos sichtbar. Zwar trat sowohl im Versuch als auch bei der HBM-Simulation ein Kontakt zwischen Kinn und Brust auf und auch wurde Submarining beobachtet, allerdings konnte der Dummy nicht die Längung der Wirbelsäule darstellen.

Tabelle 2: Messwerte für den 2. Lastfall

	Q6 Versuch	Menschmodell	
		Werte	Veränderung in % zu Versuchsdaten
a_{3ms} Kopf in g	136,30	143,29	5,13
HIC_{15}	2906,78	2474,92	-14,86
max. Halskraft (res.) in kN	9,68	3,16	-67,35
max. Halsmoment (res.) in Nm	234,02	16,39	-93,00
Brusteindrückung in mm	32,29	36,35	12,57
a_{3ms} Brust (res.) in g	78,63	290,36	269,27
a_{3ms} Becken (res.) in g	76,91	119,02	54,75

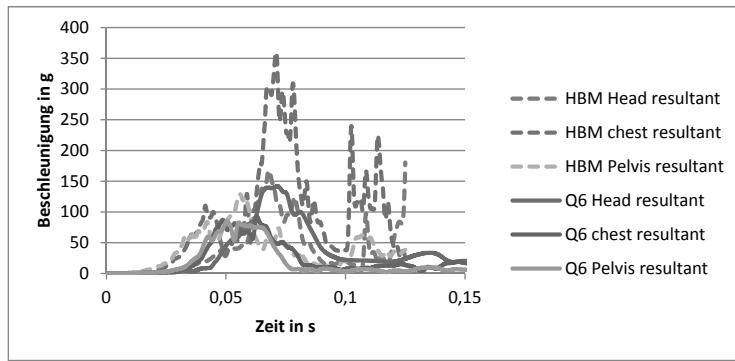


Bild 5: Vergleiche der Beschleunigungsdaten zwischen HBM und Q6 Dummy für die 2. Unfallrekonstruktion

Im Vergleich zu den Verletzungsdaten aus dem Realunfall konnte mit dem Menschmodellen gezeigt werden, dass die gemessenen Verletzungskriterien die aufgetretenen Verletzungen darstellen.

Lastfall 3 – Frontaler Aufprall mit moderater Verzögerung

In dem untersuchten Lastfall mit moderater Verzögerung wurde das Kind nicht verletzt. Dies spiegelt sich auch in Werten der Verletzungskriterien von dem ausgewerteten Versuch und den Simulationen jeweils mit Q6 Dummy und Menschmodell wider (Tabelle 3). Es zeigt sich, dass beim Verletzungsrisiko zwischen Versuch und Simulation die Abweichungen gering sind. Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass der gewählte Modellierungsansatz ausreichend genau gewählt wurde (Fahrzeuginnenraum, Kindersitz und Gurt), da Kurvenverläufe zwischen Versuch und Simulation vergleichbar sind (Abbildung 6).

Tabelle 3: Messwerte für die 3. Unfallrekonstruktion

	Q6 Versuch	Q6 Simulation	6YO HBM
a _{3ms} Kopf in g	35,90	35,07	44,88
HIC ₁₅	98,96	99,43	190,18
max. Halskraft (res.) in kN	0,99	1,50	1,27
max. Halsmoment (res.) in Nm	31,26	31,72	7,82
Brusteindrückung in mm	20,00	15,54	34,79
a3ms Brust (res.) in g	28,94	29,87	27,95
a3ms Becken (res.) in g	30,10	31,45	33,70

Der Vergleich zwischen Q6 Dummy und HBM Simulation zeigt ebenfalls Ähnlichkeiten auf. In Abbildung 6 sind resultierende Beschleunigungsverläufe dargestellt. Vor allem Brust- und

Beckenbeschleunigung haben vergleichbare Kurvenverläufe. In der Analyse der Visualisierung zeigten sich auch ähnliche kinematische Ketten zwischen Q6 Dummy und Menschmodell bis auf Hals- und Kopfbewegungen, allerdings zeigen sich im Rebound deutliche Unterschiede in der Kinematik (Abbildung 7).

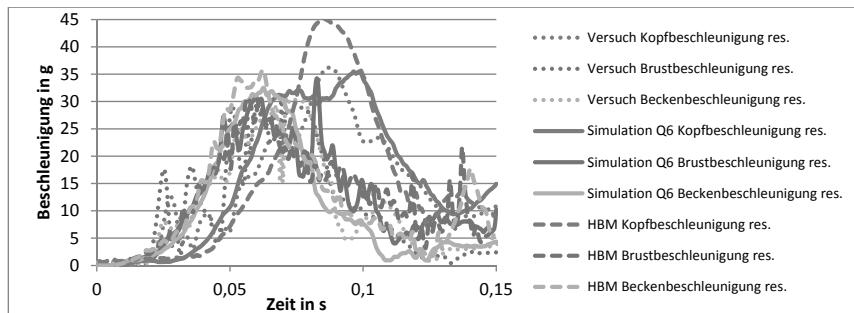


Bild 6: Resultierende Beschleunigungsverläufe im Vergleich zwischen Q6 und HBM Simulation für die 3. Unfallrekonstruktion

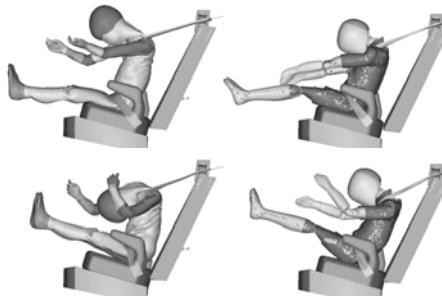


Bild 7: Kinematik unterscheidet sich bis 90 ms (oben) kaum, der unterschiedliche Rebound zeigt deutliche Unterschiede bei 120 ms (unten)

Des Weiteren zeigt sich eine deutlich größere Rotation um die Z-Achse der Schultern bei dem Menschmodell, da der Schultergurt bei dem Q6 Dummy höher rutscht, als beim Menschmodell, da der Thorax vom Menschmodell weicher ist, somit sich unter Gurtbelastung mehr verformt und dadurch mehr Widerstand gegen das Hochrutschen bietet. Zusammenfassend konnte zu dem hier analysierten Fall gezeigt werden, dass sowohl Q6 Dummy, als auch Menschmodell anhand der Messwerte und der Kinematik gezeigt haben, dass der Insasse ein geringes Verletzungsrisiko hat.

Lastfall 4 – Frontalaufprall nach ECE-R129

Im frontalen Lastfall nach ECE-R129 zeigt sich, dass der Schultergurt sowohl beim Menschmodell, als auch beim Q6 Dummy über die Schulter hinwegrutscht und somit der Oberkörper nicht optimal zurückgehalten wird (Abbildung 8). Generell ist zu sagen, dass die kinematischen Sequenzen beider Simulationen ähnlich sind, allerdings zeigt sich bei dem Menschmodell eine deutlich ausgeprägtere Drehung des Oberkörpers um die Z-Achse (Abbildung 8). Des Weiteren ist die Krümmung der Wirbelsäule, die Kopfvorverlagerung und der daraus resultierende Kinn-Brust-Kontakt ebenfalls ausgeprägter als beim Q6 Dummy (Abbildung 9).

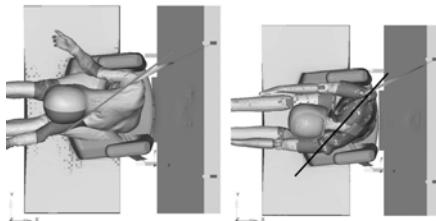


Bild 8: Rotation des Oberkörpers beim frontalen ECE-R129 Lastfall, Vergleich zwischen Q6 Dummy und Menschmodell

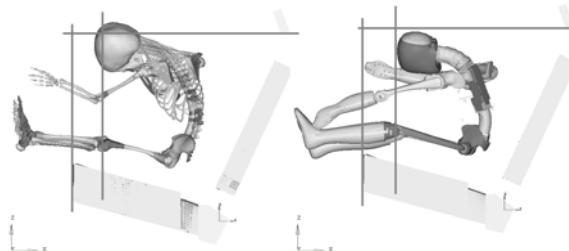


Bild 9: Das Menschmodell hat eine ausgeprägte Wirbelsäulenkrümmung und die Kopfvorverlagerung ist größer als beim Q6 Dummy im frontalen ECE-R129 Lastfall

Bei der Auswertung der Verletzungskriterien wird der Eindruck aus der visuellen Analyse bestätigt. Indikatoren für Kopfverletzungen haben eine große Abweichung (Tabelle 4). In den Kurvenverläufen der analysierten Beschleunigungsaufnehmer zeigen sich in den Brust- und Beckenbeschleunigungsverläufen wenig Unterschiede, während die Kopfbeschleunigung deutlich größere Abweichungen aufweist (Abbildung 10).

Tabelle 4: Verletzungskriterien für den vergleichend zwischen Q6 Dummy und HBM im frontalen und lateralen ECE-R129 Lastfall

	Frontal		Lateral	
	Simulation Q6	HBM 6YO	Simulation Q6	HBM 6YO
a _{3ms} Kopf in g	44,83	64,35	97,74	78,97
HIC ₁₅	166,17	393,89	1109,49	2029,01
max. Halskraft (res.) in kN	1,44	1,79	1,25	1,57
max. Halsmoment (res.) in Nm	24,98	8,81	31,92	8,44
Brusteindrückung in mm	21,30	39,26	12,61	24,99
a _{3ms} Brust (res.) in g	30,55	32,76	58,93	65,39
a _{3ms} Becken (res.) in g	44,13	52,51	72,45	55,75

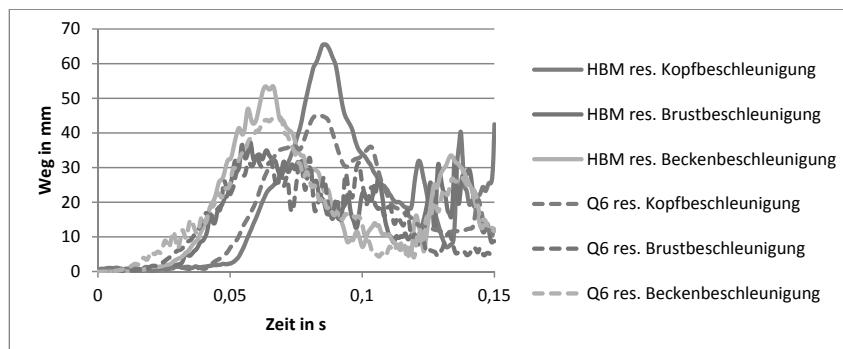


Bild 10: Beschleunigungsverläufe vergleichend zwischen Q6 und HBM im frontalen ECE-R129 Lastfall

Lastfall 5 – lateraler Aufprall nach ECE-R129

Im lateralen Lastfall nach ECE-R129 zeigen sich vor allem bei Kopf- und Halsbewegung deutliche Unterschiede zwischen Mensch- und Dummymodell. Die anfängliche laterale Scherbewegung hält bei dem Menschmodell deutlich länger an, das heißt, dass der Kopf des Q6 Dummies früher in eine rotatorische Bewegung geht, als der Kopf des Menschmodells. Des Weiteren längt sich der Hals des Menschmodells deutlich mehr, wodurch der Kopf beim Menschmodell von oben auf dem Impaktor trifft, währenddessen beim Q6 Dummy der Kopf schräg auf den Impaktor trifft (Abbildung 11). Der weitere Bewegungsablauf ist bei beiden Modellen ähnlich.

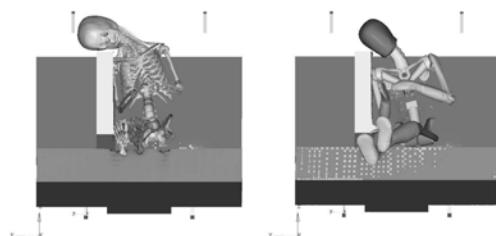


Bild 11: Kinematik beim Kopfaufprall unterscheidet sich im lateralen ECE-R129 Lastfall zwischen Menschmodell und Q6 Dummy deutlich

Die ausgewerteten Verletzungskriterien zeigen ebenfalls hohe Kopfbelastungen mit HIC-Werten von über 1000 beim Q6 Dummy bzw. über 2000 beim Menschmodell (Tabelle 4). Da der Kopf des Menschmodells auf die starre Grundplatte des Impaktors trifft, ist die Beschleunigung hier deutlich höher. Der Zeitversatz im Kopfaufprall zwischen Q6 Dummy und Menschmodell liegt bei 15 ms und verdeutlicht hier nochmal den Unterschied in der Kinematik.

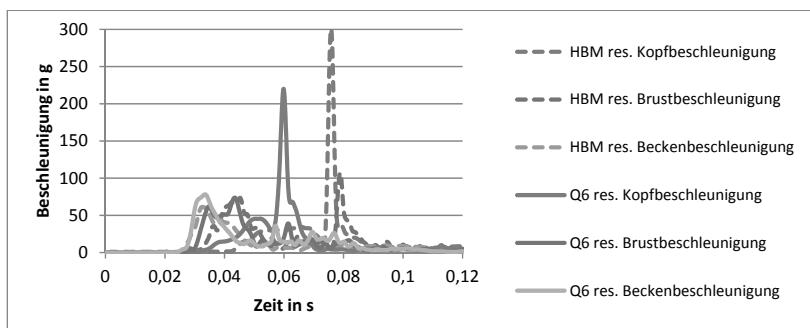


Bild 12: Beschleunigungsverläufe vergleichend zwischen Q6 und HBM im lateralen ECE-R129 Lastfall

6. Fazit

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das hier genutzte Menschmodell für die analysierten Fälle gute Ergebnisse liefert. Es hat sich gezeigt, dass bei moderaten frontalen Fahrzeugverzögerungen (z.B. ECE-R129) der Vergleich zwischen Dummy und Menschmodell zu ähnlichen Ergebnissen kommt. Bei Fahrzeugverzögerungen mit höheren Beschleunigungswerten kommt es bei dem Menschmodell zu größeren Kopfvorverlagerungen durch eine andere Kinematik in der Wirbelsäule, da diese durch Ausmodellierung jedes Wirbelkörpers flexibler ist als der Modellierungsansatz im Dummy mit einer starren Spinebox.

Diese Flexibilität in der Wirbelsäule erhöht außerdem die Verdrehung des Thorax um Z-Achse z.B. induziert durch den Dreipunktgurt. In lateralen und schrägen Lastfällen hat sich ebenfalls eine erhöhte Kopfverlagerung gezeigt. Durch den weicheren Thorax des Menschmodells zeigt sich die Brusteindrückung inhomogen, v.a. bei Interaktion mit dem 3-Punkt-Gurt. Die Messung der Brusteindrückung muss unter dieser Randbedingung nochmals analysiert und gegebenenfalls neu definiert werden. Abschließend kann die Benutzung von dem PIPER Kindermenschmodell für die Unfallrekonstruktion empfohlen werden.

- [1] Eggers, A. Sensitivity of Q10 and Q6 chest measurements to restraint and test parameters. 24th Enhanced Safety Vehicle Conference, 2015, Gothenburg, Sweden.
- [2] Tylko, S. Responses of the Hybrid III 5th Female and 10-year-old ATD Seated in the Rear Seats of Passenger Vehicles in Frontal Crash Tests. Proceedings of IRCOBI Conference, 2012, Dublin, Ireland
- [3] PIPER Deliverable 1.3 Final version of vehicle environment models. 2017
- [4] Humanetics Innovative Solutions, Inc. „Q6 Child Dummy Model LS-Dyna Release Version 1.0“; Plymouth (USA), 2013

