



13. VDI-Tagung

Fahrzeugsicherheit

Auf dem Weg zur Fahrzeugsicherheit 2030

Berlin, 30. und 31. Mai 2022

Bildquelle: © Programmausschuss der VDI-Tagung

VDI-BERICHTE

Herausgeber:

VDI Wissensforum GmbH

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.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 www.dnb.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2022

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

E-ISBN 978-3-18-102387-7

ISBN 978-3-18-092387-1

Inhalt

Vorwort 1
R. Schöneburg, VDI-Fachbeirat Kraftfahrzeugtechnik
S. Müller, Technische Universität Berlin

► **Neue Ansätze in der Fahrzeugsicherheit**

Einsatz innovativer Fond-Rückhaltesysteme in Mercedes-Benz Fahrzeugen am Beispiel Beltbag und Fondairbag 3
E. Gärtner, C. Singer, Mercedes-Benz AG, Sindelfingen

Crashtest einer Fahrzeugtür mit holzbasiertem funktionsintegriertem Türaufprallträger unter realitätsnahen Randbedingungen 19
D. Heyner, G. Piazza, E. Beeh, G. Seidel, C. Rieger, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart;
T. Große, D. Kohl, F. Fischer, Volkswagen Aktiengesellschaft, Wolfsburg

Active control of airbag filling: sensor, valve, test bench, best-practice of industry-university-cooperation 35
N. Shirur, C. Birkner, Technische Hochschule Ingolstadt;
A. Foster, Continental, Regensburg;
M. Bleeck, Vitesco Technologies, Regensburg

► **Impulsvorträge**

Kontrollierbarkeit und Akzeptanz einer unvorhergesehenen, reversiblen Hochleistungsgurtstraffung 47
G. Weller, O. Czepulowski, L. Diwischek, Joyson Safety Systems Aschaffenburg GmbH, Berlin;
F. Hoffmann, T. Miller, R. Schnabl, P. Sprongl, Joyson Safety Systems Aschaffenburg GmbH, Ulm

Flexible integration of airbag weakening lines in interior components 59
S. Dienert, Jenoptik, Jena

A study on occupant kinematics with a highly relined seatback position in a frontal crash 69
D. Tran, G. Müller, S. Müller, Technische Universität Berlin

Integration eines modularen Fahrerverhaltensmodells in das Simulationsframework openPASS zur Re-Simulation des Verkehrsunfallgeschehens auf Bundesautobahnen 89
K. Blenz, M. Mai, G. Prokop, Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik der Technischen Universität Dresden

Anforderungen an die Fahrzeuginnenraumgestaltung zur Erhöhung der Insassensicherheit im Unfallgeschehen mit Güterkraftfahrzeugen	109
D. Preissner, A. Schäuble, DEKRA Automobil GmbH, Stuttgart; W. Remlinger, P. Pomiersky, IKTD Universität Stuttgart	
Results of the EU project OSCCAR from Mercedes Benz perspective.	127
J. Dobberstein, C. Mayer, C. Kleinbach, Mercedes-Benz AG, R&D Fahrzeugsicherheit, Sindelfingen	
Ausbildung von Rettungskräften – Realitätsnahe Ausbildung mit Live Crash.	133
B. Scholz, IAV-Fahrzeugsicherheit GmbH & Co. KG, Großmehring; M. Pannhausen, Vetter, Lukas, IDEX, Züllich	
VTEHIL – A novel Technology for assessing the Safety Performance of full Vehicles in ADAS and ADS Scenarios	145
R. Hoffmann, Shanghai Digauto Automobile Technology Co., Ltd., Jiading, Shanghai, China	

► **Methoden und Ergebnisse der Unfallforschung**

Outlier-Crash Detection at the BMW Accident Research Program	157
V. Protschky, O. Jung, BMW Group, Munich	
Vermeintlich unwichtig? Unfälle zwischen Pkw und Radfahrenden an Grundstückszufahrten	173
M. Kühn, J. Bende, J. Ortlepp, Unfallforschung der Versicherer, Berlin	
Zusammenhang von Insassen-Verletzungsschwere und -Geschlecht: Belege für ein Gender Gap?	193
A. Malczyk, S. Kröling, Unfallforschung der Versicherer, Berlin	

► Zukünftige Herausforderungen beim Insassenschutz

Seat rotation as restraint concept for future vehicle interiors and seating positions	209
A. Weinkopf, S. Olders, IAV Fahrzeugsicherheit GmbH & Co. KG, Gifhorn	
Weibliche Dummies und Insassen-Dummies für das Autonome Fahren	223
T. Kinsky, C. Kleeßen, Humanetics Europe GmbH, Heidelberg	
Submariningverhalten unterschiedlicher FE-Menschmodelle in Sitzpositionen für automatisiertes Fahren	237
A. Srivats, A. Sporbart, M. Unger, IAT Ingenieurgesellschaft für Fahrzeugtechnik, Berlin	

► Sicherheitsaspekte bei alternativen Fahrzeugantrieben

Sicherheit ist keine Frage des Antriebs.	255
R. Justen, M. Hermle, R. Schöneburg, Mercedes-Benz AG, Sindelfingen	
Fahrzeugsicherheit 2030 zu Ende gedacht: Anprallerkennung auch für die Hochvolt-Batterie	271
A. Forster, A. Hebling, U. Geißler, J. Vetter, Continental, Passive Safety and Sensorics Business Unit, Regensburg/Alzenau	

► Prozesse für integrale Fahrzeugsicherheit

Ersatzmodellbasierte Effektivitätsbewertung integraler Sicherheitssysteme	283
J. Hay, L. Schories, ZF Friedrichshafen AG, Safe Mobility Simulation, Friedrichshafen; E. Bayerschen, ZF Automotive Germany GmbH, Passive Safety Systems, Division R, Alfdorf; P. Wimmer, O. Zehbe, S. Kirschbichler, Virtual Vehicle, Graz; J. Fehr, Institut für Technische und Numerische Mechanik, Universität Stuttgart	
Evaluation of motorized seatbelts in the Euro NCAP AEB-CCFtap scenario: Application of a feedback control loop model in Simulink coupled to a finite element model in LS-Dyna	295
S. Schilling, A. Soni, H. Hinrichs, C. Verheyen, A. Lucht, B. Eickhoff, Autoliv B. V. & Co. KG, Elmshorn; Ekant Mishra, Autoliv Sweden	
Schnelle Abschätzung des Crashverhaltens von Insassen unter Berücksichtigung der Vielfalt des Menschen: Robustheit, Datenintensität und Vorhersagekraft von Metamodellen	313
F. Plaschkies, O. Vaculin, A. A. Pelisson, Technische Hochschule Ingolstadt; A. Schumacher, Bergische Universität Wuppertal	

► **Neue Validierungs- und Bewertungsmethoden**

Highly immersive driving simulator for scenario based testing of automated driving functions	327

G. Prokop, T. Tüschen, Technische Universität Dresden;
N. Eisenköck, AMST-Systemtechnik GmbH, Ranshofen, Österreich;
J. Bönninger, FSD Fahrzeugsystemdaten GmbH, Dresden

Konzept eines gebremsten Crashtestschlittens mit Bild der PreCrash-Phase zur Analyse des Insassenschutzes bei alternativen Sitzpositionen	341

M. Meincke, G. Müller, S. Müller, Technical University Berlin

Validation Procedure for a Vehicle Environment Simulation Model to be used for HBM-based Virtual Testing	355

A. Eggers, M. Schießler, J. Ott, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Referat Passive Fahrzeugsicherheit, Biomechanik, Bergisch Gladbach;
C. Mayer, Mercedes-Benz AG, Integral Safety & Biomechanics, Sindelfingen;
S. Peldschus, Ludwig-Maximilians-Universität München, Biomechanik und Unfallforschung, Institut für Rechtsmedizin, München

► **Prädiktive Sicherheit**

Predictive Safety: Activation of a Pre-Crash System with Fallback Option	369

B. Grotz, P. Straßburger, S. Heiß, L. Amann, M. Wahl, ZF Group, Friedrichshafen & Alfdorf

Analyse des Vermeidungspotentials von schweren Lkw-Unfällen mittels Reibwertwarnung	383

G. Müller, Fachgruppe Kraftfahrzeuge, Technische Universität Berlin;
M. Thüring, S. Becker, Institut für Psychologie und Arbeitswissenschaft, Fachgruppe Kognitionspsychologie & Kognitive Ergonomie, Technische Universität Berlin;
H. Johannsen, M. Jänsch, Verkehrsunfallforschung, Medizinische Hochschule Hannover

Warnstrategien für automatisiertes Fahren aus einer nutzerzentrierten Perspektive	395

L. Diwischek, Joyson Safety Systems Aschaffenburg GmbH, Berlin

Approximation of the overlap for integral safety systems	407

A.-L. Schlamp, K. Schneider, R. Lugner, G. Sequeira, T. Brandmeier, Technische Hochschule Ingolstadt

► **Methoden für automatisiertes Fahren**

**„Die Dresdner Methode“ – Ein Baukasten zur ganzheitlichen Bewertung aktiver
Sicherheits- und automatisierter Fahrfunktionen 419**

M. Mai, M. Bäuml, M. Lehmann, C. Siebke, K. Blenz, G. Prokop, Technische Universität
Dresden;

J. Bönninger, K. Höpping, FSD Fahrzeugsystemdaten GmbH, Dresden

**Simulative Bewertung der Fahrzeugsicherheit mittels des Stochastic Cognitive Driver Model
für das automatisierte Fahren 435**

A. Fries, F. Fahrenkrog, BMW Group, München



**BEST
MATCH**
for
**BEST
TALENTS**

INGENIEUR.de
BEST  MATCH

powered by 

So findet Sie Ihr Traumjob!

Ingenieure aller Fachrichtungen, Absolventen und wechselwillige Professionals aufgepasst:

Sagen Sie uns, was Sie können, wollen und lieben – dann bieten Ihnen die besten Unternehmen den passenden Job für Ihr Talent. Schnell, unkompliziert, ohne Aufwand.

DAS SIND IHRE VORTEILE:

Einfache Profilerstellung | Persönliche Beratung | Passgenaue Job-Angebote |
Keine aufwändige Job-Suche | Unternehmen bewerben sich bei Ihnen | Kostenfreie Nutzung |

Transparenz: alle wichtigen Informationen zum Traumjob |

Sicher: Ihr Arbeitgeber hat keine Einsicht in Ihr Profil

JETZT ALS TALENT REGISTRIEREN:

BESTMATCH.INGENIEUR.DE

Vorwort

Sehr geehrte Tagungsbesucher*innen,

zum 13. Mal findet die VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit in Berlin statt, die sich als feste Institution im Bereich der Sicherheit etabliert hat. Traditionell sind die Vorträge inhaltlich breit gefächert und bilden die Komplexität des Themas von der passiven über die integrale Sicherheit bis hin zur Auswirkung des automatisierten und vernetzten Fahrens ab.

Im vergangenen Jahrzehnt wurden große Fortschritte in der Fahrzeugsicherheit erzielt, und die Zahl der Verkehrstoten konnte so auf ein dauerhaft niedriges Niveau gesenkt werden. Vor allem die Insassen aktueller Fahrzeuge fahren sicherer denn je zuvor. Zu Beginn der neuen Dekade steht die Fahrzeugsicherheit aber vor großen Veränderungen: Der Wandel in der Automobilindustrie führt zu neuen Rahmenbedingungen. Gleichzeitig beginnt mit dem Verkehrssicherheitsprogramm 2030 des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur sowie mit der von der EU formulierten „Vision Zero“ bis 2050 auch politisch ein neuer Abschnitt.

Als Fokusthema für die diesjährige Tagung haben wir daher das Thema „Auf dem Weg zur Fahrzeugsicherheit 2030“ gewählt. In den Diskussionsrunden und Active Sessions soll der Blick nach vorne gerichtet werden, um die Trends für kommende Fahrzeuggenerationen im Detail zu beleuchten. Wie können wir in Zukunft den Schutz von sogenannten „verletzlichen Verkehrsteilnehmern“ weiter verbessern? Welche Rolle spielen neue Mobilitäts- und Fahrzeugkonzepte für die Weiterentwicklung der integralen Sicherheit? Welche Trends ergeben sich durch neue Rahmenbedingungen und werden Methoden und Prozesse diesen gerecht? Welche Herausforderungen ergeben sich aus der zunehmenden Verbreitung von alternativen Antrieben sowie durch Automatisierung und Vernetzung?

Die folgenden Beiträge ermöglichen Ihnen, die verschiedenen Aspekte im Umfeld der integralen und passiven Sicherheit intensiver zu beleuchten. Sehen Sie diese digitale Schriftensammlung als eine wichtige Unterstützung für Ihre fachliche Arbeit und als Grundlage für weitere Diskussionen mit anderen Experten.

Wir freuen uns, dass Sie mit Ihrer Tagungsteilnahme in einen wichtigen fachlichen Austausch gehen, denn zuletzt geht es uns allen um die Realisierung von „Vision Zero“.

Wir wünschen eine anregende Tagung.

Prof. Dr.-Ing. Rodolfo Schöneburg, VDI-Fachbeirat Kraftfahrzeugtechnik

Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller, Technische Universität Berlin

Einsatz innovativer Fond-Rückhaltesysteme in Mercedes-Benz Fahrzeugen am Beispiel Beltbag und Fondairbag

Eric Gärtner, Christian Singer, Mercedes-Benz AG, Sindelfingen

Zusammenfassung

Mit den innovativen Rückhaltesystemen Beltbag und Fondairbag kann den äußeren Fondinsassen der Mercedes-Benz S-Klasse ein erweitertes Schutzpotential im schweren Frontalcrash zur Verfügung gestellt werden. Der als Beltbag bekannte Fond-Sicherheitsgurt mit sich entfaltendem Airbaggewebe kann die Brustbelastungen des Insassen durch eine Gurtverbreiterung in bestimmten Konstellationen deutlich reduzieren. Entsprechende Ergebnisse liefern sowohl Schlitten- und Crashversuche, als auch Simulationsnachweise mit verschiedenen Dummys.

Der Fondairbag, basierend auf einer Röhrenstruktur, adressiert hingegen die Kopf- und Halsbereiche des Insassen. Der Fondairbag verwendet ein neuartiges Befüllkonzept auf Basis eines patentierten Ventilgewebes zum Aufblasen und Positionieren des Luftsacks. Eingeschlossene Umgebungsluft kann zum Erreichen der gewünschten Rückhaltewirkung genutzt werden. Die neuen Fondairbags bieten in bestimmten Situationen einen zusätzlichen Schutz für angeschnallte Erwachsene. Sie können auch deshalb im Fond eingesetzt werden, weil das Belastungsniveau in Tests mit rückwärts gerichteten Kindersitzen sehr niedrig ausfällt. Die Kombination von Beltbag und Fondairbag ermöglicht es, die Fondsicherheit bei einem schweren Frontalaufprall weiter zu verbessern.

Abstract

With the innovative inflatable seatbelt and rear airbag restraint systems, the outer rear occupants of the Mercedes-Benz S-Class can be provided with extended protection potential in a severe frontal crash. The rear seat belt, known as the Beltbag may significantly reduce the chest strain on the occupant by widening the belt in certain constellations. Corresponding results have been provided by sled and crash tests as well as simulation proofs with various dummies.

The rear airbag addresses the head and neck areas of the occupant. It is based on a conventionally inflated tubular structure and uses captured ambient air, which flowed through a patented valve fabric, to create the desired restraint function. The new rear airbag may offer

additional protection for belted adults in certain situations. It can be used in the rear because testing shows very low values even for child dummies in the rearward-facing child seats due to the specific new airbag concept. In combination of both, Beltbag and rear airbag, allows to further improve rear safety in a severe frontal crash.

1. Einführung

Die Verbindung von vorbildlicher Sicherheit mit bestem Komfort ist bei Mercedes-Benz von je her gelebte Tradition und Markenkernwert. Neben vielen bereits bekannten innovativen Sicherheitssystemen, wird speziell die Sicherheit im Fond durch eine Reihe innovativer und neuartiger Rückhalte-Komponenten konsequent erweitert. Dabei setzt Mercedes-Benz erfolgreich auf den Ausbau der Airbag- und Gurtsysteme im Fond, um die in einem realen Unfallszenario auftretenden Verletzungsschweren bestmöglich abzumildern und damit hohe Sicherheitsstandards zu erreichen.

Die vergangenen Jahrzehnte waren geprägt durch eine kontinuierliche Weiterentwicklung des Sicherheitsniveaus von Kraftfahrzeugen. Oftmals wurde hierbei in der Automobilindustrie der Fokus bei Frontallastfällen auf die passive Sicherheit des Fahrers und Beifahrers und weniger auf die Fondinsassen gelegt. Dies gilt nicht nur für die Fahrzeughersteller, sondern auch für die weltweiten Gesetzgeber und Rating-Institute, deren Weiterentwicklung des Anforderungsprofils sich meist auf die erste Sitzreihe konzentrierte.

Mercedes-Benz hat seinen Anspruch als führender Fahrzeughersteller im Bereich der passiven Insassensicherheit früh durch eine entsprechende Auslegung der Schutzsysteme auch in der zweiten und dritten Sitzreihe bekräftigt. Dabei wird selbstverständlich nicht nur den Rating- und Gesetzesanforderung Rechnung getragen, sondern auch größeren und schwereren Insassen ein möglichst hohes Schutzpotential geboten. Viele Hersteller haben unter anderem getrieben durch die zunehmend auch für die Fondinsassen eingeführten weltweiten Ratinganforderungen nachgezogen und statten heute einen Großteil der Fahrzeuge auch im Fond mit Gurtstraffern und Gurtkraftbegrenzern aus.

Externe sowie interne Studien zeigen eine unterschiedliche Verteilung der Verletzungsschwere im Vergleich der ersten und zweiten Sitzreihe auf. Dies kann teilweise auch aus der Unfallforschung anhand von Realunfällen bestätigt werden. Im Gegensatz zum Fahrer und Beifahrer sind die Fondinsassen häufiger von schweren Verletzungen im Bereich des Thorax, Hals oder Kopf betroffen.

Mit dem erstmaligen Serieneinsatz im Jahr 2013 wurde ein erweitertes Sicherheitssystem für Fondpassagiere auf den äußeren Sitzplätzen in der Mercedes-Benz S-Klasse der Baureihe 222 eingeführt. Der Beltbag stellt dabei auch den in Chauffeursfahrzeugen, wie der Mercedes-

Benz S-Klasse, in der Regel höheren Anteil der Fondbesetzungsrate in den Fokus. Als weitere Ergänzung für die Sicherheit im Fond führte Mercedes-Benz im Jahr 2020 neuartige Frontal-Airbags, die sogenannten Fondairbags in der S-Klasse der Baureihe 223 ein. Das Konzept wurde durch Ingenieure von Mercedes-Benz selbst entwickelt. Die Komponenten wurden gemeinsam mit einem Zulieferer zur Serienreife gebracht und sind zur Markteinführung die weltweit ersten beidseitig verfügbaren Fondairbags für ein Serienfahrzeug.

Beide Systeme adressieren dabei unterschiedliche Körperregionen. Der Beltbag kann helfen, die Kräfte des Sicherheitsgurts auf den Oberkörper über eine größere Fläche zu verteilen, während der Fondairbag eine Unterstützung für den Kopf bietet und somit die Kräfte für den Kopf und den Hals reduzieren kann.

2. Wesentliche Meilensteine in der Entwicklung der Fondsicherheit bei Mercedes-Benz

Die Entwicklung eines hohen Insassenschutzes auch für Fondpassagiere steht bei Mercedes-Benz seit vielen Jahren im Fokus. Wesentliche Meilensteine in diesem Kontext werden nachfolgend aufgeführt:

- 1959 erstmalige Serien-Umsetzung einer Sicherheitskarosserie mit Knautschzonen und gestaltfester Fahrgastzelle gemäß dem Prinzip von Bela-Barényi
- 1980 Der erste Fahrerairbag und Gurtstraffer in der ersten Sitzreihe in der S-Klasse. Mercedes-Benz forscht seit 1968 an diesem zusätzlichen Rückhaltesystem
- 1995 Erweiterung der Gurtsysteme um einen Gurtkraftbegrenzer
- 1998 Mercedes-Benz setzt Fondgurte mit Gurtstraffung und Gurtkraftbegrenzung in der E-Klasse (BR210) ein
- 2003 Ab 2003 werden Kinderdummys im Fond bei Euro-NCAP berücksichtigt, ab 2013 folgt der 5%-HIII-Dummy im Rating
- 2013 Beltbag und aktives Gurtschloss für Fondinsassen auf den äußeren Sitzplätzen in der Mercedes-Benz S-Klasse der Baureihe 222
- 2020 Fondairbags für die äußeren Sitzplätze in der Mercedes-Benz S-Klasse der Baureihe 223

3. Beltbag

Beim Beltbag handelt es sich um einen speziell gestalteten Sicherheitsgurt, der im Falle eines Frontalcrashes durch eine Gurtbandverbreiterung und einer damit einhergehend größeren Kontaktfläche am Brustkorb des Insassen, dessen Belastungswerte und damit das Verletzungsrisiko senken kann. Das System ist daher klassisch der passiven Insassenschutzsysteme zuzuordnen.

3.1. Aufbau und Funktionsprinzip

Als herkömmlichen Drei-Punkt-Sicherheitsgurt unterscheidet sich der Beltbag im Wesentlichen durch eine spezielle zweilagige Gewebekonstruktion, die das klassische Gurtband ersetzt. Dieses Beltbag-Gurtband wird durch ein aufblasbares Luftsackgewebe über einen definierten Längenbereich ergänzt und am Stück über die One-Piece-Woven-Technologie hergestellt. Der auch als Bagbereich bezeichnete Abschnitt ist im nicht ausgelösten Zustand unsichtbar zwischen den beiden Gurtbandlagen eingefaltet. Dadurch ergeben sich in der alltäglichen Handhabung des Gurts im Fahrzeug keine Unterschiede gegenüber einem herkömmlichen Standardgurt. Die Haptik des Beltbag-Gurtbandes wird vielfach durch Probanden und Insassen aufgrund der Zweilagigkeit als angenehm weich und einhergehend mit einem hohen Tragekomfort beschrieben.

Im angeschnallten Zustand befindet sich der aufblasbare Gurtabschnitt im Bereich zwischen Gurtschlosszunge und Insassenschulter. In der Auslegung des Gurtsystems wird hierbei ein besonderes Augenmerk auf die Abdeckung des Brustkorbs und des Schulterbereichs über verschiedene Insassengrößen und die Auswirkungen durch verstellbare Sitzanlagen gelegt. Den vollständig entfalteten Zustand des Beltbag-Gurtbandes zeigt Bild 1 anhand einer schematischen Darstellung (a) und einer Versuchsaufnahme (b).

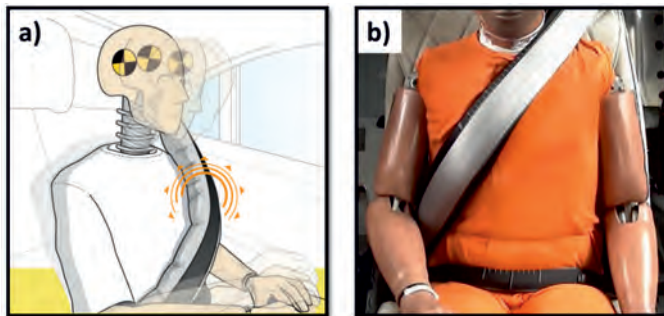


Bild 1: Beltbag im vollständig entfaltenen Zustand - Prinzipdarstellung a) und Versuch b)

Die beiden Gurtbandlagen (Mainbody) sind an den farblich abgesetzten Längskanten durch Reißnähte miteinander verbunden (Bild 2 b)). Während der pyrotechnischen Auslösung des Beltbags wird ein Gas-Innendruck im Gurtsystem aufgebaut, der zum Aufreißen der Reißnähte führt und den eingefalteten Gewebeflügeln die Entfaltung ermöglicht.

Die Befüllung des Beltbag-Gurtbandes erfolgt innerhalb weniger Millisekunden über einen Kaltgasgenerator am Endbeschlag des Gurtsystems. Das Gas strömt über eine Gaslanze durch den Beckengurtanteil und die speziell geformte Gurtschlosszunge in das zu entfaltende Baggewebe im Brust- und Schultergurtbereich des Insassen. Der entsprechende schematische Aufbau im Fahrzeug ist in Bild 2 a) gezeigt. Das Baggewebe und die beiden Gurtbandlagen bilden dadurch eine Schlauchform mit einer bis zu 3-fachen Gurtbandbreite und einem Durchmesser von bis zu 80mm über die Insassenbrust.

Die während des Frontalcrashes auf den Insassen einwirkenden Gurtkräfte, die bereits durch einen Gurtkraftbegrenzer limitiert werden, können durch das verbreiterte Gurtband auf einer größeren Kontaktfläche verteilt werden (Bild 2 c). Die auf den Brustkorb einwirkende Flächenpressung kann dadurch verringert werden. Davon profitieren insbesondere ältere Insassen, deren Knochenstruktur in der Regel eine geringere Elastizität gegenüber jüngeren Menschen aufweist.

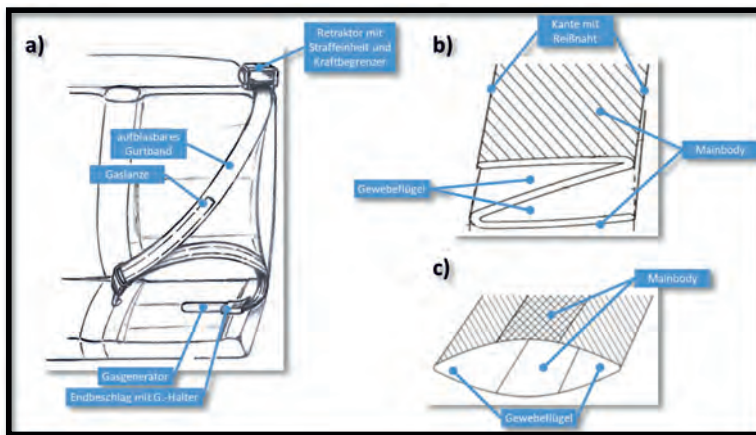


Bild 2: Aufbau und Prinzip des Beltbag-Gurtsystems und des Gurtbandes

Neben der Entfaltung des Beltbag-Gurtbandes beinhaltet das Gurtsystem analog zu herkömmlichen Gurtaggregaten eine pyrotechnische Straffeinheit zur Reduzierung der Gurtlose und der frühzeitigen Ankopplung des Insassen an die Fahrzeugumgebung im Crashfall. Die Auslösung der Straffung und der Aufblasfunktion des Beltbags erfolgt über die fahrzeugseitige Crash-Sensorik und das Airbag-Steuergerät.

Ein wichtiger Aspekt für die Wirksamkeit des Beltbags stellt die gezielte Auslegung des Fahrzeugs in Bezug auf die Fahrzeuanbindungspunkte des Endbeschlags, des Gurtschlusses und des Gurtretraktors in Relation zum Insassen dar. Damit soll einerseits eine vollständige Befüllung und Entfaltung des Beltbags und andererseits die korrekte Positionierung des sich entfaltenden Bagbereichs über dem Brustkorb zur Ausbildung des möglichst hohen Schutzpentials gewährleistet werden. Nur durch eine vollständige Entfaltung über alle Insassengrößen und -typen kann durch die vergrößerte Auflagefläche eine effektive Reduzierung der Brustbelastungen erzielt werden. Bereits in der frühen Entwicklungsphase ist daher eine entsprechende Absicherung der Rückhaltesystem-performance notwendig, um gegebenenfalls Optimierungsschritte einleiten zu können. Dazu zählt beispielsweise auch die Aktivierung des Systems durch eine frühzeitige Straffung des Gurtbandes und dessen Aufblasfunktion während des Frontalaufpralls.

3.2. Bewertung der Brustbelastung in der Simulation – Vergleich Beltbag und Standardgurt

Die mögliche Reduzierung der Brustbelastungen durch den Beltbag lassen sich auf unterschiedliche Weise aufzeigen. Einen ersten Ansatz liefern Simulationsmodelle mit herkömmlichen HIII-Dummys. Bild 3 zeigt beispielhaft für die neue Mercedes-Benz S-Klasse (BR223) jeweils einen Vergleich des Standardgurts und des Beltbags für 5%-HIII-Dummy und 50%-HIII-Dummy. Für beide Gurtsysteme ist anhand der farblich gekennzeichneten Belastungsverteilung die resultierende Kontaktfläche zwischen Gurtband und Brustkorb und damit der Gurtbandverlauf erkennbar.

Hierbei wird die Wirkung der Gurtbandverbreiterung des Beltbags ersichtlich, durch die sich die Auflagefläche am Brustkorb ungefähr verdoppelt. Für die Simulation des 5%-HIII-Dummy (Bild 3 a) zeigt sich bei einer Crashgeschwindigkeit von 50km/h und 100% Barrierenüberdeckung ein signifikanter Unterschied in der Brust- und Schlüsselbeinbelastung. Während der Beltbag durch die größere Kontaktfläche die Belastungen auf den gesamten Brustkorb und Halsbereich geringhalten kann, steigen beim Standardgurt insbesondere im Bereich des Schlüsselbeins die Insassenbelastungen an und verursachen eine höhere Flächenpressung. Durch den Beltbag konnte speziell in diesem Bereich eine bis zu ca. 60% geringere Flächenpressung erzielt werden. Auch über den weiteren Gurtbandverlauf in Richtung Gurtschloss ist eine geringere Belastung anhand der Einfärbung erkennbar. Die dabei in Gurtband-Längsrichtung wirkenden Schultergurtkräfte sind für die beiden Gurtsysteme vergleichbar.

Ein ähnlicher Sachverhalt ergibt sich beispielsweise für den 50%-HIII-Dummy mit den identischen Gurtsystemen. Die in Bild 3 b) dargestellte Grafik beruht auf einer Simulation mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 64km/h im Offset-Crash. Die farbliche Darstellung der Flächenpressung auf dem Brustkorb zeigt die Verdoppelung der Kontaktfläche durch den sich aufblausenden Beltbag und die damit einhergehende Reduzierung der Brustbelastung. Für den 50%-HIII-Dummy konnte eine Reduktion der Flächenpressung um bis zu ca. 50% in der Simulation nachgewiesen werden.

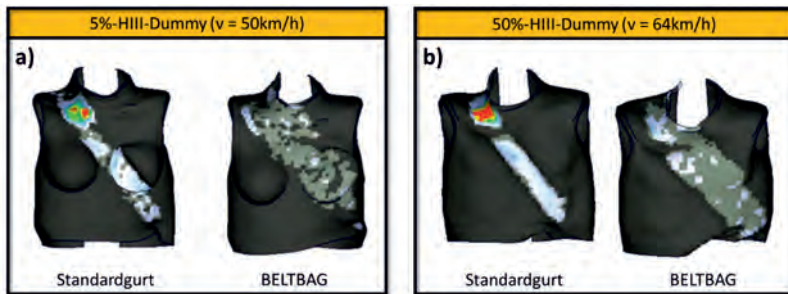


Bild 3: Beispielhafter Vergleich der Flächenpressung am Brustkorb bei Standardgurt und Beltbag auf Simulationsbasis

3.3. Schlitten- und Crasherprobung - Vergleich Beltbag und Standardgurt

In diversen Schlitten- und Crashversuchen konnte der positive Effekt des Beltbags auf die Reduzierung der Brustbelastung und des Verletzungsrisikos anhand der Brusteingdrückung aufgezeigt werden. In unterschiedlichen Lastfällen und Versuchskonstellationen für die Mercedes-Benz S-Klasse (BR223) kann im Vergleich zu einem herkömmlichen Gurtsystem das Verletzungsrisiko für den Fondinsassen weiter gesenkt werden. Bereits das klassische Gurtsystem zeichnet sich durch eine geringe Brusteingdrückung und ein geringes Verletzungsrisiko aus. Durch die Aufblasfunktion des Beltbags, die Gurtbandverbreiterung und die damit einhergehende geringere Flächenpressung am Brustkorb kann in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen die Brusteingdrückung weiter gesenkt werden. Dies gilt beispielsweise in für den Euro-NCAP-Lastfall mit einer Crashgeschwindigkeit von 50km/h und 100%-Überdeckung, als auch für höherenergetische Versuchskonfigurationen wie beispielsweise dem China- oder Japan-NCAP mit 64km/h Aufprallgeschwindigkeit im Offset-Lastfall.

Für größere und schwerere Fondinsassen ergeben sich die Vorteile in ähnlicher Weise. Anhand einer Vielzahl an Schlittenversuchen für den Frontalaufprall mit 50km/h oder 64km/h konnte auch hier eine weitere Reduzierung der Brusteingdrückung gegenüber dem Standardgurt für den 50%-HIII-Dummy nachgewiesen werden.

Entsprechende Ergebnisse ergaben sich auch für die Performance-Bewertung des Beltbags in realen Fahrzeug-Crashes (Bild 4). Unter vergleichbaren Versuchsbedingungen zeigt sich in Abhängigkeit der Crashgeschwindigkeit und Aufprallart wie beispielsweise den Euro-, China- oder Japan-NCAP-Lastfällen für den Beltbag gegenüber dem herkömmlichen Gurtsystem eine Reduzierung der Brusteingdrückung für den 5%-HIII-Dummy.

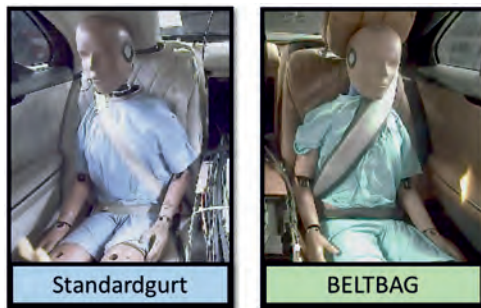


Bild 4: Vergleich für Standardgurt und Beltbag im Crashversuch der Mercedes-Benz S-Klasse (BR223)

Mit der Mercedes-Benz S-Klasse (BR223) und dem Einsatz des Beltbags werden damit erneut die hohen Anforderungen an das reale Unfallgeschehen im Straßenverkehr in den Fokus gestellt. Neben den gegenwärtigen Kriterien und Anforderungen aus den weltweiten Ratings konnte darüber hinaus das Schutzpotential des Beltbags unter vielfältigen Randbedingungen auch für größere und schwerere Fondinsassen dargestellt werden. Das Verletzungsrisiko kann in bestimmten Konstellationen durch den Beltbag gegenüber dem herkömmlichen Gurtsystem weiter reduziert werden. In Bezug zu den Ratingbewertungen kann eine Reduzierung der Brusteindrückung in dieser Größenordnung einen erheblichen Beitrag zur Gesamtbewertung im Crash und dem erweiterten Insassenschutz im Fond beitragen. Das Potential des Beltbags kann zudem mit den in den kommenden Jahren zunehmenden Rating-Verschärfungen der Brustkriterien von größerer Bedeutung werden und den Fondinsassen durch eine reduzierte Brustbelastung ein weiter erhöhtes Schutzpotential bieten. Dies gilt entsprechend auch für größere und schwerere Insassen, denen die Mercedes-Benz S-Klasse mit diesem Gurtsystem abseits der gängigen Ratingbewertungen bereits heute einen verbesserten Insassenschutz bieten kann.

4. Fondairbag

Ende der 1990er Jahre begann die Etablierung von Frontal-Airbags in der ersten Sitzreihe durchgehend in alle Fahrzeugklassen. Jedoch wurden, vor allem auf dem US-Markt viele Menschen durch das Entfalten von Airbags verletzt. Hauptsächlich Personen, die im Auslösbereich des Airbags saßen. Daher hat die US-Regierung die Spezifikation FMVSS208 neu definiert und den „Out of Position“-Test hinzugefügt, der erfüllt werden muss.

Um Verletzungsrisiken zu senken und das Gesetz zu erfüllen, wurden viele Techniken entwickelt, die zum Ziel hatten, dass Airbags weniger aggressiv entfalten. Dennoch haben herkömmliche Airbags immer noch so viel Energie, dass es nicht erlaubt ist, z. B. rückwärtsgerichtete Kindersitze auf einem Sitzplatz mit einem scharfen Beifahrerairbag in die erste Sitzreihe zu platzieren. Unter Anderem ist dies einer der Gründe, warum es für die zweite Sitzreihe bisher keine Frontal-Airbags gab.

Mit dem innovativen Konzept des Röhrenstrukturairbags (Bild 5) begegnet Mercedes-Benz den komplexen Randbedingungen für die Airbag-Entfaltung im Fond auf eine neuartige und wirksame Weise. Zum Beispiel gelingt mit den neuen Airbags der Spagat zwischen der Reduzierung von unfallbedingten Belastungen für Erwachsene und einer risikoarmen Entfaltung für Kinder in rückwärtsgerichteten Kindersitzen.



Bild 5: Prinzipdarstellung des Fondairbags in der Fahrzeugumgebung

4.1. Konzept

Die Auslegung eines Airbags für den Frontaufprall im Fahrzeugfond erfordert ein anderes Konzept als ein konventioneller Fahrer- oder Beifahrer-Airbag. Denn die Platzverhältnisse sind anders, die Bandbreite des Insassenverhaltens ist groß und der Airbag muss in der verstellbaren Rückenlehne der Frontsitze untergebracht werden.

Hinzu kommt: Kinder und Erwachsene sitzen sehr unterschiedlich im Fahrzeugfond. Daher wurde besonderes Augenmerk auf die möglichst schonende Entfaltung des Luftkissens gelegt, falls sich Personen oder Gegenstände im Entfaltungsbereich befinden sollten.

Das Grundprinzip des Fondairbags entstand als Ableitung eines Fachwerks als hausinterne Idee und Entwicklung bei Mercedes-Benz (Bild 6). Am Anfang stand eine Idee. Eine tastende Struktur entfaltet sich analog eines Fachwerks, um die Konturen eines Airbags auszubilden. Dabei bleibt die Struktur bis zur kompletten Befüllung instabil. Die Zwischenbereiche des Fachwerks sind mit einem Ventiltgewebe gefüllt. Die umgebende Luft wird in den Airbag eingesaugt und nicht verdrängt.

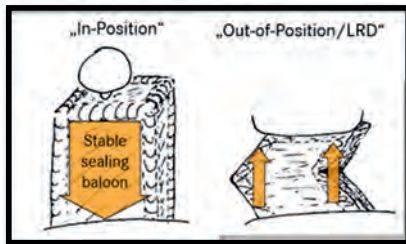


Bild 6: Grundprinzip des Fondairbags

Beim Fondairbag konnte dieses neuartige Befüllkonzept zum Aufblasen und Positionieren des Luftsacks umgesetzt werden. Das Grundprinzip des Airbags sieht eine indirekte Befüllung vor, hierfür besitzt er eine neuartige Röhrenstruktur. Zylindrische Röhren werden bei einem Frontal-Crash aktiv mit Druckgas gefüllt und spannen ein flügelartiges Gerüst auf.

Die besondere Konstruktion dieses neuen Luftkissens trägt maßgeblich zur Erfüllung der internen Anforderungen von Mercedes-Benz bei, die teilweise von den Prüfungen für Beifahrerairbags abgeleitet wurden. Dabei lag der Fokus des Fondairbags beim Schutz des Kopfes und der Reduzierung der Belastungen auf den Hals und Nacken. Mit dem Fondairbag kann gegenüber dem Seriensystem ein nochmals erweitertes Gesamtschutzpotenzial für den Fondinsassen beim schweren Frontalaufprall erzielt werden.

4.2. Aufbau und Funktionsweise

Die Entfaltung des Fondairbags geschieht mit Hilfe eines gegenüber herkömmlichen Frontal-Airbags deutlich leistungsreduzierten Kaltgasgenerator. Das vergleichsweise geringe Volumen der Röhren erlaubt dabei eine schnelle Entfaltung eines großen Airbag-Volumens (Bild 7). Verglichen mit einem konventionellen Frontal-Airbag enthalten die Röhren weniger Energie, was das Verletzungsrisiko deutlich reduzieren kann.

Der eigentliche Clou des Airbags ist der Raum zwischen der flügel förmigen Röhrenstruktur. Zwischen den beiden Flügeln entfaltet sich die Luftsackhülle. Die Luftsackhülle besteht aus einem patentierten Ventilgewebe, welches ermöglicht, dass Umgebungsluft passiv im Innern des Airbags eingefangen werden kann.



Bild 7: Röhrenstruktur des Fondairbags in entfaltetem Zustand

Bei der Realisierung des mehrlagigen Ventilgewebes, wie in Bild 8 a) - c) dargestellt, ist es gelungen, Umgebungsluft nahezu verzögerungsfrei einströmen zu lassen. Beim Eintauchen des Fondinsassen in den Airbag verschließt sich das Ventilgewebe und schließt die Umgebungsluft im Innern ein. Durch die weitere Vorwärtsbewegung wird die eingefangene Umgebungsluft komprimiert, es kommt zu einem Druckaufbau. Eine Rückhaltewirkung wird erzeugt.

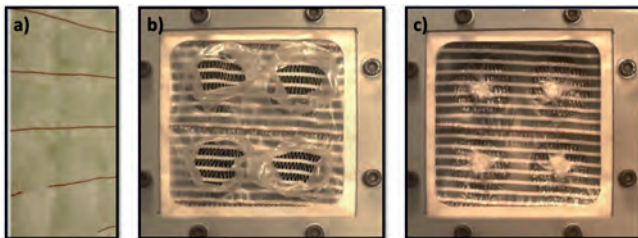


Bild 8: Ventilgewebe (a) des Fondairbags im geöffneten (b) und geschlossenen Zustand (c)

Die Konzeption und technische Umsetzung eines Ventilgewebes sind Ergebnis mehrjähriger Vorentwicklungen durch Mercedes-Benz.

4.3. Eigenschaften

Die Röhrenstruktur selbst hat einen Inhalt von ca. 16 Litern. Das wirksame Volumen des Raumes dazwischen beträgt ca. 70 Liter.

Das Airbagvolumen ist so ausgelegt, dass ein erwachsener, angeschnallter Fondinsasse bei einem schweren Frontalaufprall vor Kollisionen mit den Vordersitzen geschützt werden kann. Der Fondairbag kann zudem die Belastungen für Kopf und Nacken beim schweren Frontalaufprall signifikant reduzieren. Zusätzlich bietet der Airbag einen Vorteil bei LRD- und OOP-Testkonfigurationen. Durch die sanftere Entfaltung verglichen mit einem konventionellen Airbag werden wesentlich geringere Kräfte ausgeübt.

4.4. Kinder und Fondairbag

Besonders Augenmerk wurde bei der Entwicklung des Fondairbags auf die mögliche Interaktion zu Insassen - im Speziellen Kindern - in sogenannten „Out of Position“ Situationen sowie auch in vor- und rückwärtsgerichteten Kindersitzen (Bild 9) gelegt.



Bild 9: Out of Position- und Kindersitz Versuch mit teilentfaltetem Fond Airbag

Durch den Aufbau des Fondairbags ist es möglich, dass bei Kontakt zu Störkonturen, wie beispielsweise einem rückwärtsgerichteten Kindersitz, die sich aufblasenden Röhren keine großen Kontaktkräfte ausüben und stattdessen ausweichen können. Die Last wird der Störkontur nicht aufgezwungen, sondern an ihr vorbeigeleitet und der Fondairbag wird im Folgenden in seiner weiteren Entfaltung ohne größere Kraftauswirkung gehemmt. Daher ist der Fondairbag auch ohne Abschaltung im besonderen Maße für eine mögliche Interaktion mit Kindersitzen oder Kindern im Kindersitz geeignet.

Um den unterschiedlichen Situationen im Fond gerecht zu werden, ist es möglich, bei Bedarf, den Fondairbag auch manuell abzuschalten.

4.5. Flache Konstruktion

Der Fondairbag ist hinter dem Sitzlehnenspannteil an der Rückenlehne der vorderen Sitze verbaut. Dies wurde durch eine flache Geometrie ermöglicht. Der Gasgenerator ist ausgelagert im unteren Sitzbereich montiert. Die Konstruktion ermöglicht trotz verbautelem Airbag noch ausreichend Kniefreiheit. Das Luftsackpaket ist im oberen Bereich der Sitzlehne fixiert und entfaltet sich durch eine integrierte spezielle Airbagklappe im Sitzlehnenpannteil.

4.6. Herausforderung Simulationsmodell

Durch den ungewöhnlichen Aufbau des Airbagmoduls entstanden während der Entwicklung des Simulationsmodells ebenso neuartige Voraussetzungen.

So musste bei der Erstellung des Simulationsmodells zunächst konzeptuell und funktional eine Trennung bei der Betrachtung von Gasfluss und Füllung durchgeführt werden. Die Röhren selbst werden durch den Kaltgasgenerator des Moduls befüllt, während der Innenbereich durch einströmende Umgebungsluft gefüllt wird.

Beim Einströmen wird Umgebungsluft über das Ventilgewebe in ein Umgebungsdruckvolumen eingesaugt, es entsteht eine Selbstbegrenzung durch Druckausgleich, die Oberflächen sind dabei flach. Mit weiterem Gas aus der Rohrstruktur kommt es im Anschluss daran zu einem Boosting, bis zum maximalen Volumen, wobei die Außenflächen dabei konvexe Oberflächen annehmen können.

Im Rahmen der Simulationsmodel-Entwicklung sind dabei neue CAE-Funktionalitäten entwickelt worden, um die spezifischen Eigenschaften des Fondairbags detailgetreu nachbilden zu können. Dabei entstandene Abhängigkeiten und Einflüsse wurden in einzelnen Test separat validiert und zum Schluss zum Gesamtmodell komplettiert.

Die Summe an neuen Funktionalitäten waren letztendlich der Schlüssel zum Erfolg, um die wichtigsten Mechanismen dieses Airbags zu analysieren und zu verstehen.

5. Schutzpotentiale zur Erhöhung der Insassensicherheit im Fond

Mit Einführung der neuen Mercedes-Benz S-Klasse (BR223) sind als Sonderausstattung im Fond die beiden Insassenschutzsysteme Beltbag und Fondairbag wählbar. In deren Kombination bieten die beiden Komponenten ein erweitertes Schutzpotential, das bisher in keinem anderen Serienfahrzeug auf dem Markt verfügbar ist.

5.1. Potentiale im Zusammenspiel von Beltbag und Fondairbag im Vergleich zum Standard-Rückhaltesystem

Bereits die Simulationsnachweise und die Hardware-Erprobungen im Schlitten und Crash haben, wie im Vorfeld beschrieben, das Potential der beiden Systeme aufgezeigt. In weiteren Schlittenversuchen (beispielhaft in Bild 10 a) – c) dargestellt) konnte der verbesserte Insassenschutz für die Fondinsassen durch die Kombination von Beltbag und Fondairbag im Vergleich zu einem herkömmlichen Gurtsystem ohne Fondairbag aufgezeigt werden. Hierbei stand insbesondere der Aspekt des „Real-Life-Safety“, also der Betrachtung des realen Unfallgeschehens im Fokus, mit denen das Schutzpotential des Rückhaltesystems über die gewöhnlichen Anforderungen aus den Ratings hinaus aufgezeigt werden kann.

Als Versuchskonfiguration wurde ein Frontalaufprall mit 64km/h gegen eine deformierbare Barriere gewählt, wobei die Fond-Belegung mit 50%-HIII-Dummys erfolgte. Zudem wurden die Sitze der ersten Sitzreihe in einer Worst-Case-Stellung zum Fondinsassen positioniert. Im direkten Vergleich der Insassen-Belastungswerte ergab sich eine Reduktion der Halszugkräfte F_z und dem Belastungskriterium N_{ij} gegenüber dem Standard-Rückhaltesystem. Die bereits beim Standardsystem unter den biomechanischen Grenzwerten liegenden Halsbelastungen konnten durch das erweiterte System weiter gesenkt werden. Ein ähnliches Bild ergab sich für die Kopfbeschleunigung a_{3ms} , die ebenfalls deutlich verringert werden konnte. Anhand dieser verbesserten Insassenbelastungswerte wird die Schutzwirkung des Fondairbags ersichtlich, welcher den Kopf während dessen Vorverlagerung sanft auffängt und die Belastung des Nackens verringern kann. Bei Betrachtung der Insassenkinematik zeigte sich, dass zusätzlich zur Kopf- auch die Brustvorverlagerung des Insassen durch das erweiterte Rückhaltesystem reduziert werden konnte. Der Beltbag erwies sich in Ergänzung als geeignetes Schutzsystem, um die Brustbelastungen durch die Gurtbandverbreiterung gegenüber dem Standardgurtsystem zu reduzieren.

Gleichwertige Ergebnisse lieferten weitere Schlittenversuche für eine Versuchskonfiguration mit einer simulierten Aufprallgeschwindigkeit von 56km/h und 100% Überdeckung gegen die starre Barriere. Auch dort konnten für den 50%-HIII-Dummy die Kopf- und Nackenbelastungen weiter verringert werden, was zu einem geringeren Verletzungsrisiko führen kann. Die Halszugkräfte F_z und die resultierenden Kopfbelastungen, abgebildet durch den HIC15-Wert und die Kopfbeschleunigungen, konnten über den Fondairbag verringert werden. Mittels des Beltbags konnte gegenüber dem Standardgurt erneut ein zusätzlich verbesserter Insassenschutz durch eine geringere Brusteindrückung erzielt werden.



Bild 10: Schlittenversuch: Beltbag und Fondairbag im Vergleich zum Standard-Rückhaltesystem

6. Fazit

Mit der neuen Mercedes-Benz S-Klasse aus dem Jahr 2020 wird die passive Sicherheit für die Fondinsassen auf ein neues Niveau gehoben. Neben den seit vielen Jahren eingesetzten pyrotechnischen Gurtstraffern und Gurtkraftbegrenzern auf den äußeren Fondsitzen und den bereits in der Vorgänger-Baureihe erstmalig eingeführten Beltbags, die einer kontinuierlichen Weiterentwicklung unterliegen, wurde die Fondsicherheit im Frontalcrash durch den neuartigen Fondairbag mit Röhrenstruktur erweitert.

Anhand der Versuchserprobung und der Simulationsbewertung konnte für den Beltbag und den Fondairbag der Zugewinn im Fond-Insassenschutz aufgezeigt werden. Hierbei verdeutlichen sowohl die Einzelsysteme für sich, als auch deren Kombination ein verbessertes Schutzniveau und unter bestimmten Voraussetzungen eine mögliche Verringerung des Verletzungsrisikos für den Insassen.

Während mit dem Beltbag eine Reduzierung der Brustbelastungen und insbesondere der Brustdehnung gelingen kann, kann mit dem Fondairbag das Verletzungsrisiko für den Kopf und auch für den Hals des angeschnallten, erwachsenen Insassen signifikant verringert werden.

Crashtest einer Fahrzeugtür mit holzbasiertem funktionsintegriertem Türaufprallträger unter realitätsnahen Randbedingungen

Crash test of a car door with a veneer-based door impact beam under realistic test conditions

D. Heyner, G. Piazza, Dr. E. Beeh, G. Seidel, C. Rieger,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart;
Dr. T. Große, D. Kohl, Dr. F. Fischer,
Volkswagen Aktiengesellschaft, Wolfsburg

Disclaimer: Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Publikation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

1. Kurzfassung

Die Entwicklung nachhaltiger Alternativen zu konventionellen Werkstofflösungen rückt in den vergangenen Jahren zunehmend in den Fokus der Automobilindustrie. Ein möglicher Lösungsansatz ist der Einsatz nachwachsender Rohstoffe wie Holz. Aufgrund der hervorragenden spezifischen Eigenschaften eignen sich holzbasierte Werkstoffe sehr gut für strukturelle Anwendungen. Allerdings ergeben sich durch den Einsatz von Naturwerkstoffen vielfältige Herausforderungen, dazu zählen beispielsweise schwankende Materialkennwerte und die Abhängigkeit der Materialeigenschaften von Umgebungsbedingungen wie der Feuchte. Dies gilt insbesondere in crashbeanspruchten Bereichen der Fahrzeugstruktur.

Anhand eines holzbasierten funktionsintegrierten Türaufprallträgers wird im Folgenden dargestellt, welche Herausforderungen bei der Implementierung neuer Werkstoffe in sicherheitsrelevanten Fahrzeugstrukturen auftreten und wie eine Funktionsabsicherung durch intelligente Prüfstandskonzepte bereits in einer frühen Entwicklungsphase möglich ist. Hierfür wird der gesamte Prozess ausgehend von der Bauteilentwicklung bis zur Prüfung einer vollständigen Fahrzeugtür mit funktionsintegrierter holzbasierter Türinnenstruktur im Pfahlcrash aufgezeigt. Durch ein innovatives Prüfstandskonzept werden aus der Gesamtfahrzeugsimulation bekannte Rückhalterkräfte und Verschiebungen der umgebenden Struktur im Komponenten-crashtest abgebildet und messtechnisch begleitet. So können präzise Aussagen zum Bauteilverhalten und der Energieabsorption im Crashlastfall getroffen werden, ohne das gesamte

Fahrzeug betrachten zu müssen. Das entwickelte Prüfstandskonzept bildet dabei die Deformationen an den Scharnieranbindungen, das Ableiten der Tür an der B-Säule sowie die Anbindung am Türschloss vergleichbar zum Gesamtfahrzeugcrash ab.

Zur Validierung werden vergleichende Prüfungen angelehnt an den Euro NCAP Pfahlaufpralltest zwischen der Serientür und einer Tür mit funktionsintegrierter holzbasierter Türinnenstruktur durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Intrusion des Pfahls in die Tür mit holzbasiertem Türaufprallträger lediglich 2,7 % oberhalb der Referenztür liegt. Die Ergebnisse veranschaulichen das hohe Potential des holzbasierten funktionsintegrierten Türaufprallträgers, der zu ca. 90 Masse-% aus Furnierschichtholz und ca. 10 Masse-% aus Stahl besteht.

2. Abstract

In the past few years the development of sustainable materials aiming the reduction of CO₂ emissions in the production phase is gaining more importance in the automotive sector. One approach is the usage of renewable raw materials such as wood. Due to the excellent specific material properties, wood has a high potential for structural components. However, there are multiple challenges like scattering material properties and the dependency of the mechanical performance from environmental conditions such as humidity. This applies in particular for safety relevant components.

Based on a wood-metal hybrid door impact beam the application of wood in safety relevant components is demonstrated. Therefore, the development and testing process of the impact beam is discussed and analyzed. Finally prototypes of the complete door are manufactured and tested in a crash test.

By developing an innovative test setup, it is possible to transfer the boundary conditions obtained from the simulation of the complete vehicle to the impact test setup of the door. Therefore, precise predictions of the component behavior and energy absorption in a crash scenario are possible without testing a complete vehicle.

The tests are performed according to the Euro NCAP pole crash. The original door and the new wood hybrid door are tested using an identical test setup to ensure that the results could be compared to each other. It is possible to represent many aspects that are relevant for the component behavior in the full vehicle crash, like the deformation of the hinges at the A-pillar or the rotation of the door lock at the B-pillar. It is shown that the intrusion of the pole is only 2,7% higher for the wood hybrid door compared to the original door using press hardened steel for the door impact beam. The test results underline the potential of the new design using 90 mass percent laminated veneer lumber and only 10 mass percent steel for the application.

3. Einleitung

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und den daraus resultierenden ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Folgen wird der Bedarf CO₂-Emissionen zu reduzieren besonders in den letzten Jahren immer deutlicher. In der Fahrzeugindustrie führt die zunehmende Elektrifizierung des Antriebs dazu, dass die Emissionen in der Produktion gegenüber den Emissionen im Betrieb in den Vordergrund rücken. Aufgrund der geringen CO₂-Emission im Herstellungsprozess gewinnen daher nachwachsende Rohstoffe gegenüber konventionellen Materialien an Attraktivität. In diesem Zusammenhang ist die Werkstoffgruppe der Hölzer für strukturelle Anwendungen besonders gut geeignet. Holz nimmt während des Wachstums CO₂ auf, ist regional verfügbar und besitzt spezifische Materialeigenschaften, die mit typischen technischen Werkstoffen, wie Aluminium oder Magnesium, vergleichbar sind [1]. Allerdings resultieren aus dem Einsatz nachwachsender Rohstoffe auch Herausforderungen, wie die schwankenden Materialkennwerte, die Abhängigkeit der Materialeigenschaften von den Umgebungsbedingungen sowie die zum Teil noch fehlenden Erfahrungen in der Simulation. Als besonders herausfordernd ist daher der Einsatz nachwachsender Rohstoffe in crashrelevanten Fahrzeugstrukturen zu bewerten. Hierfür müssen geeignete Werkstoff-, Fertigungs-, Simulations- und Prüfkonzepte entwickelt werden, um einen Einsatz zu ermöglichen.

Nachfolgend soll am Beispiel einer funktionsintegrierten holzbasierten Türinnenstruktur, die unter anderem die Funktion des Türaufprallträgers übernimmt, aufgezeigt werden, welche Potentiale der Einsatz von Holz in Fahrzeugstrukturen bietet. Hierbei wird insbesondere der Prozess der Entwicklung eines werkstoffgerechten Bauteilkonzeptes und die daran geknüpfte Versuchstechnik zur Validierung betrachtet.

4. Stand der Technik Türaufprallträger

Der Türaufprallträger verläuft innerhalb der Tür diagonal und soll im Fall eines Seitenaufpralls den Insassen vor zu großer Intrusion in den Innenraum schützen. Als besonders kritisch sind Unfälle zu bewerten, bei denen das Fahrzeug gegen starre Gegenstände, wie beispielsweise einen Baum oder einen Laternenmast, prallt. Um diesen Lastfall abzubilden sehen die Europäische Verbraucherschutznorm (Euro NCAP [2]) sowie die amerikanische Prüfnorm (FMVSS [3], [4]) Versuche mit einer Pfahlgeometrie (engl. Pole) vor (Pfahlcash gemäß Euro NCAP siehe Bild 1). Dabei werden sowohl statische Eindruckversuche, als auch Crashversuche betrachtet.

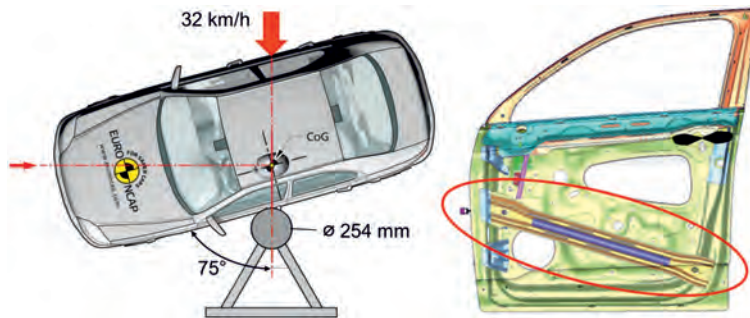


Bild 1: Pfahlcrash gemäß Euro NCAP (links) angelehnt an [2],
Tür mit Türaufprallträger (rechts) [5]

Da der Türaufprallträger sehr hohen mechanischen Lasten ausgesetzt ist, werden für dieses Bauteil im Stand der Technik pressgehartete Stähle eingesetzt. Durch das spezielle Verfahren der Presshärtung können sehr hohe Festigkeitswerte bei gleichzeitig ausreichend hoher Bruchdehnung erzielt werden. Werkstoffe aus dem Stand der Technik weisen beispielsweise eine Festigkeit von 1500 MPa und eine Bruchdehnung A_{50} von 6% auf [6]. Die Bruchdehnung ist für dieses Bauteil besonders relevant, um ein ausreichendes Deformationsvermögen zu erzielen. Ein schlagartiges Versagen des Trägers muss in Hinblick auf die Insassensicherheit in jedem Fall vermieden werden. In Bild 1 (rechts) ist beispielhaft ein Träger aus dem Stand der Technik mit entsprechender Einbaulage dargestellt. Es ist zu sehen, dass der Träger zwischen den Scharnierverstärkungen auf Seite der A-Säule beginnt und diagonal nach unten zur rechten Türkante verläuft, wo er sich im unteren Bereich an der B-Säule abstützt.

5. Stand der Technik Holz in Fahrzeugstrukturen

Der Werkstoff Holz findet in modernen Fahrzeugstrukturen bisher keinen Einsatz. Zwar gibt es mehrere Projekte, die sich mit dem Thema befassen, allerdings wurden die Erkenntnisse bisher noch nicht in die Serie überführt. Insbesondere ein möglicher Einsatz im Bereich des Türaufprallträgers wurde bereits in mehreren Projekten betrachtet. Hierbei sind vor allem die Projekte *HAMMER* [7], *Wood C.A.R.* [8] und *For^(s)tschritt* [5] zu nennen. Die hier präsentierten Ergebnisse sind im Rahmen des Projektes *For^(s)tschritt* entstanden.

Durch die im Vergleich zu anderen Konstruktionswerkstoffen sehr geringe Dichte können Bauteile aus Holz bei gleichem Gewicht dicker ausgeführt und so die Biegesteifigkeit erhöht werden [1]. Allerdings muss im Gegensatz zu quasistatischen Lastfällen, wie sie beispielsweise

im Bausegment vorliegen, bei einem Türaufprallträger der Crashlastfall bei der Dimensionierung mitberücksichtigt werden. Das bedeutet, dass das Bauteil großen Verformungen ausgesetzt ist. Hierbei wird ein Nachteil von Holz deutlich, im Vergleich zu metallischen Werkstoffen besitzt Holz eine sehr geringe Bruchdehnung auf Zug. Für das hier betrachtete Buchenholz liegt diese in Faserlängsrichtung bei ca. 0,8 % [9]. Es müssen daher geeignete Werkstoffe zur Hybridisierung ausgewählt werden, um trotz der geringen Bruchdehnung eine ausreichend hohe Deformation des Trägers zu ermöglichen, ohne dass dieser schlagartig versagt. Im Projekt *HAMMER* wurde diesem Problem durch den Einsatz von Aramid-Fasern begegnet [7]. In dem hier betrachteten Projekt *For^stschritt* wurde vor dem Hintergrund eines möglichst einfachen Recyclings und einer Einsparung von CO₂-Emissionen der Werkstoff Stahl zur Hybridisierung ausgewählt.

Für die funktionsintegrierte Türinnenstruktur kommen Furnierwerkstoffe zum Einsatz. Furniere sind dünne Holzlagen, die für großindustrielle Anwendungen mit Hilfe eines Schälprozesses hergestellt werden. Dabei wird der Baumstamm in Rotation versetzt und das Furnier längs des Stammes abgeschält. Die so hergestellten dünnen Holzlagen können anschließend zu Platten und Formholzteilen verarbeitet werden. [10] Hierfür werden die einzelnen Lagen beleimt und in Form gepresst. Da Furniere eine nur sehr eingeschränkte Drapierbarkeit besitzen, lassen sich hauptsächlich einfache zwei dimensionale Strukturen herstellen. Komplexere Umformungen sind nur dann möglich, wenn die Furniere aufwändig vorbehandelt werden. Um die geometrischen Freiheitsgrade ohne Vorbehandlung der Furniere zu erhöhen, kann das Material verdichtet werden. Bei Einsatz von Buchenholzfurnierwerkstoffen, können diese auf ca. 50 % der Ausgangsstärke verdichtet werden. Hierdurch ist eine eingeschränkte Darstellung dreidimensionaler Formen möglich. Die Festigkeit und Steifigkeit des Holzes steigen dabei in diesem Bereich proportional zum Verdichtungsfaktor.

6. Entwicklung eines holzgerechten Bauteilkonzeptes

Die größte Herausforderung für den Einsatz von Holz in der hier diskutierten Anwendung stellt die geringe Bruchdehnung dar. Um diese Problemstellung zu lösen, erfolgt eine gezielte Hybridisierung mit einem 1,2 mm starken Stahlband auf der Zugseite der funktionsintegrierten Türinnenstruktur. Dabei wurden in mehreren Simulationsschleifen geeignete Stähle und Materialstärken identifiziert und ein Stahl mit hoher Festigkeit und Duktilität ausgewählt. Eine zentrale Voraussetzung für die Funktionserfüllung des Bauteilkonzeptes ist, dass die Anbindung des Stahlbandes an die Türstruktur und das Stahlband selbst während der Prüfung nicht versagen (nähere Informationen zum Entwicklungsprozess können [11] und [12] entnommen werden).

Zusätzlich muss sich der hier betrachtete Türaufprallträger in die spätere Baugruppe integrieren lassen. Dies führt im Entwicklungsprozess zu großen Herausforderungen, da die überwiegend als Freiformflächen konstruierten Geometrien der Türinnenstruktur eine sehr hohe Komplexität aufweisen.

Daher wird ein völlig neues Bauteilkonzept entwickelt, das ein hohes Maß an Funktionsintegration vorsieht [13]. Die entwickelte funktionsintegrierte Türinnenstruktur ist in Bild 2 dargestellt. Die Baugruppe wird in drei unterschiedliche Komponenten aufgeteilt. Ein komplex geformtes L-förmiges Bauteil, ein darauf aufgesetztes flächiges Bauteil, auf das ein Stahlband aufgeklebt wird, sowie zwei dünne flügelartige Sperrholzplatten, die als Entdrönmatten dienen und die serienmäßig eingesetzten Bitumenmatten ersetzen (siehe Bild 2).

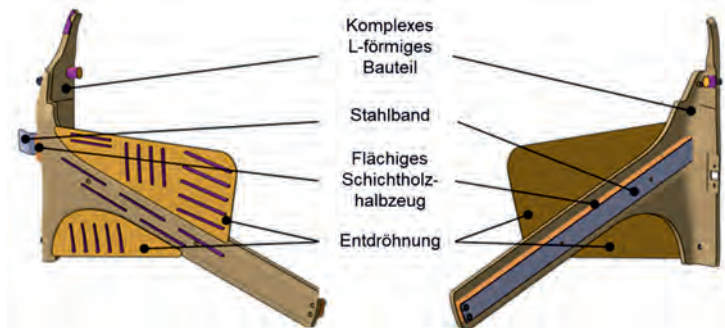


Bild 2: Funktionsintegrierte Türinnenstruktur [14]

Das komplex geformte L-förmige Bauteil integriert die Scharnierverstärkungen, die Abstützung des Türaufprallträgers an der A- bzw. B-Säule sowie einen Teil des Türaufprallträgers selbst. Durch eine gezielte Verdichtung einzelner Bereiche wird zudem eine flächige Anlagefläche für das Halbzeug mit Stahlband und das innenliegende Türblech im Bereich der Scharnierverstärkung geschaffen (siehe Bild 3).

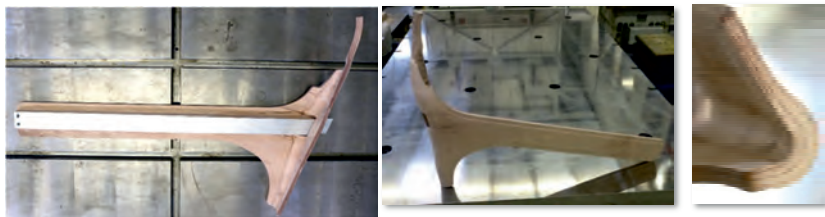


Bild 3: Ansichten des komplexen Bauteils (links/ mitte), Bereich mit Verdichtung (rechts) [14]

Durch diesen Ansatz kann das flächige Schichtholzhälfte separat aus einfachen Furnierschichtholzplatten gefertigt werden. Anschließend wird zunächst das Stahlband auf das Schichtholzhälfte und im Anschluss daran der Verbund auf das komplexe Bauteil geklebt. Schließlich werden noch die seitlichen Flügel angeklebt. In Summe ergibt sich so für die gesamte Baugruppe ein Furnierschichtholzanteil von ca. 90 Masse-% und ein Stahlanteil von ca. 10 Masse-%, wobei insgesamt 3,21 kg Stahl und 0,40 kg Bitumen durch die Baugruppe substituiert werden.

Nach der Fertigung der funktionsintegrierten Türinnenstruktur werden zwei Türen als Prototyp für die weiterführende Prüfung aufgebaut (siehe Bild 4). Hierfür wird die Baugruppe in die Tür eingeklebt und das Stahlband auf der Seite der A-Säule durch Punktschweißung und auf der Seite der B-Säule durch zwei mechanische Fügeelemente fixiert. In der Auslegung wird eine zur Originaltür gewichtsneutrale Holz-Hybrid-Tür konzipiert. Allerdings ist der Prototyp der Holz-Hybrid-Tür aufgrund des manuellen Fertigungsprozesses ca. 14 % schwerer als die Referenztür.

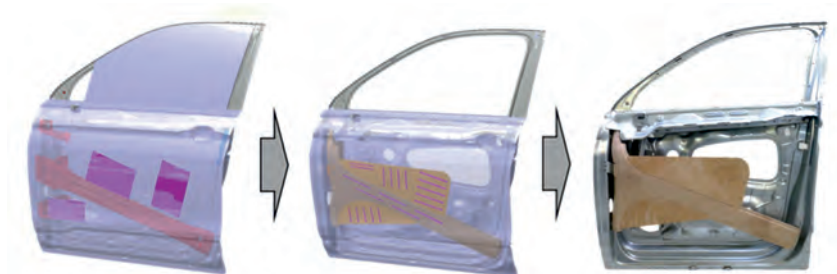


Bild 4: Konventionelle Tür mit Türaufprallträger (links), Holzintensives Konzept (mitte/ rechts) [5], [14]

7. Durchführung der Komponentencrashtests

Eine Herausforderung bei der Entwicklung von einzelnen Komponenten für die Rohkarosserie ist die Validierung im Baugruppenkontext. Zwar lässt sich wie in dem hier betrachteten Bauteil der Türaufprallträger losgelöst von der Tür und der restlichen Karosserie fertigen, eine abschließende Validierung ist allerdings nur im Kontext der gesamten Baugruppe sinnvoll und zielführend. Neben einer objektiven Bewertung der Bauteilperformance zeigt sich, wie die spätere Einbauposition und die Randbedingungen in starker Wechselwirkung zum Bauteil-, Werkstoff- und Fügekonzept stehen.

Bei der Abbildung einer realitätsnahen Prüfumgebung muss sichergestellt werden, dass Komplexitätsgrad und Nutzen in einem ausgewogenen Verhältnis zu einander stehen. Des Weiteren müssen geeignete Prüfrandbedingungen definiert werden (z.B. auf Basis einer Gesamtfahrzeugsimulation). In Hinblick auf eine aussagekräftige Prüfung muss eine detaillierte Erfassung aller für die Prüfung relevanten Größen (Kräfte, Verschiebungen, etc.) erfolgen und die Prüfung in guter Übereinstimmung zur Prüfnorm stehen. Vor diesem Hintergrund wurde am DLR ein Baukastensystem zur Komponentenprüfung entwickelt. [15] Dabei spielen definierte Freiheitsgrade und Rückhaltekkräfte, die die Nachgiebigkeit der Fahrzeugstruktur repräsentieren, eine zentrale Rolle. Als geeigneter Ansatz zur Darstellung von Rückhaltekkräften wurden sogenannten Schneidabsorber identifiziert, wie in Bild 5 dargestellt. Das Funktionsprinzip basiert auf einer speziellen Schneide die durch ein Aluminiumrohr gezogen oder gedrückt wird.

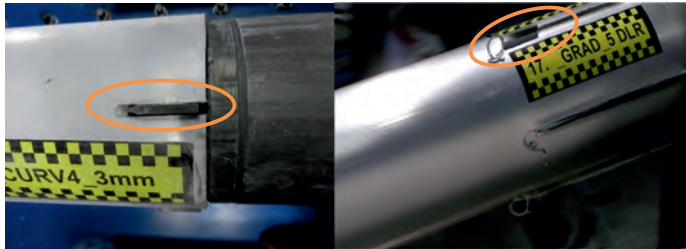


Bild 5: Beispiel Schneidabsorber - Aluminiumrohr mit Schneide (orange markiert)

Der größte Vorteil bei Einsatz von Schneidabsorbern ist der geringe Einfluss der Geschwindigkeit auf die Schneidkräfte und die sehr gute Skalierbarkeit des Kraftniveaus und Bauraums durch Variation von Rohrdurchmesser und Wandstärke. Dies ermöglicht zum einen eine Validierung und Auslegung anhand quasistatischer Versuche und zum anderen ein breites Anwendungsspektrum.

Neben der Darstellung der Rückhaltekkräfte im Versuch müssen die Kraftniveaus und die Verformungswege der Tür definiert werden. Hierfür wird das Verformungsverhalten der Tür aus der Gesamtfahrzeugsimulation benötigt. Die Verformungswege werden so gewählt, dass die finale Verformung der Tür vorweggenommen und an den Scharnieranbindungen zu einer linearen Bewegung bzw. am Türschloss zu einer Rotation abstrahiert wird. Verschiebungen in Fahrzeug z-Richtung – also in vertikale Richtung werden nicht berücksichtigt. Anhand der Gesamtfahrzeugsimulation zeigt sich, dass Verformungen in z-Richtung im Pfahlcrash vernachlässigbar sind.

8. Quasi-statische Vorversuche

Zunächst werden quasi-statische und anschließend dynamische Prüfungen an Türprototypen durchgeführt. Dabei werden sowohl die Serientür, als auch die Holz-Hybrid-Tür geprüft, um die Ergebnisse direkt vergleichen zu können.

Die quasi-statischen Versuche werden auf einem Spannungsfeld durchgeführt. Die Pfahlgeometrie (Durchmesser 254 mm) wird seitlich mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/s in die Struktur gedrückt, wobei der komplexe Prüfaufbau identisch zu den anschließend durchgeführten Crashversuchen ist (siehe Bild 6 links).

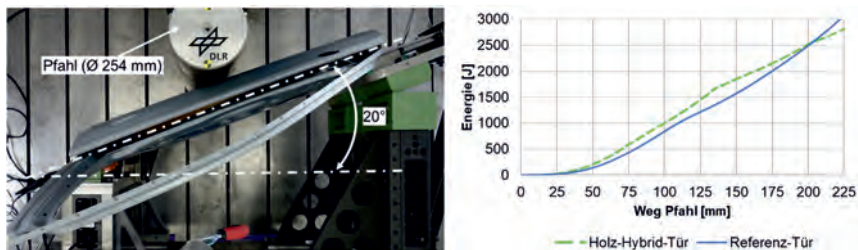


Bild 6: Quasi-statischer Eindrückversuch: Prüfaufbau (links), Ergebnisse (rechts)

Bei den Versuchen zeigt sich, dass die Tür bei einer Deformation von 225 mm eine Energie von ca. 3.000 J absorbiert (siehe Bild 6 rechts). Diese Erkenntnis wird für die Auslegung der Crashtests genutzt.

9. Crashtests

Die Crashtests werden auf einer Schlittencrashanlage durchgeführt. Laut Prüfnorm soll der Schlitten mit einer Geschwindigkeit von 32 km/h auf die Tür treffen. Der Schlitten wird mit Hilfe eines Pneumatikzylinders über eine kurze Anfangsstrecke beschleunigt, ausgekoppelt und trifft dann auf das Bauteil. Angestrebt wird eine Intrusion der Tür von maximal 350 mm. Auf Basis der quasi-statischen Versuche wird die in der Tür absorbierte Energie bei einer Intrusion von 300 mm mit ca. 4.000 J abgeschätzt. Da die minimale Schlittenmasse mit Pfahlaufbau bei 841 kg liegt, ergibt sich bei einer Geschwindigkeit von 32 km/h eine Energie von mehr als 33.000 J. Das ist ein Vielfaches der Energie, die durch die Tür aufgenommen werden kann. Um die Aufprallenergie zu reduzieren, werden zusätzliche Schneidabsorber in den Lastpfad des Schlittens unterhalb der Tür integriert (nachfolgend als Schwellerbereich bezeichnet). Für die Durchführung der Versuche ist dabei ein möglichst guter Kompromiss aus Energieabsorption im Schwellerbereich, Schlittengeschwindigkeit und maximaler Türintrusion entscheidend.

Gemäß Euro NCAP trifft der Pfahl in einem Winkel von 15° auf die Tür. Wie aus Bild 6 hervorgeht, wurde der Prüfaufbau jedoch so konzipiert, dass sich ein Winkel von 20° ergibt. Grund hierfür ist das Verformungsverhalten der Tür in der Gesamtfahrzeugsimulation bis ca. 300 mm Deformation. Die Tür wird durch den Aufprall um etwa 5° rotiert, daher muss der Aufbau entsprechend um diese zusätzlichen 5° gedreht werden, um im Versuch ein vergleichbares Verformungsbild wie im Vollfahrzeugcrash zu erhalten (nähere Informationen zu diesem Vorgehen können [15] entnommen werden).

In Bild 7 ist der gesamte Prüfaufbau auf der Schlittencrashanlage vor und nach dem Crash dargestellt. Nachfolgend wird detailliert auf die drei Bereiche A-Säule, B-Säule und Schwellerbereich eingegangen (siehe Bild 7 links).

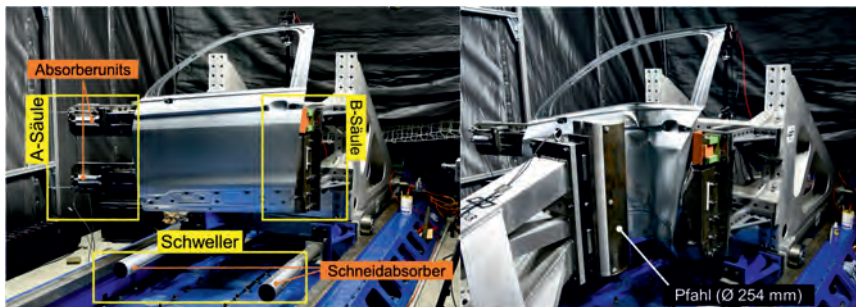


Bild 7: Versuchsaufbau Tür vor (links) und nach Komponentencrashtest (rechts)

A-Säule

Im Bereich der A-Säule müssen die Rückhaltekräfte an den Türscharnieren abgebildet werden. Hierfür wurden sogenannte Absorberunits entwickelt. Diese Absorberunits bestehen aus einem Schneidrohr und einer Linearführung (siehe Bild 8).

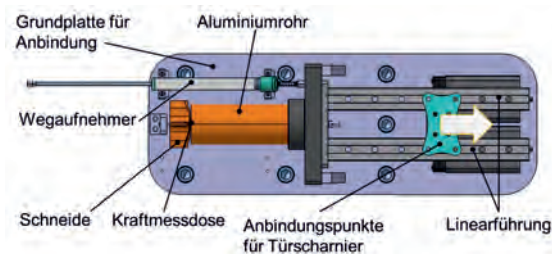


Bild 8: Schematischer Zusammenbau der Absorberunit

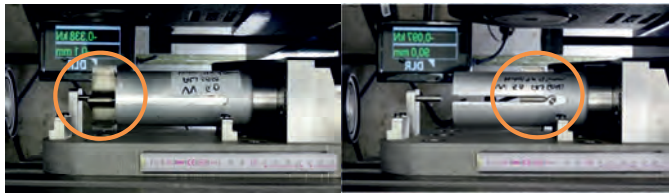


Bild 9: Absorberunit mit Aluminiumrohr vor dem Test (links) und nachdem Test (rechts)
(Schneide jeweils orange markiert)

Trifft der Pfahl auf die Tür, verformt sich die Tür und die Türscharniere werden in Richtung Pfahl zur Türmitte gezogen. Durch die Linearführungen und die Anbindung an die Schneide beginnt der Schneidvorgang (siehe Bild 9). Die Absorberunit besitzt eine eigene Kraftmessdose und eine Wegmessung, dadurch kann die absorbierte Energie der Anbindung genau berechnet werden. Die benötigte Rückhaltekraft kann durch Variation der Wandstärke der Schneidrohre frei gewählt werden. Auf Basis der Gesamtfahrzeugsimulation wird ein Kraftniveau von ca. 11 kN eingestellt. Es werden zwei Absorberunits genutzt, um die beiden Türscharniere unabhängig voneinander darzustellen. Verbunden werden die beiden Anbindungen durch eine generische Struktur die analog zur A-Säule zum Anlegen des Türblechs dient (siehe Bild 10 links).

B-Säule

Im Bereich der B-Säule sind zwei Bereiche für das Bauteilverhalten besonders relevant. Die Anlagefläche der Tür, insbesondere im unteren Türbereich wo der Türaufprallträger endet (siehe Bild 1) und das Türscharnier. Das Türscharnier wird durch einen drehbaren Anschraubpunkt für die Schlossfalle dargestellt (Bild 10 rechts) die B-Säule wird zu einer Schweißkonstruktion vereinfacht. Eine besondere Herausforderung stellt hierbei das vollflächige Anliegen der Tür bei Versuchsbeginn und das gleichzeitige vollständige Einrasten der Schlossfalle dar.

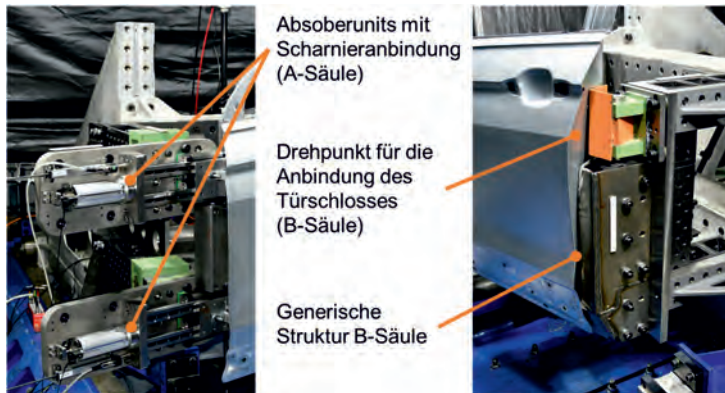


Bild 10: Absorberunits im Bereich der A-Säule (links), Generische B-Säule (rechts)

Schwellerbereich

Die Energieabsorption des Schwellers und des Unterbodens wird durch Schneidabsorber abgebildet (siehe Bild 11). Hierfür werden unterhalb des Prüfaufbaus zwei Schneidrohre montiert. Im Gegensatz zu den Scharnieranbindungen werden hierbei die Schneiden nicht durch das Material gezogen, sondern das Rohr vom Crasheschlitten durch die türseitig montierte Schneide gedrückt.



Bild 11: Schneidabsorber unterhalb der Tür (Schwellerbereich)

Aufgrund der Erfahrungen aus vorangegangenen Untersuchungen kann das Kraftniveau durch ein Überfräsen der Aluminiumrohre entsprechend eingestellt werden. Im Gegensatz zu den Scharnieranbindungen, bei denen sich das Kraftniveau an den Ergebnissen der Simulation orientiert, ist für diese Absorber die Gesamtenergie ausschlaggebend. Zudem stellen die

Schneidabsorber eine Sicherheitsfunktion dar. Sollte eine Tür ohne Energie aufzunehmen versagen (beispielsweise durch Ausreisen der Scharniere), kann die Energie des Schlittens absorbiert werden, ohne dass der Pfahl ungebremst mit der Prüfvorrichtung kollidiert.

Auswertung

Auf Basis von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wird die Geschwindigkeit des Schlittens bestimmt. Zum Zeitpunkt des Schlittenaufpralls beträgt diese 8,31 m/s (ca. 30 km/h). Die Geschwindigkeit wird bewusst niedriger als die in der Prüfnorm vorgeschriebenen 8,89 m/s (32 km/h) gewählt. So wird sichergestellt, dass die Intrusion in die Tür den Wert von 350 mm nicht überschreitet und noch ausreichend Material in den unteren Schneidabsorbern zur Verfügung steht, um den Schlitten im Notfall, wie im vorangegangenen Absatz beschrieben, vollständig auszubremsten.

Auf Basis der Videoaufnahmen und der Kraft-Weg-Verläufe an den Scharnieranbindungen wird deutlich, dass sich das Bauteilverhalten der beiden Türen (Holz-Hybrid-Tür bzw. Referenztür) insbesondere im Bereich der A-Säule voneinander unterscheidet. Durch das L-förmige Holz-Bauteil (siehe Bild 4) werden die obere und untere Scharnieranbindung gekoppelt. Als Resultat der Kopplung wird hauptsächlich die untere Anbindung nach innen gezogen. Für die Referenztür können sich die beiden Scharnieranbindungen unabhängig voneinander bewegen, was zu einer symmetrischen Deformation führt. Für die Referenztür ergibt sich für die obere Scharnieranbindung eine Verschiebung von 44 mm und für die untere Anbindung 40 mm. Für die Holz-Hybrid-Tür hingegen liegen die Verschiebungen bei 10 mm am oberen Scharnier und 45 mm am unteren.

Im Bild 12 sind die Kraft-Zeit-Verläufe der Schneidabsorber im Schwellerbereich für die Holz-Hybrid-Tür und die Serientür dargestellt.

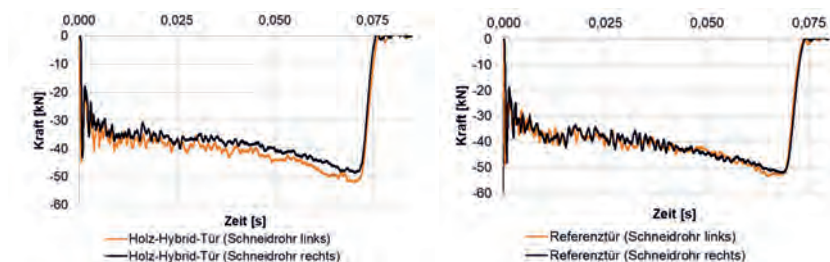


Bild 12: Kraft-Zeit-Verläufe an den unteren Schneidabsorbern
(Holz-Hybrid-Tür links, Referenztür rechts)

Wie aus den Kurven hervorgeht, dauert der gesamte Versuch ca. 75 ms. Zu erkennen ist die gute Reproduzierbarkeit der Kraft-Zeit-Verläufe zwischen den beiden Versuchen. Allerdings liegt das Kraftniveau der Referenztür leicht oberhalb der Holz-Hybrid-Tür. Dies ist auf das unterschiedliche Absorptionsverhalten der beiden Türen zurückzuführen. Die Verzögerung bei der Holz-Hybrid-Tür ist geringer als bei der Referenz, was ein geringfügig niedrigeres Kraftniveau an den unteren Absorbern zur Folge hat. Aus den Versuchsdaten kann mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (Weg-Zeit Signal) ein Kraft-Weg-Signal und eine Gesamtenergiebilanz erstellt werden. Daraus lässt sich die in der Tür absorbierte Energie bestimmen. In Bild 13 sind die Ergebnisse dargestellt.

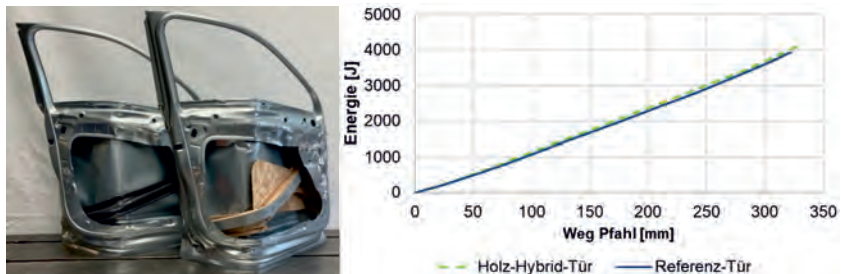


Bild 13: Ergebnisse Prüfung geprüfte Türen (links), Absorbierte Energie im Vergleich (rechts)

In Bild 13 (links) sind die Serien- und Holz-Hybrid-Tür nach der Prüfung dargestellt, wobei jeweils das Türinnenblech zur Analyse des Versagensverhaltens nach der Prüfung entfernt wurde. Zu erkennen ist, dass das Stahlband für die Holz-Hybrid Variante intakt geblieben ist. In Bild 13 (rechts) wird die in der Tür absorbierte Energie über den Schlittenweg abgebildet. Die absolute Intrusion liegt bei 321,3 mm für die Referenztür und 329,9 mm für die Holz-Hybrid-Tür. Das bedeutet, dass der Pfahl bei der Holzhybrid-Tür eine um ca. 2,7 % höhere Intrusion aufweist als bei der Referenz. Die Energieabsorption liegt jedoch leicht oberhalb der Referenztür (siehe Bild 13). Ursächlich hierfür ist der unterschiedliche Geschwindigkeitsverlauf und die daraus entstehende niedrigere Energieabsorption in den unteren Schneidabsorbern, die entsprechend bei gleicher Ausgangsenergie einen höheren Energieeintrag in die Tür zur Folge hat. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass beide Türen eine fast identische mechanische Performance aufweisen.

10. Fazit und Ausblick

Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen, kann ein „proof of concept“ für eine funktionsintegrierte Türinnenstruktur in holzintensiver Bauweise erbracht werden. Die Baugruppe besteht zu ca. 90 Masse-% aus Furnierschichtholz und 10 Masse-% Stahl und weist eine zur Serientür vergleichbare Performance im Pfahlcrash auf. Als problematisch ist die im Vergleich zur Serientür noch 14 % höhere Gesamtmasse der Holz-Hybrid-Tür gegenüber der Serientür zu bewerten. Die höhere Masse ist auf den manuellen prototypischen Fertigungsprozess zurückzuführen. Vor dem Hintergrund einer industriellen Fertigung und gegebenenfalls weiterer Optimierungsschritte ist allerdings ein zur Serientür mindestens neutrales Gewicht realistisch. Des Weiteren wurde ein innovatives Prüfstandskonzept entwickelt, dass eine Bewertung der Bauteile unter ähnlichen Randbedingungen, wie sie im Vollfahrzeugcrash vorliegen, ermöglichen. Die entwickelten Lösungen, weisen sowohl eine hohe Reproduzierbarkeit im Versuch, als auch eine große Flexibilität auf. Durch die enge Verzahnung von Simulation, Konzeption und Versuch konnte das Potentiale von Holz in Fahrzeugstrukturen aufgezeigt und so Perspektiven für nachhaltige und zukunftsfähige Werkstofflösungen geschaffen werden.

11. Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim *Bundesministerium für Wirtschaft- und Energie* für die Förderung des Projektes *For^(s)tschritt* im Rahmen dessen ein Großteil der hier präsentierten Ergebnisse entstanden ist. Weiterer Dank gilt dem Projektträger *TÜV-Rheinland* für die Projektadministration und allen Projektpartnern, die sich mit großem Engagement in das Projekt eingebracht haben.

12. Literaturhinweise

- [1] Ashby, M. und Jones, D. (2006): *Engineering Materials 2 An Introduction to Microstructures, Processing and Design*. Burlington, Butterworth-Heinemann
- [2] *Oblique Pole Side Impact Testing Protocol*, European New Car Assessment Programme Euro NCAP (2015), Version 7.0.2.
- [3] FMVSS 214S (1992): *Test Procedure For FMVSS 214S (Static) Side Impact Protection*
- [4] FMVSS 214 (2012): *Test Procedure for FMVSS No. 214, Dynamic Side Impact Protection - Rigid Pole Side Impact Test Requirements*

- [5] Große, T. et al. (2021): Strukturbaugruppen auf Basis nachhaltiger holz- basierter Materialsysteme zur Reduzierung von Masse und Umwelt-auswirkungen im Straßen- und Schienenfahrzeugbau - Synonym: For^(s)tschritt, Schlussbericht zum Vorhaben For^(s)tschritt, 2021
- [6] phs-ultraform Verzinkte Warmumformstähle für die Herstellung pressgehärteter Bauteile im indirekten Prozess, Datenblatt, voestalpine Stahl GmbH, Österreich 2021
- [7] Kohl, D., Link, P. and Böhm, S. (2016): Wood as a Technical Material for Structural Vehicle Components. - Procedia CIRP: Vol. 40/2016: 557–61.
- [8] Baumann, G., Stadlmann, A. und Kurzböck, C. (2019): Crashesichere Holzverbundwerkstoffe in Leichtbaukarosserien der Zukunft.- ATZ-Automobil- technische Zeitschrift: 11/2019: 54-59; Wiesbaden.
- [9] Buchelt, B. und Pfriem, A. (2011): Influence of wood specimen thickness on its mechanical properties by tensile testing: solid wood versus veneer.- Holzforschung: 05/2011: 249-252; Berlin.
- [10] Dunky, M and Niemz P. (2002): Holzwerkstoffe und Leime.- Berlin: Springer-Verlag
- [11] Heyner, D., Piazza, G., Beeh, E., Seidel, G., Friedrich, H., Kohl, D., Nguyen, H., Burgold, C. und Berthold, D. (2021): Innovative concepts for the usage of veneer-based hybrid materials in vehicle structures Materials: Design and Application: Vol. 235/2021: 1302–1311; London.
- [12] Piazza, G., Heyner, D., Beeh, E., Friedrich, H. (2021): Methodology to Simulate Veneer-Based Structural Components for Static and Crash Load Cases, Materials Design and Application III: Advanced Structured Materials, Vol 149, p 77–90; Springer, Cham.
- [13] DE 102018120190 A1
- [14] Große, T., Fischer, F., Kohl, D., Heyner, D. und Piazza, G., (2021): Holz in crashrelevanten PKW Strukturen am Beispiel eines funktionsintegrierten Türaufprallträgers.- Tagungsband im Rahmen der Schriftenreihe Holz- und Papiertechnik der Professur für Holztechnik und Faserwerkstofftechnik: Band 30; Dresden.
- [15] Straßburger P. (2019): Baukastenbasiertes Vorgehensmodell für die Entwicklung von Prüfungen crashbelasteter Fahrzeugkomponenten im Schlittenversuch, Universität Stuttgart Diss. 2019.

Active control of airbag filling: sensor, valve, test bench, best-practice of industry-university-cooperation

Naveen Shirur, Dr.-Ing. **Christian Birkner**,

Technische Hochschule Ingolstadt;

Andreas Foster, Continental, Regensburg;

Matthias Bleeck, Vitesco Technologies, Regensburg

Abstract

Predictive crash detection systems enable the activation of irreversible restraint systems before time of collision ("before T0") when the crash is safely predicted.

This technology enables the further development of airbag systems to become self-adapting systems according to the crash scenario and also take into account different seating position possibilities. By that the so called "smart airbags" can be used in highly automated and autonomous driving vehicles as well as in current standard vehicles for the passenger side.

The idea of industry-university-cooperation between Continental and TH Ingolstadt is to investigate the potential of future technologies of "smart airbags" and to transfer the results into technology concepts which are valid for serial production.

These technology concepts are based on high-precision airbag control valves to control the deployment phase of the airbag and touch-sensitive sensors inside the airbag fabric for detecting the first contact time, the contact area and the contact position of the passenger into the airbag in real-time.

Due to the fact that the airbag activation before T0 is only possible if the pre-crash detection ensures the non-avoidance, the airbag system also needs to be deployed in standard way at T0 to fulfil all safety regulations. So, the controllability of the deployment phase is essential for this system to adapt the deployment to the actual crash situation. The filling curves will be conFig.d by multiple crash simulations and validated in some selected scenarios at the testbench.

For testing of controllable airbag systems new test benches needs to be developed to enable the measurement of valve characteristics and the valve control algorithm. Also, the test bench concept is part of this paper.

Keywords: smart airbags, control valve, airbag contact sensor, restraint effect control, pre-crash

Introduction

Airbag together with the seat belt is a standard automotive passive safety system [1]. It mitigates occupant injuries from impact forces during a vehicle crash. Contrarily, airbag deployment can also cause injuries to upper body parts due to its deployment force. The injuries are not life-threatening but result in long-term disability and loss of mobility [2]. Therefore, we need to optimize the airbag to mitigate the injuries.

State-of-the-art automotive airbags are "one-size-fits-all" systems and they are aggressive due to their impulsive inflation power [1]. When the occupant is in the deployment zone, there is an increased probability of deployment injuries. In such situations, injury mitigation requires inflation pressure control [1]. The airbag's performance depends on the occupant's size and weight. Generally, the airbags are designed to protect a mid-sized occupant (one-size-fits-all). The bag pressure will be higher for lower occupant kinetic energies and vice versa [3]. Hence, there is a requirement to adapt pressure for every percentile occupant. Dual-stage airbags offer pressure control for improved protection compared to a single-stage baseline inflator [4]. They are better performers in terms of aggressivity and protection at high speeds while the bag pressure can be modulated [4]. Nevertheless, the second stage firing decision requires occupant contact detection with the airbag [4]. Airbag depowering was permitted in 1997 through FMVSS 208 regulation aiming the injury reduction for small drivers and out-of-position [1]. Hault-Dubrulle et al., in their research, concluded that using the depowered airbags with cool-gas inflators and the adaptive vent is beneficial in non-standard pre-crash postures [5]. Kästner et al. developed a gas control valve for airbag power adaptivity [6]. The valve is a solenoid-driven pilot valve based on the servo principle. It can enhance the airbag's performance for varying sizes and mass of the occupant [6]. Contrarily, it operates according to a set of pre-defined activation settings offering only open-loop control. We require occupant contact feedback to enable closed-loop control.

There is a significant technological advancement in computer vision systems. The head position estimation provides whether the occupant is in the airbag deployment zone or the safe zone. According to the size and position, the airbag can be fully or partially deployed [7]. Hence, we require a device and a method to vary the airbag pressure.

Further, with the rapid change in vehicle automation, occupants choose different postures and tasks while commuting in highly and fully automated vehicles [8]. The change in pose, position and stature are new challenges for airbag deployment, demanding adaptation and pressure control.

The literature emphasizes the beneficial role of depowered airbags in mitigating injuries. On the other hand, occupant detection with the airbag is crucial to modulate the bag pressure.

White et al. developed a capacitive sensor by painting the airbag surface with conductive paint. The vent holes can be opened upon contact detection, thereby adapting the deflation [9]. Further, Shirur et al. developed novel capacitive sensors which provide occupant feedback data like contact time, area and position. The results are beneficial to control the restraint effect [10, 11].

Airbags can be triggered few milliseconds before the crash using pre-crash sensors' information [12]. It is essential to consider that the pre-crash activation requires a pressure modulation device for a longer airbag standing time.

The literature shows that although the depowered airbags mitigate the injuries, there is a need to control the bag pressure to address the new challenges posed by the automation levels and pre-crash sensing systems. The inflation pressure control alone cannot protect the occupants. We require occupant contact data and exhaust vent control to optimize the restraint effect and offer equality in safety for every percentile class occupant.

We have conceptualized an adaptive depowered innovative airbag in this industry-institute cooperative research between Continental Automotive GmbH, Vitesco Technologies, and Technische Hochschule Ingolstadt. The final integrated system will address the airbag adaptivity for occupant size, posture, position, stature and pre-crash information. The system will benefit highly and fully automated vehicles because the automated vehicles' passive safety systems require highly adaptive systems due to occupant's freedom.

Method Overview

Airbag adaptivity requires three main components: an inflation control valve, a contact sensor and a vent exhaust valve, as shown in Fig. 1. This paper focuses on a component-level analysis of the inflation control valve and the contact sensor. Firstly, we have developed an inflation control valve. The valve modulates inflation pressure required for pre-crash detection, occupant size and position. We evaluate the valve's performance by 3D flow simulations and ballistic tank tests. Secondly, there is a contact sensor to provide the occupant's contact time area and position. We test the sensor under low-impact pendulum tests. In the following work package, we integrate sensor and valve are virtually and perform occupant safety simulations. A physically integrated airbag module will be tested in the following research phase with a novel cold-gas inflator test bench.

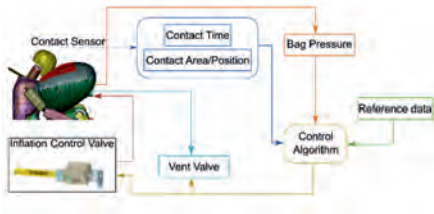


Fig. 1: System overview and methodology

Tactile Occupant Detection Sensor

We develop novel contact sensors for occupant detection with the airbag. Fig. 2 shows the matrix sensor configuration. It consists of four individual sensors equally spaced on the airbag. The sensor is a conducting cloth stitched on the airbag, as shown in Fig. 3(a).



Fig. 2: Matrix sensor

Capacitive Sensing

If the human body is insulated from the ground, the body will have a capacitance [13]. We utilize this electrical property in our work to detect the occupant's contact with the airbag. The sensor design in this work is based on the projected self-capacitance in loaded configuration [14]. The sensing cloth is installed on the bag's surface, which works as a transmitter and receiver [14]. Fig. 3(a) shows a prototype sensor installed on the airbag textile. The sensor voltage behavior is governed by Equation 1.

$$V_{sensor} = V_{supply} \left(1 - e^{\left(\frac{-td}{RA\epsilon_0\epsilon_r} \right)} \right) \quad (1)$$

Where V_{sensor} and V_{supply} are sensor and supply voltages, respectively. t is the time and d is the bag thickness which is the dielectric material in our case. The resistance R can be chosen based on sensor dimensions and the detection time required. ϵ_0 and ϵ_r are the primitivities of

vacuum and dielectric material. Fig. 3(b) shows the sensor voltage drop If there is a touch. ΔV is the drop that is proportional to the contact area.

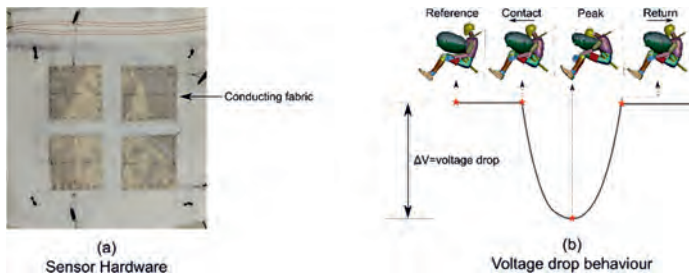


Fig. 3: Sensor hardware and voltage drop behavior during contact

Test Bench

We test the sensors under low-velocity pendulum impact, as shown in Fig. 4. The test bench consists of a 2.03 m swinging arm with a 6.81 kg head-form. Additionally, the square plates are attached to get a flat and uniform contact at the peak depth. The square plates are conductive with a connection to the human body, which simulates body capacitance. The airbag is kept inflated and rigidly mounted on the wall. The matrix sensor is tested at a constant bag pressure and swinging angle of 45° , corresponding to 3.41 m/s linear impact velocity. By keeping the impact position constant, we varied the plates' area to study the effect on the sensors.

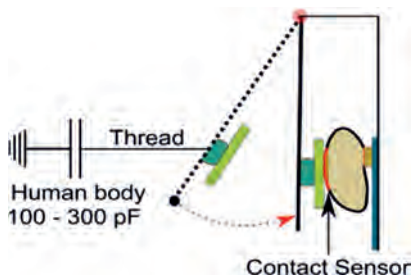


Fig. 4: Pendulum test bench

Results

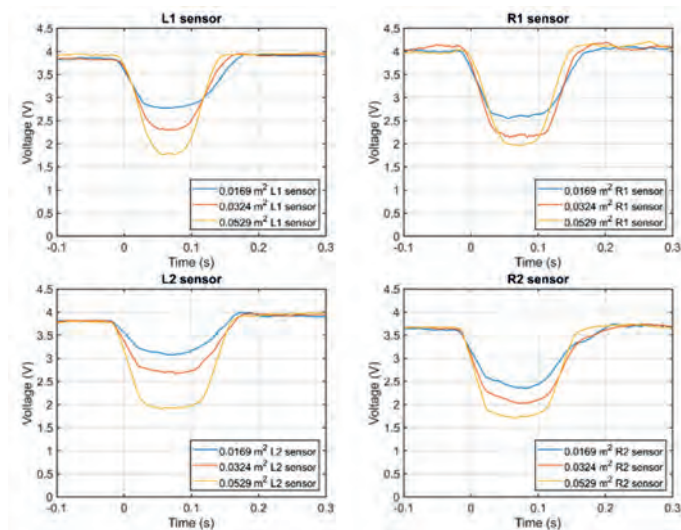


Fig. 5: Matrix sensor test results

Fig. 5 shows the matrix sensor test results. The reference voltage for all the sensors is between 3.5 V and 4.0 V. The voltage decreases with the contact progression. When we increase the contact area of the plates from 0.0169 m² to 0.0529 m² progressively, the voltage drop of all sensors increases but, we observe that the drop in each sensor is not identical due to the reason that the plates contact the bag at different times and contact area of each plate is not identical.

From the results, we conclude that the matrix sensor plays a significant role in out-of-position (OoP) situations. We can set a threshold for each sensor and identify the first touchpoint, which helps control the bag pressure in OoP situations.

Control Valve

Working Principle:

Fig. 6 shows the working principle of the inflation control valve with the cold-gas inflator. The force acting on the piston controls the valve activation. If the airbag receives the trigger signal, the inflator opens and the gas flows to the airbag through the valve and outlet three, as shown in Fig. 6 (a). Upon activation of the actuator, outlet three is closed, which rises the pressure

behind the piston. Although the pressure on either side of the piston is equal, the force difference ($F_1 > F_2$) due to the area difference ($A_1 > A_2$) closes the valve (Fig. 6 (c)) by displacing the piston as shown in Fig. 6 (b).

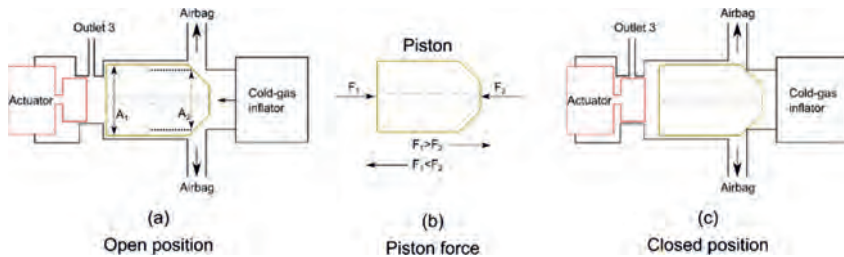


Fig. 6: Inflation control valve working principle

Flow Simulation Model and Test Bench

We evaluate the valve by flow simulations and ballistic tank tests. Fig. 7(a) shows the quarter flow model of the inflator and valve assembly. We simulate the model in ANSYS Fluent® using a pressure-based solver and obtain the tank pressure history, which will be validated with the tests.

Fig. 7(b) shows the laboratory tank test setup. The cold-gas inflator (660 bar) with the control valve is mounted in the can. We conduct two experiments, one with a fully open valve and the second by actuating the valve.

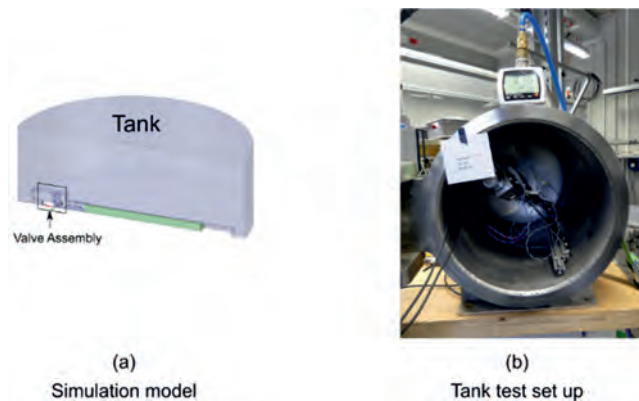


Fig. 7: Simulation model and test set up to evaluate valve's performance

Results

Fig. 8(a) shows the comparison of numerical and experimental results for the fully open valve. We find a good correlation between simulation and experimental tank pressure history. The tank-pressure history can be correlated to a pyrotechnic inflator pressure profile. Fig. 8(b) shows the results for the valve actuated pressure modulation in the deployment time window. We observe higher pressure in the simulation since the valve cannot be closed fully in the numerical model. Fig. 8(c) illustrates the mass flow rate obtained by the simulations. The mass flow rates will be used as input for the airbag model in the occupant safety simulations. The results reveal that the valve successfully modulates the inflation pressure during the bag deployment, which is significant in controlling the airbag power in pre-crash deployment cases and adjusting the restraint effect according to the occupant's size.

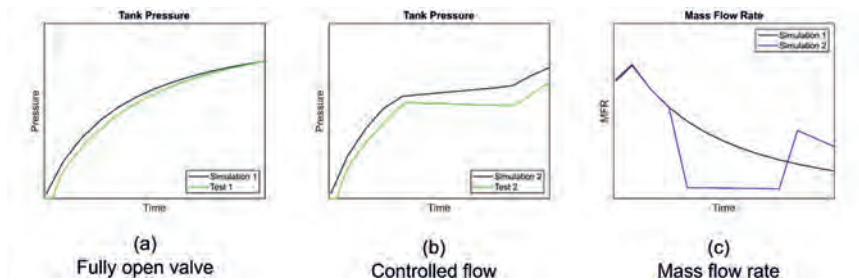


Fig. 8: Simulation and experimental results comparison

Gas Simulator Test Bench

The valve performance evaluation requires a test bench. We develop an innovative and automated gas simulator test bench at CARISSMA, Technische Hochschule Ingolstadt as shown in Fig. 9. It consists of a compressed, stored gas up to 200 bars, a high-pressure compressor (up to 1550 bar), a variable volume gas storage device (1550 bar) to simulate a cold-gas inflator, the control valve and a tank.

The working gas can be helium, nitrogen, or air. It can be selected based on the requirements (volume and pressure required for the airbag). The compressor compresses the working gas to a maximum of 1550 bar pressure and stores it in the variable storage device. Upon trigger, the gas flows through the control valve into the can. Further, the tank can be replaced with the airbag and tested with either pendulum or drop tower impact.

The test bench offers flexibility to vary inflator energy (pressure and volume) which helps in testing bigger airbags. Since the test bench is automated, it reduces the time of each test. Further, the inflator costs can be substantially reduced.

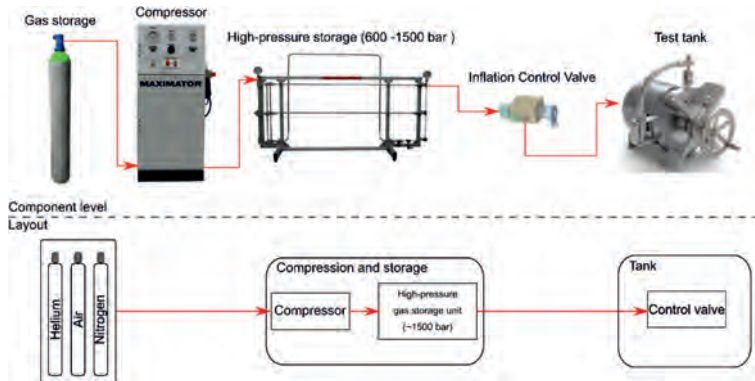


Fig. 9: Gas simulator test bench

Conclusions and Future Work

In this paper, we have discussed the component-level analysis of the airbag power adaptivity and occupant contact detection. Firstly, the control valve successfully modulates the bag inflation pressure, which is beneficial for pre-crash detection and different percentile class occupants. Secondly, the contact sensor detects the occupant contact and measures the contact parameters, significant for closed-loop feedback control.

Further, the gas simulator test bench offers flexibility to vary the input energy to the airbag and substantially reduces testing costs.

In the next work packages of the joint venture between Continental Automotive GmbH, Vitesco Technologies, and Technische Hochschule Ingolstadt, the components will be virtually integrated in occupant safety simulations followed by validation under different impact test facilities.

Acknowledgements

We thank Mr. Tran Duy Giap, laboratory engineer at Technische Hochschule Ingolstadt, for his support during the pendulum test bench construction and sensor testing.

Funding

We thank Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie for funding the joint project under the grant number DIK0187/06.

References

- [1] Phen, R. L., Dowdy, M. W., Ebbeler, D. H., Kim, E.-H., Moore, N. R., and VanZandt, T. R. 1198. *Advanced Airbag Technology Assessment*, USA.
- [2] Huelke, D. F., Moore, J. L., Compton, T. W., Samuels, J., and Levine, R. S. 1995. Upper extremity injuries related to airbag deployments. *The Journal of trauma* 38, 4, 482–488. DOI=10.1097/00005373-199504000-00003.
- [3] Wood, R. 2013. *Characterisation of Particulate Matter Originating from Automotive Occupant Restraints*. PhD, Offord Brookes University.
- [4] Hollowell, W. T., Summers, L. K., and Prasad, A., Eds. 2001. *Performance Evaluation of Dual Stage Passenger Air Bag Systems*.
- [5] Hault-Dubrulle, A., Robache, F., Drazetic, P., Guillemot, H., and Morvan, H. 2011. Determination of pre-impact occupant postures and analysis of consequences on injury outcome--part II: biomechanical study. *Accident; analysis and prevention* 43, 1, 75–81. DOI=10.1016/j.aap.2010.07.013.
- [6] Kästner, F., Heyer, K., Iben, U., and Kolatschek, J., Eds. 2014. *Gas Control Valve for Enhanced Adaptivity of Airbag Inflators*.
- [7] Yang, Y., Zao, G., and Sheng, J., Eds. 2008. *Occupant Pose and Location Detect for Intelligent Airbag System Based on Computer Vision*. DOI=10.1109/ICNC.2008.599.
- [8] Sofia Jorlöv, Katarina Bohman, and Annika Larsson, Eds. 2017. *Seating Positions and Activities in Highly Automated Cars – A Qualitative Study of Future Automated Driving Scenarios*.
- [9] White, C., Burdock, J., and Clancy, E. November 8. *Airbag with Bag Mounted Sensor*, US2004/0090053 A1.
- [10] Shirur, N., Birkner, C., Henze, R., and Deserno, T. M. 2021. Tactile Occupant Detection Sensor for Automotive Airbag. *Energies* 14, 17, 5288. DOI=10.3390/en14175288.
- [11] Shirur, N., Birkner, C., Henze, R., Deserno, T. M., Dudhat, D., Shirur, N., Birkner, C., Henze, R., Deserno, T. M., and Dudhat, D., Eds. 2020. *Effect of Airbag Deployment Phases on Tactile Occupant Detection Sensor*. IEEE, Kielce. DOI=10.1109/AUTOMOTIVESAFETY47494.2020.9435283.
- [12] Cuddihy, M., Rao, M. K., and Hall, I. 2020. *Method for Operating a Pre-Crash Sensing System to Deploy Airbags Using Inflation Control*, US8463500B2. <http://arxiv.org/pdf/2005.01140v1>.

- [13] Jonassen, N. 2002. *Electrostatics*. The Springer International Series in Engineering and Computer Science 700. Springer Science+Business Media New York; Springer, Boston, MA. DOI=10.1007/978-1-4615-1073-4.
- [14] Grosse-Puppenthal, T., Holz, C., Cohn, G., Wimmer, R., Bechtold, O., Hodges, S., Reynolds, M. S., and Smith, J. R., Eds. *Finding Common Ground: A Survey of Capacitive Sensing in Human-Computer Interaction*. DOI=10.1145/3025453.3025808.

Kontrollierbarkeit und Akzeptanz einer unvorhergesehenen, reversiblen Hochleistungsgurtstraffung

Controllability and Acceptance of an Unforeseeable High Power MSB Pre-Tensioning

Dr. Gert Weller, Oliver Czepulowski, Dr. Lisa Diwischek,
Joyson Safety Systems Aschaffenburg GmbH, Berlin;
Felix Hoffmann, Tim Miller, Roland Schnabl, Paul Sprongl,
Joyson Safety Systems Aschaffenburg GmbH, Ulm

Zusammenfassung

Der reversible Hochleistungsgurtstraffer (High Power MSB) ermöglicht es durch eine – gegenüber heutigen Serienaggregaten – erhöhte Straffkraft den Insassen zu positionieren. Dies zum einen bei lateralen Beschleunigungen, welche zum Beispiel bei einem Ausweichmanöver auftreten, zum anderen vor einem Unfall aus einer Out-of-Position (OOP) Situation.

Die bei einer Vorstraffung auf den Oberkörper wirkenden Gurtkräfte können mittelbar Auswirkungen auf die Fahrzeugführung haben. Nach ISO 26262 wäre damit eine Einstufung im Rahmen des ASIL (Automotive Safety Integrity Level) notwendig, hier insbesondere hinsichtlich des Kriteriums Kontrollierbarkeit durch den Fahrer.

Zur ersten Abschätzung der Kontrollierbarkeit einer unvorhergesehenen Straffung mittels High Power MSB wurde eine Versuchsreihe in einem Fahrsimulator durchgeführt (N=36).

Die gefahrene Strecke bestand aus einem Landstraßen- und einem Autobahnabschnitt, deren Reihenfolge zwischen den Probanden ausbalanciert war. Innerhalb jeder Straßenkategorie erlebten die Probanden eine nicht vorhersehbare Straffung.

Neben subjektiven Daten wurden insbesondere die Fahrdaten ausgewertet.

Die Auswertung der Daten zeigte – wenig überraschend – zwar eine geringe Akzeptanz der unvorhergesehenen Straffung, jedoch eine relativ hohe subjektive Kontrollierbarkeit im mittleren Bereich. Die Fahrdaten (u.a. Lenkradbetätigung und Spurführung) zeigten signifikante Unterschiede zwischen Abschnitten vor und nach der Straffung sowie zwischen Vergleichs- und Versuchsabschnitt. Die Relevanz dieser Ergebnisse für eine Einstufung der Kontrollierbarkeit im Sinne des ASIL wird im Beitrag ausführlich diskutiert.

Abstract

In comparison to today's series' retractors, the reversible High Power Motorized Seatbelt (HP-MSB) allows to position a passenger with higher tensioning forces. This applies both for lateral accelerations as resulting from evasive maneuvers and for Out-of-Position (OOP) situations when preceding an accident.

Despite forces impacting on the upper torso can be adapted variably, their magnitude exceeds conventional retractors and might thus result in unwanted leg or arm movements. These might in turn affect pedal and steering wheel operation and could in the worst case result in an accident. Following ISO 26262 (Road Vehicles – Functional Safety) this would require an ASIL (Automotive Safety Integrity Level) rating, especially concerning the criteria Controllability.

To assess the effect on controllability of an unwanted tensioning via HP-MSB an experimental study with predominantly external participants (30 out of 36) was conducted in a three channel static driving simulator. Besides a valid driving license, the absence of potentially relevant illnesses or operations especially on the upper body were a prerequisite for the participation. Both during recruiting and before the experiment all participants were informed about the nature of the study and potential risks. Due to the general increasing injury risk with age participants older than 54 years were excluded. With 16 female and 21 males the gender distribution was almost balanced.

The driven road consisted of 12km of rural road and 15km of motorway. Their order was balanced between participants. At the beginning of each road category the participants experienced a slack-reduction. Near the end of each road category participants were exposed to the unforeseeable HP-MSB pre-tensioning. Pre-tensioning forces were 600N with a maximum ramp up time of 200ms. Following each slack reduction and each pre-tensioning the participants were asked for their subjective ratings.

Due to its relevance for controllability, driving data was in the focus of the analyses. The analyses comprised absolute values after pre-tensioning, the statistical analyses of differences before and after pre-tensioning and between pre-tensioning sections and comparable, non-tensioning sections with similar road geometry.

While, not surprisingly, participants' acceptance of the unforeseeable pre-tensioning was small, the data still exhibited a relatively high subjective controllability that was situated around the medium range of the scale. Driving data showed clear effects of the pre-tensioning both in the comparison between before and after pre-tensioning, as well as between comparison sections without pre-tensioning and pre-tensioning sections. The relevance of the results regarding the ASIL factor Controllability is discussed in the publication.

Hintergrund

Ähnlich wie bei einem handelsüblichen Serien-MSB können mit einem HP MSB (High-Power Motorized Seatbelt) verschiedene Funktionen der passiven Sicherheit und des Komforts sowie vibrotaktile Warnungen [1] umgesetzt werden. Im Gegensatz zum erstgenannten MSB erlaubt der HP MSB jedoch weitaus höhere und schneller ansteigende, reversible Straffkräfte.

Die dabei auf den Oberkörper wirkenden Gurtkräfte sind variabel einstellbar, bewegen sich aber, um oben genannte Funktionen im OOP Fall abdecken zu können, in einer Größenordnung die deutlich über denen heutiger Serienaggregate liegt. Wirken derartige Kräfte auf den Oberkörper, kann nicht ausgeschlossen werden, dass es in der Folge zu unbeabsichtigten Hand- und Fußbewegungen kommt. Durch die Verbindung zu Lenkrad und Pedalerie könnte dies sicherheitskritische Auswirkungen auf die Fahrzeugführung haben und im Fall einer unvorhergesehenen Auslösung schlimmstenfalls selbst zum unfallauslösenden Moment werden. Nach ISO 26262 wäre damit eine Einstufung im Rahmen des ASIL (Automotive Safety Integrity Level) notwendig, hier insbesondere hinsichtlich des Kriteriums Beherrschbarkeit oder Kontrollierbarkeit der Fehlfunktion durch den Fahrer in der vorab als relevant definierten Situation. Die Einstufung der Kontrollierbarkeit erfolgt anhand der in Tabelle 1 genannten Stufen.

Tabelle 1: Der ASIL Faktor Kontrollierbarkeit mit Abstufungen laut ISO 26262-3 [2]

C0	sichere Beherrschung (alle Fahrer beherrschen diese Situation, z.B. ungewollte Erhöhung der Radiolautstärke)
C1	einfache Beherrschbarkeit (mehr als 99% der Fahrer können die Situation beherrschen, z.B. Lenksäule beim Start des Fahrzeugs eingerastet)
C2	normale Beherrschbarkeit (mehr als 90% der Fahrer können die Situation beherrschen, z.B. Ausfall des ABS während einer Notfallbremsung)
C3	schwierige Beherrschbarkeit (weniger als 90% der Fahrer beherrschen die Situation, z.B. plötzlich auftretende hohe Lenkkräfte)

Zur Einstufung der Kontrollierbarkeit nach ASIL, stehen zwei Methoden zur Verfügung, sie kann als Expertenevaluation oder mit Hilfe von Probandenversuchen erfolgen [3]. Sowohl zu Durchführung einer Expertenevaluation als auch von Probandentests werden im RESPONSE Code of Practice (CoP) [3] Empfehlungen gegeben. In ISO 26262-3 [2] wird mit Verweis auf diesen Code of Practice darauf hingewiesen, dass der Einsatz der Methode von der angestrebten Kontrollierbarkeitsstufe abhängt. Während eine – vermutlich nicht angestrebte - Einstufung als C3 (im schlimmsten Fall also „nicht kontrollierbar“) ohne weiteren Nachweis erfolgen kann, wird vorgeschlagen, für eine Absicherung von C2 Probandenversuche

durchzuführen und für eine Absicherung von C1 und C0 Expertenratings. Der Grund für die Verwendung von Expertenratings ist, dass eine Absicherung von C1 oder C0 mit Probandenversuchen entweder nur mit sehr hohem Aufwand (für C1 schlägt [4] ein Kollektiv ab etwa 300 PB vor; zur hohen Variabilität der PB siehe [5]) oder – für C0 – schlichtweg nicht durchführbar ist („Absolute controllability does not exist“; [3], S. 15). Andererseits ist eine belastbare Einstufung durch Experten nur möglich, wenn eine ausreichende Datenbasis vorliegt, aus der Ratings für den ausgewählten Anwendungsfall abgeleitet werden können. Da eine entsprechende Datenbasis für den hier zu untersuchenden Fall einer unvorhersehbaren Vorstraffung nicht vorliegt, wurde eine Kombination aus beiden Methoden gewählt. Probandenversuche wurden hierzu in einem Fahrsimulator durchgeführt. Die Nutzung eines Fahrsimulators hat im Vergleich zur Nutzung eines Realfahrzeugs im Feld die Vorteile der höheren Sicherheit, Reproduzierbarkeit und Kontrollierbarkeit [5].

Methoden

Zur ersten Abschätzung der Kontrollierbarkeit einer unvorhergesehenen Vorstraffung wurde eine Versuchsreihe in einem statischen Fahrsimulator durchgeführt.

Der hier verwendete Fahrsimulator besteht aus dem vorderen Teil eines realen PKW. Die Anzeigeelemente wurden ersetzt und können nach eigenen Vorgaben angesteuert werden. Die Fahrsimulation (SILAB, WIVW) wird über eine Dreikanalprojektion mit einem Sichtfeld von 117° horizontal und 47° vertikal dargestellt. Zusätzlich wird die Rücksicht über Monitore angezeigt die an Stelle der Spiegel angebracht sind.

Die Integration des HP-MSB erfolgte an der B-Säule des Simulatormockups, die Auslösung der HP-MSB Funktionen (hier: Gurtlosereduktion und Vorstraffung) erfolgte über ortsbasierte Trigger in der Simulationssoftware.

Die in der vorliegenden Studie angewandten Straffcharakteristika für die Vorstraffung wurden auf eine Straffkraft von maximal 600N mit einer Anstiegszeit von 200ms eingestellt. Die tatsächlich auf den Probanden wirkenden Straffkräfte können sich aufgrund der unterschiedlichen Körperformen und der dadurch bedingten unterschiedlichen Sitzpositionen unterscheiden, sollten aber aus Sicherheitsgründen die eingestellten Kräfte nicht übersteigen.

Um Schäden der teilnehmenden Personen auszuschließen wurde ein zweistufiger Ansatz gewählt: zunächst wurden Schlittenversuche durchgeführt, deren Daten zur Erhebung der zu erwartenden Brusteindrücke verwendet wurden. Eine folgende Literaturstudie diente zur Absicherung der gefundenen Brusteindrückungswerte gegen mögliche Verletzungen.

Der verwendete Schlittenversuch orientierte sich an einem Frontalaufprall wie er in FMVSS 208 (Federal Motor Vehicle Safety Standard) für einen 50% Mann Hybrid III Dummy auf der

Fahrerseite mit einer Auftreffgeschwindigkeit von 56 km/h definiert ist. Die verwendete Strafkraft für die HP-MSB Vorstraffung wurde so eingestellt, dass sie an der B3 Position (zwischen oberem Umlenker und Brustkorb) etwa 1000N betrug. Die hier verwendeten und im Vergleich zum eigentlichen Versuch höheren Strafkraften wurden bewusst gewählt und dienten als zusätzliche Sicherheitsreserve für die Probandenversuche. Dies ist auch dem Umstand geschuldet, dass H III Dummies eine niedrigere Biofidelität aufweisen als neuere Dummies und tendenziell niedrigere Brusteindrückungswerte zeigen [7]. Diese betrugen für die Vorstraffung mit 1000N knapp unter 5mm, was einer Brusteindrückung von etwa 2,3% entspricht. Etwas höhere Werte ergaben sich in einer später durchgeführten Wiederholung der Schlittenversuche mit THOR Dummies. Hier betrug die Brusteindrückung etwa 10mm (THOR 50% männlich), entsprechend einer Brusteindrückung von 4,4%. Zur Einordnung dieser Werte ist grundsätzlich zu beachten, dass die nach T0 gefundenen Werte in einem Schlittenversuch um ein Vielfaches höher liegen.

Die Literaturrecherche ergab, dass erste AIS Verletzungen erst ab etwa 1500N (bei Frauen) bzw. ab 1800N (bei Männern) zu erwarten sind [8]. Verletzungen, die auf die Brusteindrückung zurückzuführen sind, sind allerdings stark altersabhängig. In Studien von Kent et al (2003, zitiert in [9]) ergeben sich für die in den Schlittenversuchen gefundenen prozentualen Brusteindrückungen, für ein Alter von etwa 30 Jahren keinerlei Verletzungsgefahren, für ein Alter von 70 Jahren hingegen erste Verletzungen bereits ohne Brusteindrückung. Diese Wahrscheinlichkeit von etwa 15% steigt mit den zu erwartenden Brusteindrückungen gegenüber keiner Eindrückung jedoch nur minimal an. Um dieser Altersabhängigkeit gerecht zu werden, wurden ältere Probanden bereits ab 55 Jahren aus den Versuchen ausgeschlossen.

Die Auswahl der Probanden richtete sich ansonsten nach den von der NHTSA [10] vorgeschlagenen Altersgruppen. Für die Gesamtzahl der Probanden wurden die in [3] genannten Mindestanzahlen zugrunde gelegt. Die ursprünglich angedachte gleichmäßige Verteilung der Probanden auf die Alters- und Geschlechtsgruppen konnte aufgrund der Pandemiesituation nicht vollständig umgesetzt werden, da einige externe Probanden durch sieben interne Probanden ersetzt werden mussten (16 weibliche PB, davon 1 PB intern; 20 männliche PB, davon 6 intern).

Neben einer gültigen Fahrerlaubnis waren das Fehlen möglicher relevanter Vorerkrankungen, Schäden oder Eingriffen am Oberkörper Voraussetzung der Teilnahme. Alle Probanden wurden sowohl bei der Rekrutierung als auch vor Beginn des Versuches über die Art des Versuches und mögliche Risiken aufgeklärt.

Die gefahrene Simulatorstrecke bestand aus einem etwa 12km langen Landstraßen- und einem damit verbundenen etwa 15km langen Autobahnabschnitt. Die Reihenfolge der

Abschnitte war zwischen den Probanden ausbalanciert. Am Anfang jeder Straßenkategorie erlebten die Probanden die Reduktion der Gurtlosen (eng.: slack reduction), gegen Ende jeder Straßenkategorie die nicht vorhersehbare Vorstraffung. Diese erfolgte auf der Autobahn auf einem geraden Abschnitt, auf der Landstraße im Scheitelpunkt einer Rechtskurve ($L=500\text{m}$; $R=300\text{m}$).

Nach jeder Gurtlosereduktion und jeder Vorstraffung erfolgte eine Befragung der Probanden. Die Befragung fand bei stehendem Fahrzeug nach der Straffung am Ende der für die Fahrdaten relevanten Abschnitte statt. Anhand einer zehnstufige Likert Skala wurde nach dem Druck, dem Erschrecken, dem Schmerz und dem Ärger über eine entsprechende, ungewollte Gurtstraffung im eigenen Fahrzeug, sowie nach der Kontrollierbarkeit der Situation basierend auf [11] gefragt.

Für die Abschätzung der Kontrollierbarkeit im Rahmen einer ASIL Bewertung wird die Beibehaltung des geplanten Spurverlaufs („maintain the intended driving path“; ISO 26262-3 [2] als besonders relevant genannt. Entsprechend wurden für den vorliegenden Fall einer unvorhergesehen Gurtstraffung die entsprechenden Variablen der longitudinalen und lateralen Spurhaltung sowie deren entsprechende, vorangehende Bedienhandlungen ausgewertet.

Als Grundlage der Datenauswertung wurden jeweils die 250m vor und 500m (Autobahn) bzw. 750m (Landstraße) nach der Straffung betrachtet. Der eigentlichen Auswertung ging eine grafische Veranschaulichung der Daten voraus. Als Grundlage der statistischen Auswertung wurden innerhalb dieser Strecken jeweils 50m Abschnitte gebildet und darin für jeden Probanden die deskriptiven Kennwerte (Minimum, Maximum, Standardabweichung und Mittelwert) erhoben. Die Nummerierung der Abschnitte erfolgte absteigend von 05 bis 01 bis zur Straffung und aufsteigend von 01 bis 10 (Autobahn) bzw. 15 (Landstraße) nach der Straffung. Der statistischen Auswertung lag die Prüfung von vier Unterschieden zugrunde:

- Gibt es Unterschiede zwischen den Abschnitten vor und nach der Straffung?
- Gibt es entsprechende Unterschiede in den Vergleichsabschnitten?
- Gibt es Unterschiede zwischen Vergleichsabschnitten und Straffabschnitten? Diese Prüfung fand getrennt nach Abschnitten statt:
 - o vor der Straffung (idealerweise keine Unterschiede),
 - o nach der Straffung (Unterschiede sofern Straffwirkung vorhanden).

Vor der statistischen Auswertung in R wurden die Daten hinsichtlich deren Voraussetzungen untersucht. Die Prüfung auf Normalverteilung erfolgte mit dem Shapiro-Test, die Schiefe mit dem Agostino-Test, die Kurtosis mit dem Anscombe-Test, die Varianz-Homogenität wurde mit dem Levene-Test untersucht. Aufgrund überwiegend nicht normalverteilter Daten erfolgte die Datenauswertung für die subjektiven Daten einheitlich über einen Friedmann-Test für

abhängige Stichproben mit anschließenden Wilcoxon-Test mit Bonferroni-Korrektur der einzelnen Paarvergleiche. Letzteres wurde ebenso für die Paarvergleich der Fahrdaten (s.o.) verwendet.

Um eine anschauliche Interpretation der zahlreichen Einzelvergleiche zu ermöglichen, wurden diese zusammengefasst und grafisch veranschaulicht. Diese Auswertung erlaubte es auch die Dauer der möglichen Straffeffekte (bezogen auf die Strecke) abzuschätzen.

Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse muss sich aufgrund der Vielzahl der ausgewerteten Daten notwendig auf ausgewählte Aspekte beschränken. Als relevantes Beispiel zu den Fahrdaten ist im Folgenden die Auswertung des Lenkwinkels für den Autobahnabschnitt dargestellt. Hier erfolgte die Darstellung der Standardabweichung grafisch, für die übrigen Parameter tabellarisch.

In Abbildung 1, linke Seite, ist zu sehen, dass sich die Werte zwischen Vergleichsabschnitt und Straffabschnitt in Abschnitt 01 vor der Straffung nicht signifikant unterscheiden. Dies deutet auf gute Vergleichbarkeit beider Abschnitte hin.

Für den Abschnitt 01 nach der Straffung (Abbildung 1, rechte Seite), sind hoch signifikant höhere Standardabweichungen für den Straffabschnitt im Vergleich zum Vergleichsabschnitt zu sehen. Dies deutet auf einen Effekt der Straffung hin.

Dies wird durch die in Abbildung 2 gezeigten Ergebnisse bestätigt: Zum Einen gab es im Vergleichsabschnitt ohne Straffung keine signifikanten Unterschiede zwischen den Abschnitten Vor01 und Nach01 (Abbildung 2, linke Seite) aber hoch signifikant höhere Standardabweichungen zwischen diesen beiden Abschnitten im Straffabschnitt (Abbildung 2, rechte Seite). Damit lässt sich der Unterschied zwischen den Abschnitten vor und nach der Straffung mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Straffung zurückführen.

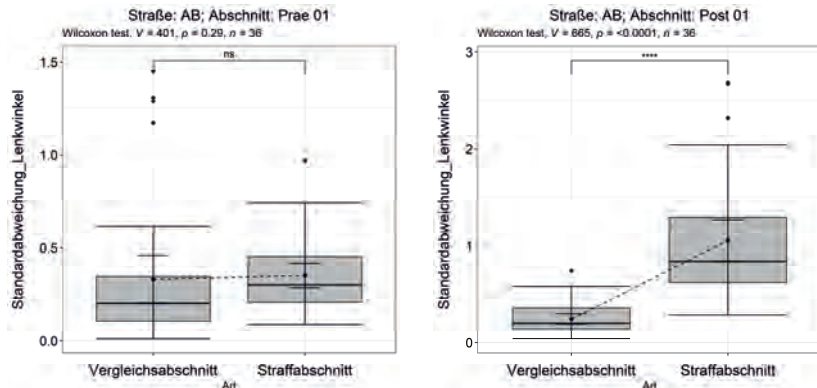


Bild 1: Standardabweichung Lenkwinkel, Autobahn, Abschnitt 01: Unterschied zwischen Vergleichsabschnitt und Straffabschnitt vor (linkes Bild) und nach der Straffung (rechtes Bild)

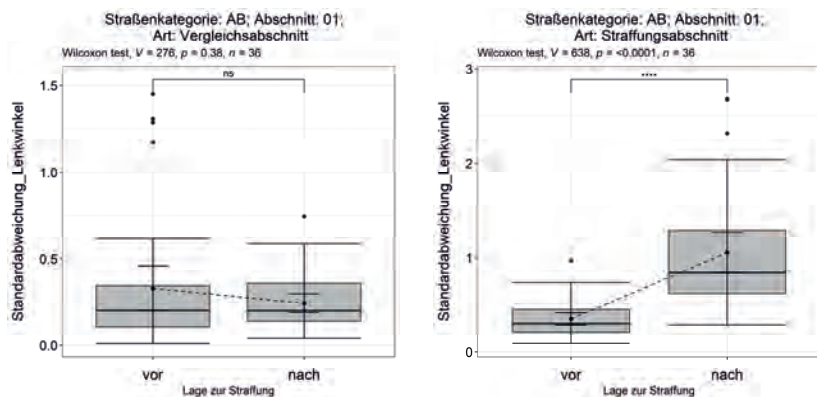


Bild 2: Standardabweichung Lenkwinkel, Autobahn, Abschnitt 01: Unterschied zwischen dem Abschnitt vor und nach der Straffung für den Vergleichsabschnitt (linkes Bild) und den Straffabschnitt (rechtes Bild).

Deutlich signifikante Effekte der Straffung zeigten sich auch für die Parameter Minimum und Maximum, nicht jedoch für den Mittelwert. Letzteres ist darauf zurückzuführen, dass die Probanden nach der Straffung sowohl stärker nach links (entsprechend dem Maximum des Lenkwinkels) als auch stärker nach rechts (entsprechend dem Minimum des Lenkwinkels) gelenkt haben und sich diese beiden Bewegungen ausgeglichen haben. Zum Tragen kommt dieses

starke Schwanken dagegen in den erhöhten Werten der Standardabweichung (siehe Abbildungen 1 und 2).

Nach der exemplarischen detaillierten Darstellung des Lenkwinkels wird im Folgenden eine aggregierte Auswertung über die weiteren erhobenen Variablen (Geschwindigkeit, longitudinale und laterale Beschleunigung, Brems- und Gaspedalbetätigung, Lenkradbeschleunigung und -geschwindigkeit sowie laterale Position) einschließlich deren Parametern dargestellt. Die Trennung der Darstellung nach den einzelnen 50-Meter Abschnitten erlaubt zudem eine Abschätzung der Dauer des Einflusses der Straffung.

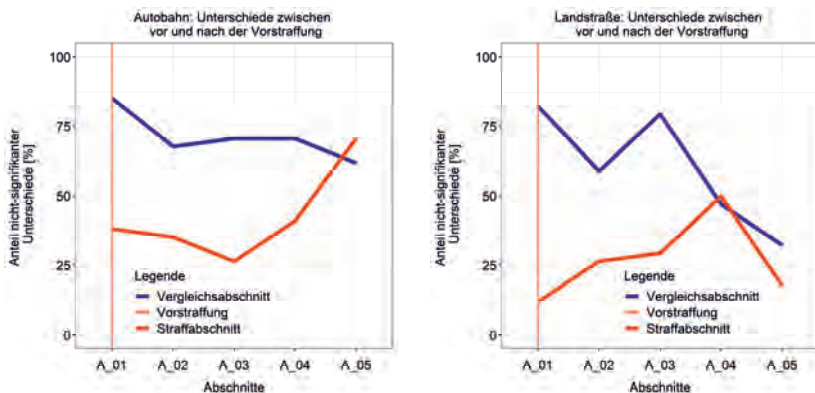


Bild 3: Anteile nicht-signifikanter Unterschiede zwischen den Abschnitten vor und nach der Straffung getrennt nach Vergleichsabschnitt und Straffabschnitt für die Autobahn (linkes Bild) und die Landstraße (rechtes Bild).

In Abbildung 3 wird der Anteil der nicht-signifikanischen Unterschiede über alle Variablen und Parameter zwischen dem Abschnitt vor und dem numerisch zugehörigen Abschnitt nach der Straffung dargestellt. Bei Abschnitten ohne Straffung ist wegen deren zunehmender Entfernung anzunehmen, dass der Anteil nicht-signifikanter Unterschiede mit dem Anstieg der Nummerierung der Abschnitte fällt. Dies ist in Abbildung 3 für die Vergleichsabschnitte erkennbar. Umgekehrt verhält sich die Entwicklung für die Straffabschnitte: hier ist der Anteil nicht-signifikanter Unterschiede am geringsten beim Vergleich des ersten Abschnittes vor bzw. nach der Straffung. Eine Angleichung der beiden Kurven für beide Versuchsabschnitte findet mit zunehmender Entfernung von der Straffung statt und erreicht auf der Autobahn im fünften, auf der Landstraße im vierten Abschnitt ähnliche Werte. Damit verliert sich der Effekt der Straffung nach 200m auf der Autobahn bzw. 250m auf der Landstraße.

Basierend auf der Relevanz der Spurhaltung für die Beurteilung der Kontrollierbarkeit wurde zusätzlich eine Variable der absoluten Spurhaltung ausgewertet. Diese Variable („VehicleOff-Road“) beschreibt ob sich in den betrachteten Abschnitten nach der Straffung irgendein Teil des Fahrzeugs außerhalb des Fahrstreifens befunden hat. Hier ist zu beachten, dass die Fahrbahn analog zur RAL [12] weder die Fahrbahnmarkierung noch die Schulter beinhaltet, ein positiver Wert von VehicleOffRoad demnach nicht notwendig als gefährliches Verhalten einzustufen ist.

Während auf der Autobahn weder für den Straffabschnitt noch für den Vergleichsabschnitt VehicleOffRoad-Vorfälle auftraten, war auf der Landstraße, auf der die Abschnitte in Kurven lagen, eine Zunahme von 20% zu verzeichnen (auf dem Vergleichsabschnitt 11 (31%), auf dem Straffabschnitt 19 (53%) der 36 Probanden).

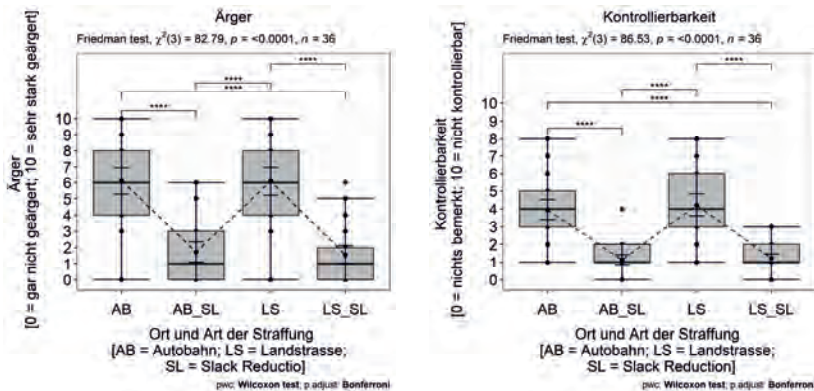


Bild 4: Befragungsdaten zur Vorstraffung und zur Gurtlosereduktion (SL): Ärger über eine Fehlauslösung wie eben erlebt im eigenen Fahrzeug (linkes Bild) und subjektive Kontrollierbarkeit der erlebten Straffung (rechtes Bild).

Die statistische Auswertung der subjektiven Daten zeigte für alle Variablen ein ähnliches Muster wie in Abbildung 4 dargestellt: die Vorstraffung wurde im Vergleich zur Gurtlosereduktion über alle Variablen hinweg als signifikant höher bewertet, Unterschiede zwischen den Straßenkategorien Landstraße und Autobahn wurden weder für die Vorstraffung noch für die Gurtlosereduktion signifikant.

Die in Abbildung 4 dargestellten Variablen Ärger und Kontrollierbarkeit wurden wegen deren praktischer Bedeutung beispielhaft für alle subjektiven Variablen ausgewählt. Die Variable Ärger (definiert als „Wie stark hätten Sie sich geärgert wenn die eben erlebte Gurtstraffung ein

einziges Mal in Ihrem Fahrzeug vorkäme?“) war diejenige Variable mit den höchsten negativen Bewertungen (siehe Abbildung 4, linke Seite MW (SD): AB, 6,11(2,49); LS, 6,08(2,6)). Den Gegenpol mit den niedrigsten Werten belegt die Variable Schmerz (MW (SD) Schmerz: AB, 2,64 (1,71); LS, 2,92 (2,08)). Die Bewertung der Kontrollierbarkeit durch die Probanden bewegte sich zwischen diesen beiden Polen in einem mittleren Bereich (siehe Abbildung 4, rechte Seite; MW (SD): AB, 3,94 (1,64); LS, 4,22 (1,81)).

Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen zunächst eine deutliche Auswirkung der Vorstraffung auf das Fahrverhalten. So beträgt die Zunahme der signifikanten Unterschiede für den Abschnitt 01 für den Abschnitt mit im Vergleich zum Abschnitt ohne Vorstraffung etwa 50% für den Autobahnabschnitt und annähernd 70% für den Landstraßenabschnitt. Betrachtet man die diesen Änderungen zugrunde liegenden absoluten Werte ist deren praktische Relevanz jedoch gering. So betrug die – statistisch signifikante – Veränderung der Spurführung im Mittel lediglich etwa fünf Zentimeter (SD=3,1) auf der Autobahn und vier Zentimeter (SD = 4,1) auf der Landstraße. Dennoch führte diese geringe Änderung der Spurhaltung zu einer etwa 20 prozentigen Zunahme der Fälle, bei denen sich ein Teil des Fahrzeugs außerhalb des Fahrstreifens auf der Landstraße befand, gleichzeitig jedoch zu keinem einzigen Fall eines vollständigen Abkommens von der Fahrbahn.

Schließlich können auch die subjektiven Urteile der Probanden zur Abschätzung der Kontrollierbarkeit herangezogen werden. So bewertete die überwiegende Mehrheit von 33 Probanden die Kontrollierbarkeit als relativ mittig zwischen „nicht bemerkbar“ und „nicht kontrollierbar“.

Basierend auf diesen Ergebnissen ist weder eine Einstufung als C3 noch als C0 gerechtfertigt. Die Entscheidung zwischen C1 oder C2 stößt auf die eingangs diskutierten methodischen Probleme. Während es in keiner der untersuchten Fahrten zu einem unkontrollierbaren Vorfall kam – was einer Einstufung als C1 entspräche – kann diese Einstufung wegen der geringen Fallzahlen (s.o.) nur über Expertenratings erfolgen.

Um eine sichere Datenbasis für zukünftige Expertenurteile zu schaffen, wird vorgeschlagen, weitere Studien durchzuführen. Diese betreffen zunächst die Änderung der Straffcharakteristika und im Weiteren die Untersuchung des Einflusses der Anwesenheit anderer Verkehrsteilnehmer. In einem nächsten Schritt ist die Durchführung im Realfahrzeug auf gesicherten Strecken denkbar.

Literatur

- [1] Weller, G., Schnabl, R., Strümpfer, Chr. & Möller, L. (2019) Gurtbasierte, taktile Rückmeldekonzeppte in Übernahme-situationen beim automatisierten Fahren. In: VDI-Berichte Band 2364, S. 81-94. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- [2] ISO 26262-3 (2018) Straßenfahrzeuge - Funktionale Sicherheit - Teil 3: Konzeptphase (Road vehicles - Functional safety - Part 3: Concept phase). Berlin: Beuth-Verlag.
- [3] RESPONSE (2009) Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS. PRE-VENT Report 11300, v5.0. EU IST Contract number FP6-507075.
- [4] Weitzel, D.A. (2013). Objektive Bewertung der Kontrollierbarkeit nicht situationsgerechter Reaktionen umfeldsensorbasierter Fahrerassistenzsysteme. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt.
- [5] Ständer, T. (2011) Eine modellbasierte Methode zur Objektivierung der Risikoanalyse nach ISO 26262. Dissertation Fakultät Maschinenbau, TU Braunschweig.
- [6] de Winter, J.C.F., Leeuwen, P.M. & Happee, R. (2012). Advantages and Disadvantages of Driving Simulators: A Discussion. In: A.J. Spink, F. Grieco, O.E. Krips, L.W.S. Loijens, L.P.J.J. Noldus, and P.H. Zimmerman (Eds): Proceedings of Measuring Behavior 2012 (Utrecht, The Netherlands, August 28-31, 2012), S 47-50.
- [7] Kallieris, D., Rizzetti, A. & Mattern, R. (1995). The Biofidelity of Hybrid III Dummies. 1995 IRCOB Conference Proceedings. 13 - 15 September 1995; Brunnen (CH).
- [8] Duma, S.M., Stitzel, J.D., Kemper, A.R., McNally, C., Kennedy, E.A. & Matsuoka, F. (2005). Non-Censored Rib Fracture Data from Dynamic Belt Loading Tests on the Human Cadaver Thorax. 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Washington DC, United States, 2005-6-6 to 2005-6-9.
- [9] Kent, R., Lee, S.H., Darvish, K., Wang, S, Poster, C.S., Lange, A.W., Brede, C., Lange, D., Matsuoka, F. (2005). Structural and material changes in the aging thorax and their role in crash protection for older occupants. Stapp Car Crash J., 49(11), p. 231-49.
- [10] NHTSA (2013). Guidelines for Reducing Visual-Manual Driver Distraction during Interactions with Integrated, In-Vehicle, Electronic Devices. Docket No. NHTSA-2010-0053. Version 1.1.
- [11] Neukum, A., & Krüger, H.-P. (2003). Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.). Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn. VDI-Berichte, 1791. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- [12] FGSV (2021) RAL - Richtlinien für die Anlage von Landstraßen. Köln: FGSV Verlag

Flexible integration of airbag weakening lines in interior components

Airbag Weakening with Jenoptik Laser technology

Dipl. Ing. **Sebastian Dienert**, Jenoptik, Jena

Zusammenfassung

Die Laser Airbagschwächung ist ein bewährtes Verfahren zur Einbringung von Sollbruchstellen in Interieurkomponenten. Insbesondere werden Instrumententafeln, Träger und Dekorschichten mit diesem Verfahren geschwächt. Durch die Weiterentwicklung der Technologie ist es möglich nahezu alle Materialien im Fahrzeuginnenraum zu bearbeiten. Gerade im Hinblick auf autonome Fahrzeuge, mit zunehmend variableren Sitzpositionen, ist eine Technologie notwendig, die es ermöglicht, Airbagsysteme flexibel und an neuen Positionen im Fahrzeug einzusetzen. Durch die Lasertechnologie von Jenoptik ist dies möglich.

Introduction

Today's vehicles have a very high safety standard thanks to sophisticated active and passive safety systems. The perfect adjustment between the vehicle structure, seating position, sensors, actuators and airbags greatly reduces the load on vehicle occupants who are involved in an accident to reduce the severity of injury.

The systems are optimized for standardized seating positions of drivers and passengers who are sitting in the direction of travel. To verify the safety of the vehicle several test setups have to be passed. The direction, velocity, dummy configuration and the damping behavior of the involved accident parties differs according NCAP or legal specification. All test criteria assume that driver and passengers are sitting in the same position all the time. Reviewing several design studies it is obvious that the seating configuration will get changed when the vehicles are able to operate autonomously. For example, it is conceivable that the driver and the passenger turn their seats around to get in conversation to passengers in the vehicle front. Another scenario could be a sleeping position while the autonomous vehicle operates by its own without the involvement of the driver.

All those potential new positions will drive the adaption of safety systems to avoid an increasing severity of injuries while vehicles accident since autonomous and conventionally driving

vehicles are using the same road network for a certain period of time and accidents cannot be obviated.

Current airbag systems and airbag weakening

Modern vehicles have numerous airbag and restraint systems to fulfill the safety requirements. For a frontal crash event beside the belt system driver airbags, passenger airbags and knee airbags are activated.

The driver airbag is located in the steering wheel and covered by a driver airbag cover which mostly consists of flexible plastic material. In luxury configuration the driver airbag may also be covered with genuine leather or high gloss décor foils. The cover itself need to be weakened for a good opening behavior while the cushion, which is folded inside the driver airbag module is inflating.

Knee airbags are in most cases invisibly mounted below the dashboard. The inflated cushion protects the tibia from hitting the dashboard and supports the rotation of the occupant for a better interaction with driver and passenger airbag especially needed for unbelted load cases. The airbag with the highest cushion volume and most inflator gas output is the passenger airbag. It is mounted in most cases inside the instrument panel of the vehicle. The inflating cushion is often guided by a shoot channel and pushes against the passenger airbag door which has several weaking lines supporting the opening behavior. Since the passenger airbag is located in a very exposed position it is very important to fulfill esthetic requirements such as an invisible weaking lines. Instrument panels are available in many material combinations and décor materials from hard polypropylene panels in the entry level up to genuine leather and textile covers for luxury vehicles. A known alternative for the passenger airbag location is the roof. Above the passenger the roof is opening to support the cushion inflation downwards.

Side Airbags are located in the seats of the vehicle or in trim covers beside the seats and reduce the risk of severe injuries in side crash events thanks to quickly inflating cushions between the thorax and the vehicle structure. Further protection for side crashes is given by airbags mounted in the roof to protect the head of the occupants.

New safety requirement also consider a possible interaction between driver and passenger in an accident with lateral force. This requirement can be fulfilled with cushions which are inflated between driver and passenger. The airbag modules in that case could be located in the seats or inside the center console of the vehicle.

Another application for airbag module in the seat is the rear passenger airbag which is located in the backrest of the front seats. These airbags result in a better safety performance for the rear passengers.

All those many different airbag systems are hidden behind several interior components and get only visible after activation. Beside esthetic requirements it is mandatory that the opening behavior of airbag covers is well aligned to the deployment for the best possible airbag performance.

Therefor several weakening technologies are state of the art. It is feasible to implement areas in plastic components with injected thin lines for a tearing with low force. Such a technology is pretty common for driver airbag covers and also used in other components with soft and flexible cover materials such as knee airbags or side and rear-side airbags with visible plastic covers. The force to open the covers can be adjusted by the residual wall thickness, the position and geometry of the weakening line. Due to irregular rheological behavior in the thin areas of the plastic parts the tear lines are often visible. Tuning of those weakening lines is only possible by mold adaption and causes high efforts.

Another technology is to mill the weakening in the carrier components of the airbag covers. For example in instrument panels the glass fiber reinforced carrier can be weakened by milling through holes or slots along the tear line. Those carriers need to be covered with decorative materials such as genuine or artificial leather, textiles or decorative foils. The cover materials in that case need to be weakened in a previous step by cutting slots via knife. The disadvantage of this technology is the tool wear. Glass fiber reinforced plastic materials wearing the miller very fast which may cause bad quality of the weakened parts. Also the knives wear and the parts can't be weakened properly. In addition it is a well-known issue that chips of the milling process remains in the weakening slots and may fly around while airbag deployment. That's why all the parts need to be cleaned after the process. Knife cutting of PVC foils may under certain circumstances be insufficient because it is possible that the cut is self – healing because of temperature influence. To avoid this risk a release agent is applied to the cut.

In another weakening technology for genuine leather, thin needles are punching tiny holes into the material. The holes are invisible, but the needles may break in the serial production which leads to insufficient weaking and potentially remaining particles in the leather.

Airbags which are located in the seats behind textile or leather surface often use the seams of the sewn components. The threads in those areas are able to tear while airbag deployment.

In summary it is obvious that for the different airbag systems there are used many different weakening technologies for several reasons.

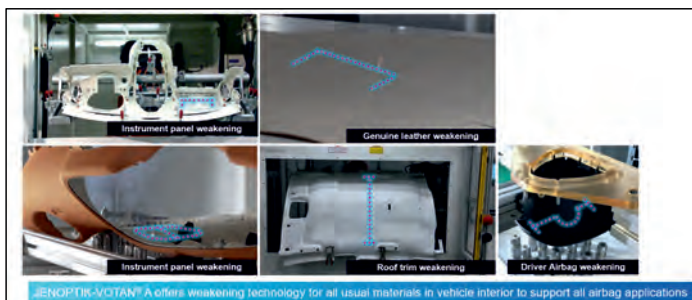
The only weakening technology which is able to process all those different applications is the laser airbag weakening. Thanks to working with the power of light there is no specific tool which is only capable for a specific application. Laser airbag weakening can be used for all mentioned airbag systems and is able to process all automotive interior materials.

Laser airbag weakening technology

Driven by the power of light the laser airbag weakening is a very special machining process. For all plastic materials with or without glass fiber, for soft and hard plastics or even wooden components a CO₂ Laser is an adequate tool. For temperature sensitive materials such as genuine leather a femtosecond laser is the best choice for processing. All usual vehicle interior materials can be processed with only one technology which is a big advantage in comparison to other weakening technologies.



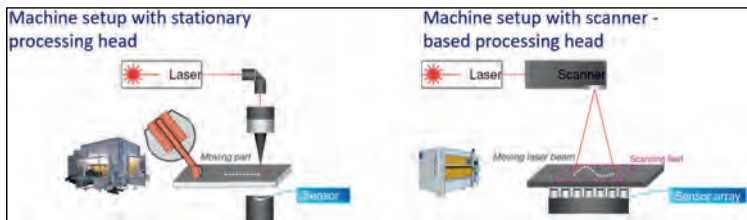
Picture 01: Laser Airbag Weakening: Applications & materials



Picture 02: Laser Airbag Weakening: Applications & materials (2)

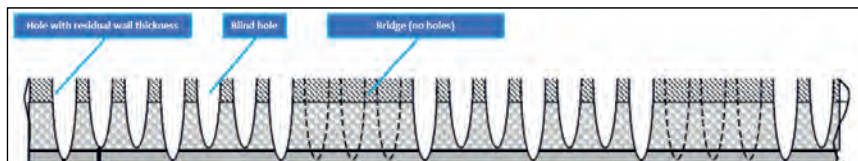
The laser light is transferred from the laser source via mirrors and lenses into the laser processing cell. The processing unit can be a stationary laser processing head or a laser scanner. While in machines with stationary laser processing unit the workpiece needs to be handled to implement weakening lines, the laser beam is been moving around in the scanner based machines. In both machine types the weakening is monitored over the complete process. When the laser beam is irradiating the work piece the material is vaporized by the high energy of the sharp focused light. Tiny holes are created along a predefined line – the tear line. The tear line itself is created by a large number of holes with or without residual wall thickness or with slots in any possible combination and with any kind of geometry, as per customer requirements.

The airbag opening force can be easily adjusted by changing the parameters of the tear line – for the best possible airbag performance.



Picture 03: Laser Airbag Weakening: Machine types

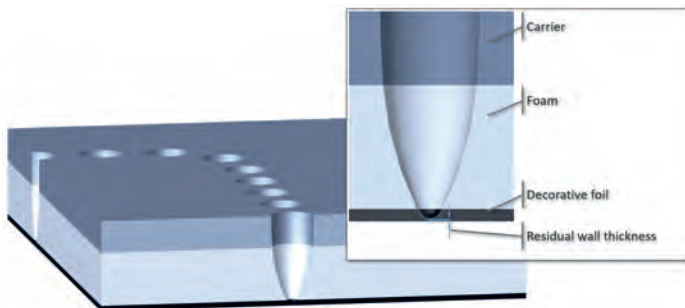
Monitoring the process is mandatory for a reliable weakening of safety relevant components. While the laser is cutting the holes into the material a sensor unit measures the laser radiation which is transmitted through the workpiece. In a closed loop machine regulation, the laser cutting is immediately stopped if the threshold of the transmitted radiation is reached. Every single hole of the weakening line is monitored in that way. The result are airbag covers with reliable weakening lines with minimal residual wall thicknesses. As the process is carried out without contact between a tool and the work piece, there are no vibrations and no friction in the parts. Between the holes it is possible to have small bridges to keep certain stiffness in the parts. All those advantages lead to invisible weakening lines fulfilling the highest standards. Parameter tuning for an optimizes airbag cover opening is important. There are several possibilities within the laser airbag weakening process. The depth of the holes in the workpieces can be adjusted by several attenuators in the sensor unit. Also the laser power, cutting speed and the laser beam focal position can be adjusted. Furthermore, the distance between single holes is adjustable and the type of holes may be modified. Not every hole needs to be a hole with a minimum residual wall thickness it is also applicable having blind holes.



Picture 04: Laser Airbag Weakening: hole types

High speed processing with a laser scanner reduces the heat introduction and avoids deformation or distortion of temperature sensitive materials such as foam, spacer fabric or genuine leather. Depending on the required application various laser sources can be used. The combination of all those parameters enables an extremely adaptable weakening technology which is unique in the passive safety market.

With the laser airbag weakening it is possible to process all available materials in a single processing step. For example, the carrier component can be weakened independently from the decorative foils, artificial or genuine leather or other cover materials. The assembly of carrier and cover materials will be done in a secondary process step. But it's also a common technique to have composite materials where the cover material such as PVC skins are polyurethan foam-backed together with a polypropylene carrier. Those composites can be weakened in only one process step for a perfect alignment between decorative skin and carrier material.



Picture 05: Laser Airbag Weakening: composite material processing

Using a femtosecond laser source even expand the possible applications for the laser weakening technology. Genuine leather is a very sensitive material against heat. Therefore, the leather has to be processed with very low heat introduction. With the femtosecond laser it is feasible to generate extremely short laser pulses with very high energy on a tiny spot. The leather is vaporized without being melted or burned by shifting its aggregate state abruptly from solid to gaseous – the so-called cold ablation. Otherwise, the leather structure would be distorted, the weakening line is hardened and there will be a bad smell in the material, which is unimaginable in an automotive environment.

Laser airbag weakening technology in future vehicles

It is known that autonomous vehicles will allow more flexibility in vehicle interiors. New seat positions and seating angles will be applicable.

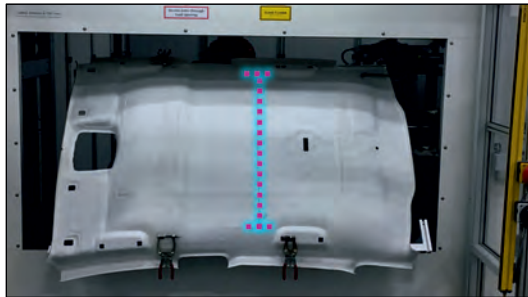
In this context, it will be necessary to integrate new positions and functionalities of airbags in vehicles. The roof trim and the seats will play an expanded role in the future, in order to achieve an early coupling between the airbag cushion and the passenger.

Vehicles with a high level of automation (level 3 & 4) will not necessarily need a human driver but a steering wheel still need to be available for specific driving conditions that are identified by the system. For this type of vehicle, it would be mandatory to integrate a frontal airbag system that secures the driver while operating and also in case the vehicle is in an autonomous mode. A classic driver airbag module may not cover the different load cases because of the limited cushion volume that can be integrated in the driver airbag cover. Imaginable would be an airbag system located in the dashboard above the steering wheel. Similar to today's passenger airbag modules, cushions with up to 150 l volume can be integrated to protect the driver in several crash situations. The Laser Airbag Weakening System JENOPTIK-VOTAN® A is one of the most famous solutions for the precise weakening of dashboards and is the most flexible technology for new airbag modules.

But not only frontal airbag systems need to be reconsidered. Vehicles with an automation level higher than level 3 will allow to rotate the seats for driver and passenger. All occupants may sit together in a group like in a train. To fulfill the current NCAP requirements there will need to be integrated new passive safety technology. Potentially the seats will be important to have the best alignment between passenger and the restraint system and enables an early coupling between cushion and occupant. Seat integrated airbag modules help to fulfill side crash requirements by inflation small cushions between the head & thorax and the vehicle pillars and door trims. If a seat integrated cushion shall surround the occupant completely to allow coverage in several directions the cushion volume need to be very high and need to be inflated in a very short time. This could cause issues for conventional technology.

Another option to restrain the occupants are roof integrated airbag systems which may allow more available space for bigger cushion sizes and inflators. Weakening of the roof trim is a technology which currently doesn't exist because conventional roof rail airbags are pushing the roof trim out of its fixing features which are located between pillar trim and roof trim. This

won't be possible for roof airbags which are located next to vehicle center. A necessary tear line that opens precisely with low force can be processed by laser airbag weakening.



Picture 06: Laser Airbag Weakening: Roof trim with a tear line



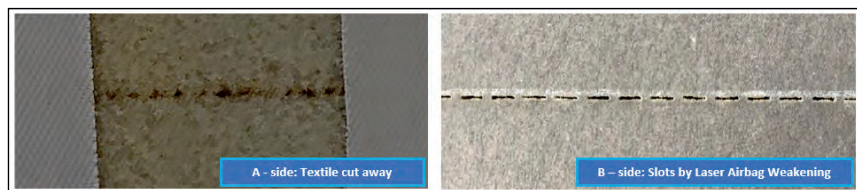
Picture 07: Laser Airbag Weakening: Roof trim processing

Interior components always communicate the quality demands of the vehicle and the brand. So also, for the future vehicles it would be an important requirement having invisible tear lines in the vehicle. With the laser weakening technology this requirement can be fulfilled.



Picture 08: Laser Airbag Weakening: Roof trim processing result

Only the laser weakening technology enables the weakening of composite materials in only one process step. Roof trims consists of a carrier material a soft spacer fabric or foam and a textile decor material. For a reliable tear line, it is absolutely necessary that the weakening of all layers are exactly aligned. This cannot be guaranteed if the single layers are processed separately. With the laser airbag weakening all layers can be assembled in a conventional process and weakened as a composite material afterwards. All layers will get precise holes but no visible through holes in the tear line couture. The material would not be damaged, the color won't be changed and the tear line will be absolutely invisible. With the sensor regulated system every hole of the weakening line is monitored and will have a residual wall thickness.



Picture 09: Laser Airbag Weakening: Roof trim processing result

As all parameters can be easily adjusted in the laser weakening process all potential new airbag systems and airbag cover tear lines can be supported.

No matter whether the tear lines have to be integrated into a roof trim, seat trim covers, pillar trims or any other component in the vehicle environment the Laser Airbag Weakening would be the tool of choice for today's and future airbag applications.

Picture Overview:

Picture 01: Laser Airbag Weakening: Applications & materials

Picture 02: Laser Airbag Weakening: Applications & materials (2)

Picture 03: Laser Airbag Weakening: Machine types

Picture 04: Laser Airbag Weakening: hole types

Picture 05: Laser Airbag Weakening: composite material processing

Picture 06: Laser Airbag Weakening: Roof trim with a tear line

Picture 07: Laser Airbag Weakening: Roof trim processing

Picture 08: Laser Airbag Weakening: Roof trim processing result

Picture 09: Laser Airbag Weakening: Roof trim processing result

A study on occupant kinematics with a highly reclined seatback position in a frontal crash

M.Sc. Duong Tran, Dr. Gerd Müller, Prof. Steffen Müller,
Technische Universität Berlin

1. Abstract

It was said that the highly reclined seatback can lead to more serious injury. Meanwhile, autonomous driving was predicted to become common transportation soon. In long-range travel, users have the trend to use a highly reclined seatback (fully rear reclined) to reduce the tired feeling. Some previous studies showed the result of occupant kinematics in such a position. By using the validated human body model, they indicated the severe injuries of the lumbar spine and neck vertebra. However, they are considered the body kinematics in a frontal crash without considering the impact of the initial posture (pre-position) of the occupant's body prior to a crash phase. It was said that the autonomous driving mode would be expected to perform a braking maneuver before the frontal crash phase happens. Therefore, the posture of the occupant at the end will be different from the posture at the beginning of the pre-crash phase, therefore the kinematics and injury values in the frontal crash will change. This study focuses on the comparison of the kinematics and injury values of the occupant between two cases: one case is not considering the pre-position and the other case is to consider the pre-position of the occupant in a frontal crash with the seatback reclining fully. The study showed the influence of the initial position on the injury values and kinematic results, and the next version of the restraint system on the autonomous vehicle should refer to this hypothesis to account into their database.

2. Introduction

Autonomous vehicles are predicted to become familiar, affordable, and beneficial, otherwise also impact the transportation planning issue. A highly autonomous vehicle is predicted to provide new interior concepts which allow occupants to be able to take a rest, read, work, sleep, watch (rather than only listen to audio) and do other specific activities [1]. In a long-range trip, the highly autonomous driving allows occupant riding with a highly reclined seatback

to find comfortable or relax. With the highly reclined position, the occupant seems to be more slipped forward than in comparison to a standard position in a collision. It was predicted that the occupant was posed into a more serious injury, mortality increased, and more challenges impact on the standard seatbelt in the protective occupant mission. The study [2] presented and analyzed the injury mechanism with a fully reclined seatback in the frontal crash. The fully reclined seatback increases the serious injury of the neck and spine due to the neck and lumbar spine interacted and constrained by the shoulder belt and lap belt. To investigate the occupant kinematics and the potential safety relating to the highly reclined seatback, [3] used a Human body model in the combination with the different sets of foot constrain. The author also found the influence of the configuration of seat cushion and lap belt angle on the occupant kinematics when the occupant model submarined due to the highly reclined seatback. [4] used four different 50th percentile male HBMs were compared to investigate the belt force and lumbar spine force when the occupant model was set at the initial position reclining reward. Since prior to a frontal collision, a braking maneuver was expected to perform to mitigate the serious injury or deaths, therefore the initial position of the occupant before the frontal crash is likely different from the position at the time of the collision beginning without the braking event. Additionally, the human kinematics behavior in the phase prior to a collision is very important for the restraint performance and might reduce the fatalities and injuries resulting from the crash in the next phase [5]. While [3] and [4] did not consider the initial position of the occupant prior to a crash, this study focused on the occupant kinematics and behavior in a frontal collision in case that the occupant seating on a seat with the seatback fully reclined, as well as the seatbelt force and the contact force with the airbag. This study conducted a comparison of these parameters above between the case of having a braking maneuver performing prior to the collision and the case of having no braking maneuver.

3. Method

This study used the MADYMO human body model 50th percentile mid-size male seated on the front passenger seat with the seatback reclined rearward 53° (fully reclined seatback) of the interior car model (Yaris NCAP 35mph 50th) [6] to simulate the occupant biomechanics and behavior during a frontal collision. To achieve the study aim, two models were created. The first model called the non-precrash phase model (VaAM-O). It was set to simulate the occupant kinematics in the 200ms of a crash without considering the precrash phase (braking maneuver). The second model called the precrash phase model (VaAM-I) which was identified the initial position of the occupant after the car model performed a 1s deceleration of a 1g

braking maneuver. VaAM-I has also simulated the occupant kinematics in 200ms of a crash. The behavior and kinematics results of the human model in two models were conducted a comparison to investigate the influence of the initial position on the occupant injury. The simulations were performed as following details:

- The MADYMO human body model (AHM) was set on the front passenger seat model with only the gravity loading using the Positioning Guidelines setting in [7] to find out the stable position. This setting was applied to both the models VaAM-O and VaAM-I. The seat model was created basing on the OEM seat with the seatback fully reclining at 53° and a 3-point belt also included in this model.
- The VaAM-I model has then simulated a braking maneuver in 3s in a 1g deceleration and 60 km/h of the velocity. The behavior and the kinematics of AHM were compared to a dataset of the volunteer test to perform a tuning to set up the optimized muscle activation of AHM. To identify the initial position of the occupant prior to the crash, the position of AHM was set after 1s posing in the braking pulse. The muscle activation of AHM of the model VaAM-O was also set as similar as in the VaAM-I. The body angles of the occupant were determined at the time of 1 second of the history time of the braking maneuver as showing in Table 1.
- At the last step, two models VaAM-O and VaAM-I have performed the collision of 200 ms. The kinematic results of AHM were used to compare and analyze the influence of the initial position on the kinematics and injury value in case that the seatback fully reclined.

Table 1: Joint angles of the posture of the models and volunteer (degree) - Prior to the crash

Angle of seatback	Body region	Model	VaAM-O	VaAM-I	Volunteer
		Time	1000 ms at precrash / 0 ms in-crash		
		Definition	in Degree corresponding to Horizontal		
Fully recline seatback	Head	Eye to Tragion	133	174.8	132
	Neck	C1 to C7/T1	48.6	61.5	55
	Thorax	C7/T1 to T12/L1	55.2	64.8	50
	Lumbar	T12/L1 to L5/S1	43.4	43.1	45
	Pelvis	L5/S1 to hip	24.8	21.7	15

The car model

This study used MADYMO occupant vehicle model (Yaris NCAP 35mph 50th) [8] which was validated by NHTSA oblique frontal crash tests. The Yaris model includes a vehicle interior and occupant restraint systems for the driver. The frontal seat model created based on the OEM front seat was validated by using a quasi-static loading test to estimate the stiffness properties, characteristic loading as seen in Fig. 1. The seat belt model was validated in a low deceleration braking maneuver by comparing it to the physical dummy 50th percentile as seen in Fig. 2. To do so, the Hybrid III 50th Dummy model was used to compare to the physical dummy in the standard posture during a braking maneuver with a similar condition.

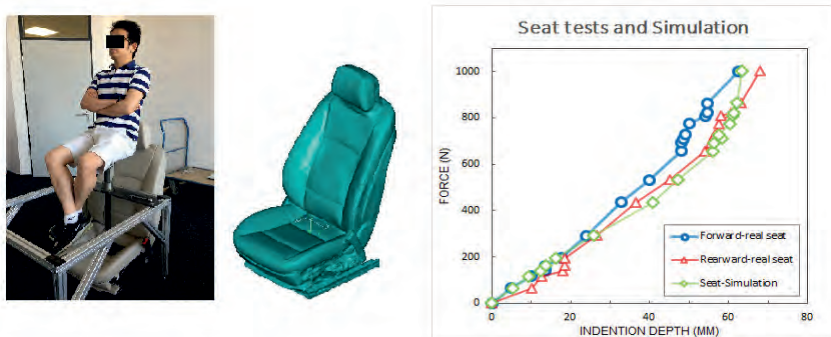


Fig. 1: The front seat model and the comparing result to the seat tests with volunteers.



Fig. 2: Introducing the Yaris car model and the physical dummy test with standard posture in a Braking maneuver.

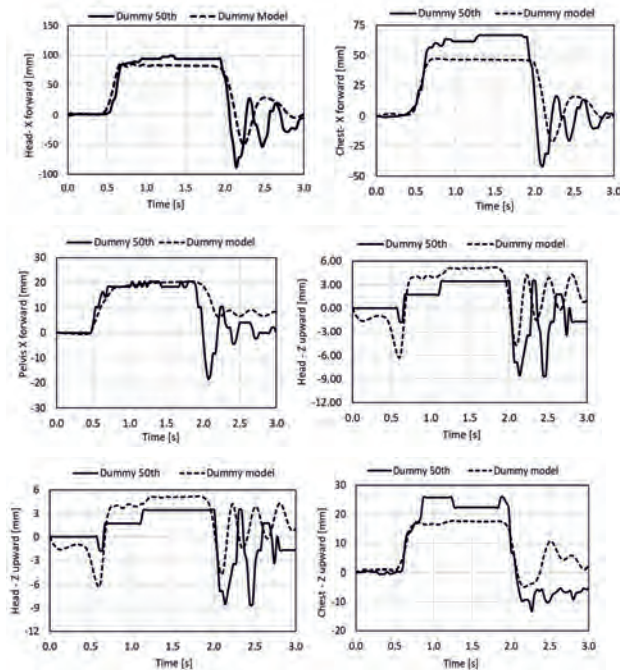


Fig. 3: Dummy data kinematics was used to validate the seatbelt model in a low acceleration.

Human body model

The active human body model (AHM) version 3.0 was developed by TNO Automotive Safety Solutions (TASS, Siemens Digital) in the MB and FE software package MADYMO version 7.7 [9]. The model's skeleton includes various rigid bodies and flexible bodies connected by kinematics joints. The AHM was based on the earlier released human body model – the facet mid-size male occupant model, controllers to stabilize the spine, the facet detailed legs model, the facet neck model, and a controller to stabilize the neck model, a detailed facet arm model, and a shoe model. To estimate the muscle activation of each group muscle, for example, the neck muscle including 16 muscle for one side and 32 muscle for both sides (left, right) [10-12], a PID control was used as seen in Fig. 4. Muscle forces were calculated at every step of the simulation. The displacement, rotation angle of the chest, and head was recorded and fed back to PID control for simulating the reflex activation to maintain the initial sitting posture. During

the time, The AHM was developed and validated in some previous models: the human model with stabilizing spine (Cappon et al. 2007), the human neck model with Hill-type line element muscle control (Nemirovsky et al. 2010), and combined human model (Rooij et al. 2011) [10-12]. However, there is no novel using this model to simulate in pre-impact with the alternative posture (with reclined seatback). For this purpose, the AHM combined with the car model which was mentioned in the previous section to simulate the braking maneuver in 3s with a fully reclined seatback. To optimize the muscle activation level of the AHM in this model, a model tuning was conducted by comparing it to the volunteer test which was mentioned in the next section.

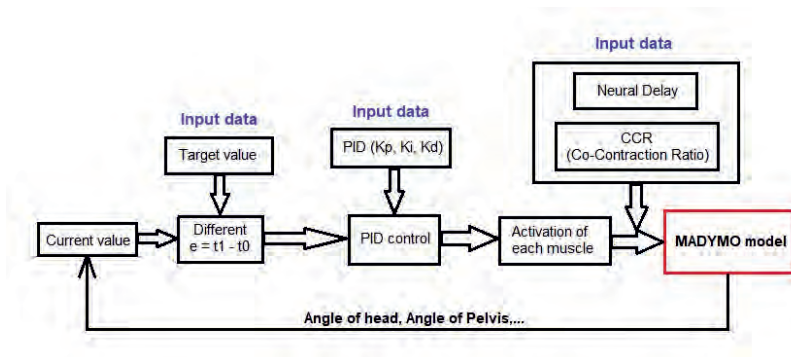


Fig. 4: A PID controller incorporation with MADYMO model to stabilize neck model.

Volunteer test

10 healthy volunteers, 7 males, and 3 females were selected to carry out 10 tests, wherein the seatback reclined 53° rearward (fully-reclined). The anthropometric data of each volunteer is given in Table I. A test vehicle BMW 535i Touring would be used. The test car was carried out 10 tests of the braking maneuver with the average pulse calculated as seen in Fig. 5. The acceleration pulse consisted of 1g / 60 km/h of the linear acceleration and the angular velocity during the test was also measured by the IMU accelerometer.

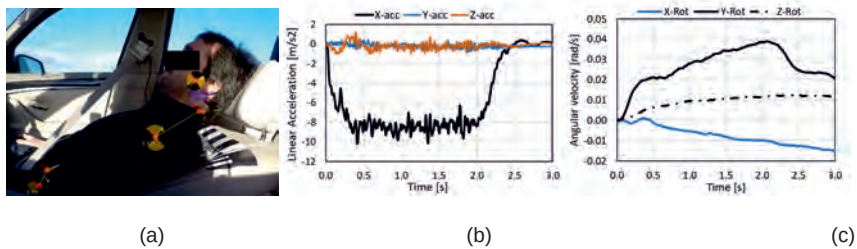


Fig. 5: Acceleration pulse of the test car measured in 3.0s.

To receive sufficient information about the kinematics of the volunteers, some small cameras were needed. Two cameras were mounted on the left side (B-pillar and Side window) to monitor the forward motions of the upper/lower torso. Two cameras were mounted on the front windshield to observe the lateral motions of the body. In addition, the belt force sensors were used to collect the seat belt data from the test. Several film targets were mounted on the vehicle interior (on the front/rear door panel, and the front seatback) to determine the volunteer's motions with respect to the car interior (Fig. 6). Fig. 7 indicated the schematic diagram of the equipment on the test car.



Fig. 6: Photos recorded of the cameras on the left and front side.

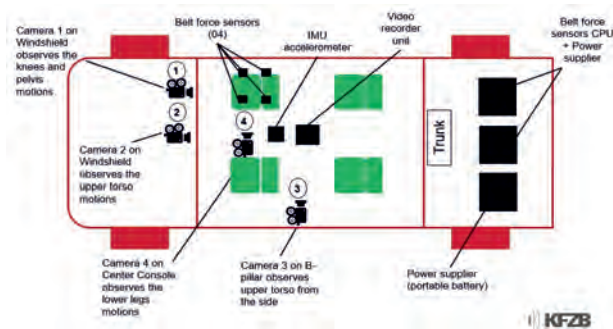


Fig. 7: The equipment positions on the test car.

The volunteers were positioned on the front passenger seat with a 3-point belt. The observed markers were attached mainly along the body of the volunteers to measure the displacements and rotations of the human body. This specific scenario data was used for defining the control parameters of the AHM. The volunteers were required to maintain their body in a relaxed state (no muscle tension) until the body motion was naturally stopped. The car test was repeated a few times for each volunteer to help them familiar with the test and be able to handle the body in relax well. During the tests, the 3-point seatbelt with the belt force sensors attaching, the position sensors have not been changed or unfasted during the test. The AHM was then simulated following the tests. The head, T1 kinematics, and the upper torso were compared to the volunteer data. The seatbelt model was validated to ensure the simulation model correctly as describing the pre-impact of what interacted with the volunteer body.

Table 2: Volunteer Anthropometric data

	Height (cm)	Weight (kg)	Age (yr)
Volunteer 1	182	70	21
Volunteer 2	172	70	39
Volunteer 3	181	76	32
Volunteer 4	180	78	41
Volunteer 5	162	53	24
Volunteer 6	165	60	36
Volunteer 7	172	77	33
Volunteer 8	163	51	26
Volunteer 9	181	79	28
Volunteer 10	180	70	29

Validation the model during the braking maneuver

Fig.s 5b and 5c show the average linear and angular deceleration which was collected from the volunteer test. These deceleration pulses were used as input data for the simulation model VaAM-I during the braking maneuver. The sitting position of the AHM on the fully reclined seatback model was set as following:

- The AHM posture chosen for the cervical joint in the most relaxed, the system at first was simulated with only gravity loading with the muscle controllers turn off. Letting the human model moving freely until it reaches a stable position. The angle of the joint was then fixed position for the simulation. Both hands were fixed on the thighs, and the legs straight out to the front. The feet were also fixed on the footplate (see Fig. 8a). The initial position and the characteristics of the seat belt model were kept as for the dummy model mentioned above and would not change for the simulation with AHM. It was assumed that the damping coefficient and elastic limit of the seat foam were 80 N s/m and 0.065 corresponding, and the coefficient of friction between buttock and seat cushion was set at 0.45, between the feet and footplate was 0.3.
- The activation level was turned based on the validated data, which was collected in the volunteer test. The activation level setting for various parts of the body was determined based on the optimization toward the volunteer dataset. Based on the study of Behr et al. [13], the activation levels of the muscles of the lower extremity during emergency braking could be up to 57% of the maximum possible activation level. Therefore, the hip activation and the knee activation level of this model were set at 0.57 and 0.5, respectively. The co-contraction was set at 80% as present in [12] and the delay reaction time was 160 ms.

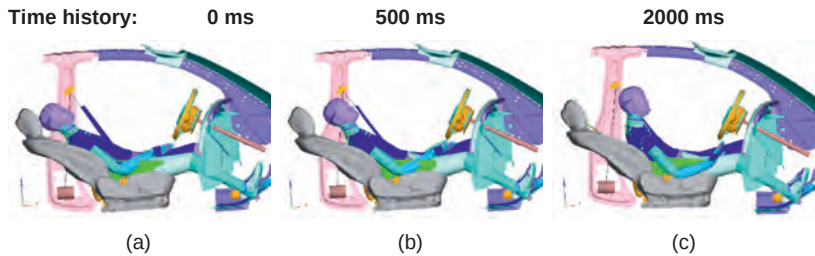


Fig. 8: AHBM in the braking simulation with the fully reclined seatback.

Fig. 9 shows the kinematics results of the simulation of the occupant in 3s of a braking maneuver with the seatback reclining fully. To achieve optimized muscle activation, a model turning was conducted. The red curve in Fig. 9 indicates the occupant kinematics and the seatbelt force. They have correlated well with the average values of the volunteer test. This model was then applied to the next step of the study to investigate the occupant behavior and bio-fidelity during a frontal crash. All settings of this model were also applied in the models VaAM-O.

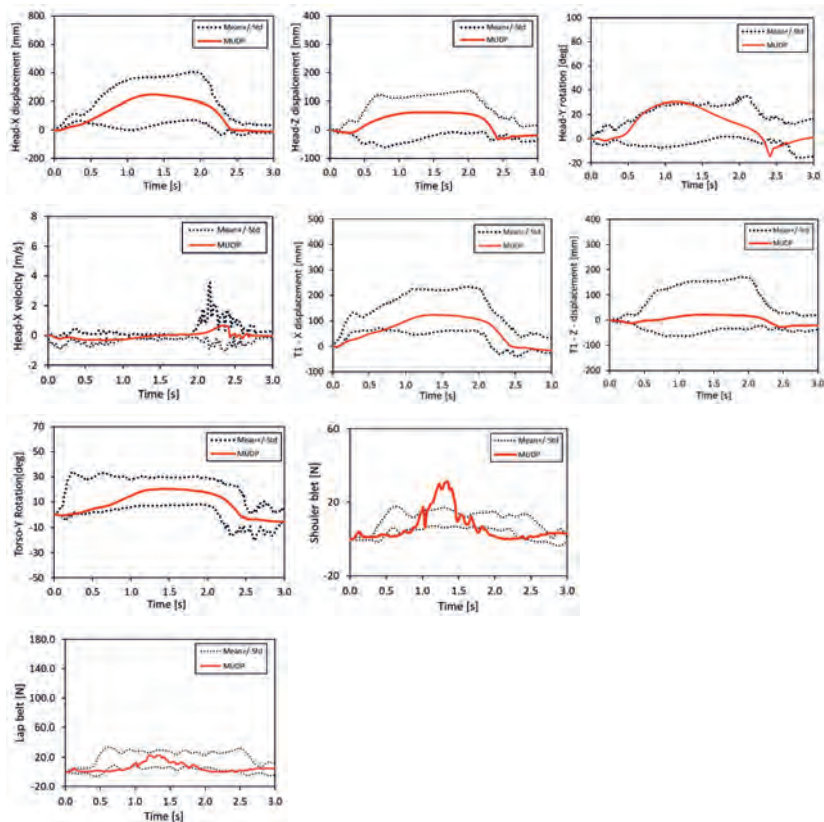


Fig. 9: Simulation model VaAM-I results of AHM with fully reclined seatback compared with the test result of volunteers.

VaAM-I model in crash setting

The model simulated two phases:

In the first phase, the model simulated the occupant behavior in 1s deceleration, 60 km/h of the initial velocity of a braking maneuver. The braking pulse was collected from the volunteer test. The muscle activation level of AHM was applied as in the previous presentation. Some other settings were also applied as the setting of the model in the above section: the initial

position of AHM on the seat, the contact position between the seatbelt and the human body, the position of the hand, feet on the footplate.

The second phase is a crash phase in 200ms. The model was programmed into a crash pulse which was measured in the crash test of [6] from the last second of the first phase (pre-crash) until to 200ms. The initial setting of the occupant was assumed that the muscle activation level was retained as in the braking maneuver. The initial position of AHM was specified at 1s of the pre-crash phase (0ms of in-crash phase) as in Fig. 11 and Table 1. The seatbelt contacted to the body was set 10N of tension force. The tension force was set based on the volunteer test results in Fig. 9 (shoulder belt and lap belt force). During the in-crash phase, the seatbelt retractor was locked when the car model deceleration reached 0.45G. The seatbelt pretensioners and the airbag were activated at 5ms after the in-crash phase triggered. The load-limiter value was set at 3.5kN. The braking deceleration pulse and the crash pulse was applied to the car model as shown in Fig. 10.

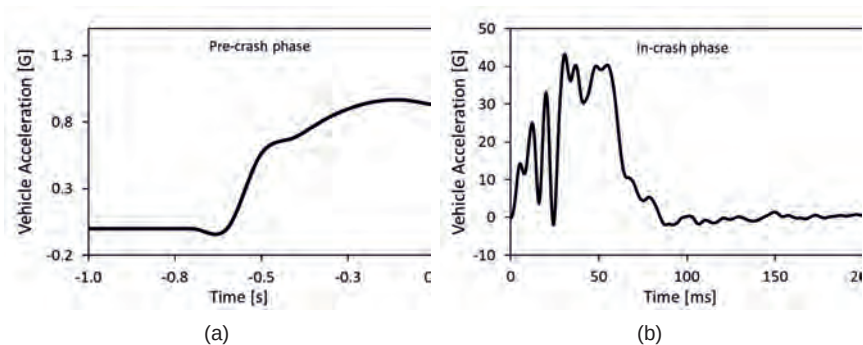


Fig. 10: Braking pulse and Crash pulse of the model.

VaAM-O model setting

The AHM was placed on the front passenger seat with the seatback reclining fully. The VaAM-O model was not considered the pre-crash phase before a collision. Therefore, the initial position of AHM was set as the validated model at 0s. The VaAM-O simulated the occupant behavior during the in-crash phase with a fully reclined seatback, only the deceleration pulse was applied to this model in 200ms. All other settings as the AHM muscle activation levels, the seatbelt tension, seatbelt retractor locking threshold, the airbag initial activation, and the load-limiter of the seatbelt were set similarly to the VaAM-I in the crash phase.

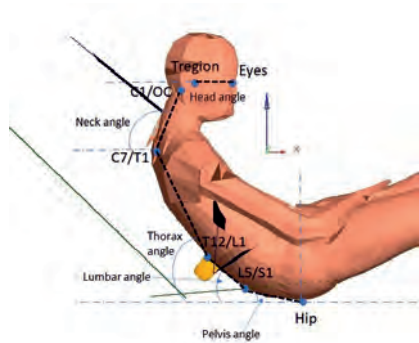


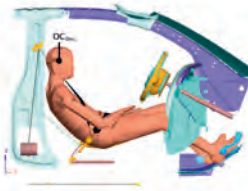
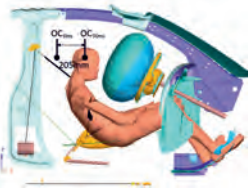
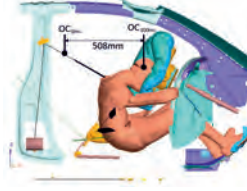
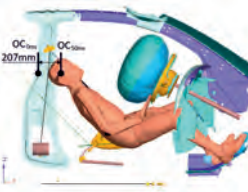
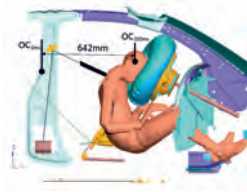
Fig. 11. Angular displacement measurement of AHM in the VaAM-I model.

To investigate the influence of the pre-crash phase, the initial position of the occupant seated on a full reclined seatback prior to a collision on the injury level, some parameters of the occupant body and contacted elements of the body and the car interior was estimated and was accounted to the comparison as below:

- The head angle and the compression force of C7-T1 joint.
- The pelvis angle and the compression force of T12-L1 joint.
- The seatbelt force and seatbelt contact force with the human body.
- The head contact force with the airbag.
- Head injury criterion (HIC).

4. Results

The study assumed that the occupant seated on a fully reclined seatback, and the car conducted a pre-crash (braking maneuver) in 1s at 60 km/h of the initial speed, prior to a collision in 200ms at 56 km/h of the collision velocity. The occupant behavior and kinematics were compared to the case in which the car did not conduct a pre-crash, only a crash at 60 km/h happen in 200ms. According to the simulation of the model VaAM-I and VaAM-O in corresponding, the comparison of the results was present as below.

Time history	0ms	50ms	100ms
VAM-I			
VAM-O			
Remark	OC _{0ms} : head position at 0ms		

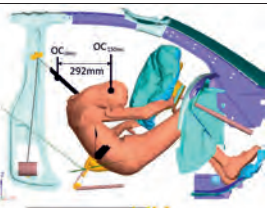
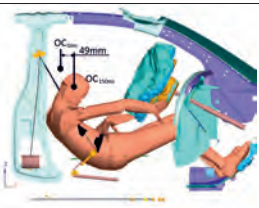
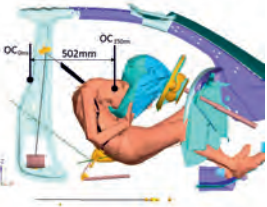
Time history	150s	200ms
VAM-I		
VAM-O		
Remark	OC _{0ms} : head position at 0ms	

Fig. 12: The difference of the occupant posture during the in-crash

Fig. 12 showed the comparison of occupant posture in the lateral view during the time of the in-crash phase. OC0ms indicated for the head COG position at 0ms and other time histories during the in-crash phase. In the case of VaAM-I, the head displacement at 100ms was 508 mm smaller than the head displacement of VaAM-O (642mm). When comparing the maximum displacement of the head, it was 530mm of VaAM-I and VaAM-O was 647mm.

The contact force of the head and the airbag was compared in Fig. 13. The result showed the maximum value of the head contact in VaAM-I was much higher than VaAM-O (2,1kN different value). The forced contact between the body and the seat belt was divided into the shoulder belt and lap belt corresponding to two cases. The shoulder belt contact force almost has no difference among the two cases while the lap belt contact of VaAM-I is higher than the value of the belt contact force of VaAM-O (Fig. 13).

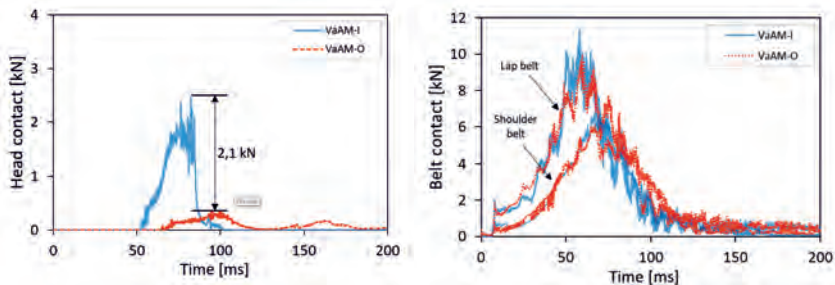


Fig. 13: The contact force of Head and Airbag (a) and contact force of seatbelt and human body (b).

Likewise, VaAM-I showed a similar trend when do a comparison of the lap belt force as seen in Fig. 14. The lap belt force of VaAM-O was lower than the VaAM-I.

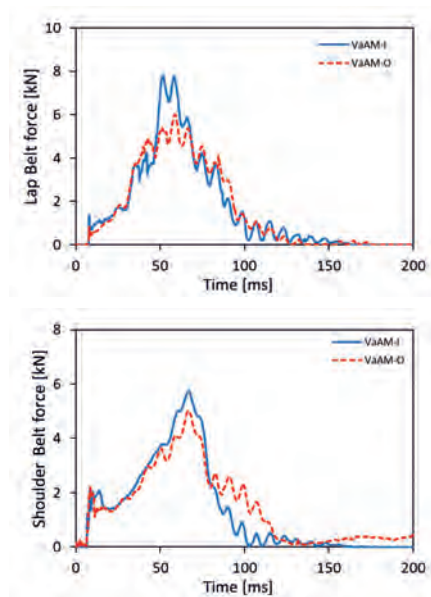


Fig. 14: Seatbelt force: (a) Lap belt force (lap belt anchor, lap belt buckle), and (b) shoulder belt force: shoulder belt D-ring, Shoulder belt Buckle.

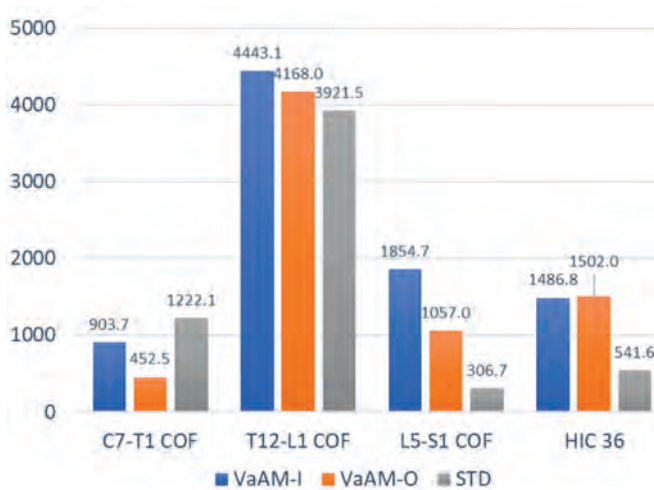


Fig. 15: The comparison of maximum compression force on the spine and injury value HIC 36.

Fig. 15 indicated the comparison result of the joint compression (COF) on the spine of the VaAM-I model, VaAM-O model, and the STD model which simulated the occupant behavior in a crash with a standard posture. They are the joint compression along the spine included the neck joint (C7-T1), the lumbar joint (T12-L1), and the pelvis joint (L5-S1). The HIC 36 was also considered in this matter to understand the influence on head injury. The results of the comparison showed that the pelvis joint, lumbar joint of VaAM-O suffered a smaller compression force than VaAM-I. When looking at the injury value (HIC 36), VaAM-O was 1502, it was higher than 1486 of VaAM-I due to the maximum displacement of the head of VaAM-O was higher than VaAM-I.

5. Discussion

The study results indicated the initial position of the occupant prior to a crash need to be estimated when calculating the occupant kinematics in the case that the seatback reclined fully. The study showed a significant difference in the occupant's posture during the collision. As showing in Fig. 13, the head contact with the airbag in the case of VaAM-I was much higher than VaAM-O due to the head COG moving to the steering wheel closer than VaAM-O. This matter was predicted that might reduce the head injury due to the contact force, but it might

increase the HIC 36 injury value as seen in Fig. 15. In Fig. 14, the lap belt contact force of VaAM-I was higher than that of VaAM-O. This trend can be predicted by the occupant posture. In the case of VaAM-I, the upper torso bent up about 10 degrees more than VaAM-O (Table 1), therefore when the in-crash phase triggered, the lap belt had the trend slipping over the occupant's belly. It was predicted that the lap belt force of VaAM-O was smaller than VaAM-I. In addition, a high compression force was applied to the human spine (Fig. 15). This might lead to more serious injury when the crash happens, and the occupant does not know about the event, and response to the body lately. In this Fig., the study also compared with the standard position in a similar condition. The result of the simulation showed that the compression force suffered on the occupant's spine when the occupant's posture was the upright standard position reduced significantly when comparing it to the compression force in the case that the seatback reclined highly. The study showed that the head moved close to the steering wheel would be more dangerous because the head-airbag contact force would probably increase, also the lumbar spine bent up would be probably suffered more compression force in the lumbar joint. There were some limitations in this study. The kinematics of the occupant was investigated separately with two simulations were made. The first simulation was the braking phase, and the second simulation was the in-crash phase, wherein two-phase happen consecutively, and the deceleration pulse of the in-crash phase was influenced by the deceleration pulse of the braking phase. It would be lower than this case was considered in this study. Two deceleration pulses of this study were taken from two kinds of test cars. The lower legs constraint of the occupant in this study was also not considered because it was not measured during the volunteer test while it was said that impacted significantly on the occupant kinematics in both phases.

6. Conclusion

This study simulated two different initial postures of the human body in a crash with a fully reclining seatback. One posture is the occupant changed the posture during a braking maneuver in 1s under the braking loading pulse of the car, the upper body, the thorax bends up and then the body posed into a crash pulse in 200ms (VaAM-I). The second body posture is that the occupant does not change the posture set on the front seat with the fully reclined seatback until the crash happens in 200ms (VaAM-O). The car model and the occupant setting were developed basing on the volunteer test and previous studies. The result of simulations showed that the occupant response and kinematics were totally different in the 02 initial postures which were assumed in the study.

7. References

- [1] Todd J. Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning, page 1-4, Victoria Transport Policy Institute, Victoria, Canada, 2018.
- [2] Chandrashekhar K. Thorbole, et al. 2015. "DANGERS OF SEATBACK RECLINE IN A MOVING VEHICLE: HOW SEATBACK RECLINE INCREASES THE INJURY SEVERITY AND SHIFTS INJURY PATTERN", proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2015, IMECE2015-51809.
- [3] Kyle B., Jingwen H., Lauren Z., and Matthew P. R. Human Model Occupant Kinematics in Highly Reclined Seats during Frontal Crashes. UMTRI-Biosciences, April 2019.
- [4] Hongnan L., Bronislaw G., Taotao W., Jason L., Matthew B. Effect of Seatback Recline on Occupant Model Response in Frontal Crashes. University of Virginia - Center for Applied Biomechanics, Proceedings IRCOBI, IRC-18-64, 2018.
- [5] Woldrich M. 2010. "Movement in the PRE-Crash situation - A simulation research with a reversible PRE-SAFE® Pulse system" Airbag 2010 conference.
- [6] Singh, H., Ganesan, V., Davies, J., Paramasuwom, M., Gradischnig, L., Wood, P., & Mogal, V. (2018, April). Structural countermeasure/research program: Mass and cost increase due to oblique offset moving deformable barrier impact test (Report No. DOT HS 812 523). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- [7] AHM & ATD Positioning Guidelines v2.0 [www.tassinternational.com].
- [8] Singh, H., Ganesan, V., Davies, J., Paramasuwom, M., Gradischnig, L., Wood, P., & Mogal, V. (2018, April). Structural countermeasure/research program: Mass and cost increase due to oblique offset moving deformable barrier impact test (Report No. DOT HS 812 523). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- [9] MADYMO 7.7 & Workspace 7.7 [<https://tass.plm.automation.siemens.com/new-madymo>].
- [10] Cappon H.J.; Mordaka J.; van Rooij L.; Adamec J.; Praxl N.; Muggenthaler H.(2007) "A computational human model with stabilizing spine: a step towards active safety", SAE paper 2007-01- 1171.
- [11] Nemirovsky, N., Rooij, L. van 2010, "A New Methodology for Biofidelic Head-Neck Postural Control" International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Proc. 21st ESV.

- [12] Rooij, L. van 2011, "Effect of various pre-crash braking strategies on simulated human kinematic response with varying levels of driver attention" International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Proc. 22nd ESV. Paper number 11-0306.
- [13] Behr, M., Poumarat, G., Serre, T., Arnoux, P.J., Thollona, L., Brunet, C., 2010. Posture and Muscular Behaviour in Emergency Braking: An Experimental Approach" Journal of Accident Analysis and Prevention 42 (2010) 797–801.

Integration eines modularen Fahrerverhaltensmodells in das Simulationsframework *openPASS* zur Re-Simulation des Verkehrsunfallgeschehens auf Bundesautobahnen

Dipl.-Ing. **K. Blenz**, Dr.-Ing. **M. Mai**, Prof. Dr.-Ing **G. Prokop**,
Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik der Technischen Universität Dresden

Kurzfassung

Die Automatisierung des Straßenverkehrs, durch stetige Einführung neuer Assistenzsysteme und künftig zunehmend automatisierter Fahrfunktionen, verspricht bezüglich der Fahrzeug- und Verkehrssicherheit enorme Potentiale. Die zu erwartende Veränderung des Verkehrsgeschehens, des Verhaltens in Konfliktsituationen und damit des Verkehrsunfallgeschehens führt zwangsläufig zu neuen Rahmenbedingungen von der Entwicklung bis zur Zulassung. Zunehmend spielen virtuelle Bewertungsmethoden eine entscheidende Rolle, um reale Testumfänge zu reduzieren, retrospektive Bewertung zu vermeiden und relevante Untersuchungsschwerpunkte zu erörtern. Für die prospektive Betrachtung der Wechselwirkung zwischen manuellem Verkehr und automatisierten Fahrfunktionen benötigt es somit performante Simulationstools, die in der Lage sein müssen, in relevanten Bereichen das derzeitige Verkehrs- und Unfallgeschehen darzustellen und somit als virtuelles Testfeld (sog. Baseline) für die Bewertung dienen können.

Ziel dieser Untersuchung ist es, über die Entwicklung eines modularen Fahrerverhaltensmodells im bestehenden Simulationsframework *OpenPASS*, die Grundlage für eine solche Testumgebung zu schaffen, und damit zunächst den gegenwärtig manuellen Verkehr und dessen Unfälle auf Bundesautobahnen (BAB) simulativ zu adressieren. Die Replikation des derzeitigen Verkehrsunfallgeschehens erfolgte über die stochastische Verkehrsflusssimulation in typischen Konstellationen auf BAB. Die Struktur des Fahrerverhaltensmodells wurde anhand bekannter Kognitionsprozesse (Informationsaufnahme, Situationsbewertung, mentales Modell, Handlungsableitung, Handlungsausführung) bei der Fahraufgabe und bestehender Verkehrssimulationsmodelle (z.B. SUMO) adaptiert, um gezielt relevante Unfallursachen und Fahrfehler anzusteuern. Die Varianz der Verkehrsteilnehmer wurde über die stochastische Fahrer- und Fehlerparametrierung gewährleistet. Hierfür sind zweckmäßige Parameter definiert worden, welche über externe Schnittstellen festgelegt werden. Über die hohe Anzahl möglicher Verkehrsteilnehmer und Versuchsdurchführungen bei variierender Fahrer- und der

Situationsparametrierung, wird der in Monte-Carlo-Simulationen angestrebte numerische Lösungsansatz verfolgt. Abschließend wurden die Einflüsse der Fahrer- und Fehlerparameter auf das simulierte Verkehrsgeschehen über verschiedene Parameterstudien erörtert. Die entwickelte Modellierung zeigte sich in der Lage, größere Simulationsumfänge, bei verschiedenen Verkehrskonstellationen, auf geraden Streckenabschnitten auf BAB, darzustellen. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit Verteilungen spezifischer Verkehrsgrößen zeigte Potentiale zur weiteren Optimierung der Verhaltensparametrierung auf. Bei der Variation der Parameter für Fehler in der Informationsaufnahme konnte die makroskopische Unfallhäufigkeit des allgemeinen Unfallgeschehens auf BAB angenähert werden. Die Nachbildung des Verkehrsgeschehens und die Indikation menschlicher Fahrfehler zur Generierung einer Baseline, als zukünftige Bewertungsgrundlage für den Einfluss automatisierter Fahrfunktionen, stellte sich als vielschichtige, aber auch vielversprechende Herausforderung dar, die weiterer Untersuchungen bedarf, zum jetzigen Zeitpunkt jedoch bereits als inkrementelle Weiterentwicklung des Standes der Technik gesehen werden kann. Weiterführend sollten die mit dem Modell provozierten Unfälle auf den mesos- und mikroskopischen Ebenen untersucht und die entwickelten Ersatzmodelle der Fahrfehlerprovokation optimiert werden. Die stetige Weiterentwicklung der modularen Fahrermodellierung stellt somit einen wichtigen Grundpfeiler in der Darstellung einer plausiblen Baseline dar.

1. Einleitung

Mit zunehmender Automatisierung des Straßenverkehrs steigt auch der Bedarf nach Bewertungsmethoden in der Entwicklung, Zulassung und Absicherung. Bei der Betrachtung des Einflusses dieser Funktionen auf das Unfallgeschehen können verschiedenste Ansätze verfolgt werden [1][2]. Diese reichen von der Realerprobung [3] über Fahrsimulatorstudien [4] bis zu simulativen Ansätzen. Aufgrund der sehr großen notwendigen Erprobungsumfänge [5] während der Entwicklung und zur späteren Zulassung ergibt sich ein erheblicher Bedarf nach virtuellen Methoden und Tools vor allem zur prospektiven Bewertung.

Der simulative Ansatz bietet hierfür ebenfalls ein vielfältiges Spektrum an Möglichkeiten. Diese reichen von Re-Simulation konkreter Situationen [6], z.B. beschrieben durch eine pre-crash-matrix (PCM) [7], über szenarienbasierte Simulationen [8], zumeist basierend auf speziellen Szenarienkatalogen [9], bis zu deutlich vielfältigeren Verkehrsflusssimulationen [10]. Hierbei steht der situative Detaillierungsgrad der Quantität der untersuchbaren Situationen gegenüber. So bietet z.B. die Bewertung anhand bekannter Unfalltrajektorien den Vorteil, sehr genau Einflüsse der Systeme auf die konkrete Situation bewerten zu können. Dies gibt jedoch kaum Auskunft darüber, ob die betrachteten Situationen prospektiv noch relevant sind, da hier die

Betrachtung des Einflusses der Systeme auf den Verkehr und auf die Entstehung kritischer Situationen nur schwer möglich ist. Aus diesem Grund wird im weiteren der Bereich der Verkehrsflusssimulation betrachtet. Allen genannten Methoden ist gemein, dass die Bewertung über einen Baseline-Evaluationline-Ansatz erfolgen kann [11], [12], [13]. Hierbei wird innerhalb der Baseline zunächst der Status-Quo der betrachteten Situation, des Szenarios oder des Verkehrs- bzw. Unfallgeschehens reproduziert. Anschließend erfolgt innerhalb der Evaluationline die Integration des zu untersuchenden Systems, dessen Einflüsse der Baseline gegenübergestellt werden können. Bei der Evaluierung der Wirkung auf das Verkehrs- und Verkehrsunfallgeschehen spielt somit die Modellierung der Baseline und damit des manuellen Verkehrs eine elementare Rolle.

Im Bereich der Verkehrssimulation gibt es bereits viele etablierte Tools, die das Fahrerverhalten in verschiedensten Situationen ausreichend adressieren, wie z.B. *SUMO* [14] oder *PTV's Vissim* [15]. Hierbei kommen vielfältige Ansätze bei der Entwicklung von Fahrerverhaltensmodellen [16] zur Anwendung, die vor Allem das sichere Fahrverhalten im Verkehr darstellen sollen. Zur Simulation und Beschreibung kritischer Situationen, wie in [17], und des Verkehrsunfallgeschehens bedarf es jedoch an Modellen, die sowohl in der Lage sind das reale Verkehrsgeschehen abzubilden, als auch Konfliktsituationen und Unfälle zu erzeugen. Somit werden Fahrerverhaltensmodelle benötigt, die den verschiedenen Anforderungen (Detaillierungsgrad, Simulationsperformance etc.) standhalten und dennoch die Varianz der unterschiedlichen Verkehrsteilnehmer und deren menschliche Unzulänglichkeiten abbilden können. Hierfür eignen sich stochastische Simulationsmodelle, die wie in [18] oder [19] über Monte-Carlo-Studien in der Lage sind, ebendies in seiner Vielfalt zu adressieren.

Ziel dieser Untersuchung soll es sein, aus bestehenden Ansätzen ein zweckmäßiges stochastisches Fahrerverhaltensmodell zunächst für Bundesautobahnen zu entwickeln.

2. Modellentwicklung

Für die Entwicklung eines Fahrermodells wird ein geeignetes Framework benötigt, welches grundlegende Funktionalitäten, wie z.B. Schnittstellen zur Verarbeitung der Infrastruktur, bietet. Aufgrund des hohen Bedarfs nach virtuellen Tools zur Bewertung automatisierter Fahrfunktionen wurde 2016 die *openPASS* Working-Group (WG) gegründet, mit dem Ziel, eine Softwareplattform bereitzustellen, die die Simulation verschiedenster Verkehrssituationen ermöglicht, um die Effektivität von ADAS- und AD-Funktionen in der Praxis vorherzusagen. Die *openPASS* WG koordiniert die Entwicklung des open-source Projektes *sim@openpass* [20] innerhalb der Eclipse Foundation, und strebt derzeit das Release v0.8 an.

openPASS

Die Plattform *openPASS* verfügt über einen modularen Aufbau. Über den Simulationskern können verschiedene Simulationsläufe gestartet werden, in denen Szenarien und Agentenkomponenten über standardisierte Schnittstellen wie *OpenSCENARIO* [21], *OpenDRIVE* [22], *Open Simulation Interface* (kurz: *OSI*) [23] und *Functional Mock-Up Interface* (kurz: *FMI*) [24] mit dem Kern verbunden werden. Aufbauend auf einfachen Beispielen für Szenarien und Agenten-Komponenten, können anwenderspezifische Szenarien und Agentenkomponenten frei an den Simulationskern angebunden werden. Die Komponenten können vom Benutzer je nach Anwendungsbereich frei gewählt und zusammengestellt werden und bilden ein System. Der typische Systemaufbau sollte aus einem Sensor, der die Umgebung wahrnimmt, einem Algorithmus, der diese Umgebung analysiert und Entscheidungen trifft, und einem Dynamik-Modul, das die eigentliche physikalische Dynamik des Agenten berechnet. Es gibt ebenfalls die Option verschiedene Agententypen mit unterschiedlichen Systemkonfigurationen in einer Simulation zu kombinieren, bei allen Möglichkeiten zur stochastischen Variation von Szenarien und deren Parametern.

Das im Rahmen dieser Untersuchung entwickelte Modell soll in der Lage sein menschliches Fahr- und Fehlverhalten im Straßenverkehr auf Bundesautobahnen (BAB) zu adressieren. Die aktuell exemplarisch vorliegenden Komponenten bilden hierfür eine gute Basis. So stehen im Beispielanwendungsfall *Traffic-Simulation* bereits Sensor-, Algorithmus- und Dynamik-Module zur Verfügung, mit denen eine Autobahnsimulation generell möglich ist. Das Algorithmus-Modul *AlgorithmAFDM* entspricht jedoch lediglich einem Fahrzeugfolgemodell, welches als Berechnungsgrundlage zu Beschleunigungsvorgabe das Längsverhalten aus dem *Intelligent Driver Model (IDM)* [25] verwendet und dem Dynamik-Modul eine Querregelung entlang der Fahrstreifenmitte vorgibt. Das Ziel dieser Untersuchung ist jedoch ein Verkehrsflussmodell auf BAB zur Bewertung des Verkehrsunfallgeschehens zu generieren, weshalb vor Allem das eigenständige Fahrstreifenwechselverhalten im Verkehrsfluss von wesentlicher Bedeutung ist. Zusätzlich werden Schnittstellen benötigt, um einfache Fehlergrößen des Fahrverhaltens an gezielten Stellen innerhalb des Kognitionsprozesses zu implementieren. Im Folgenden wird diese Entwicklung als *Modular-Driver* bezeichnet. Diese wurde z.B. im Projekt *OSCCAR* [26] angewandt und ist derzeit unter dem Branch *hlrs* im *openPASS* Projekt zu finden.

Modular-Driver

Die Entwicklung des *Modular-Driver* basiert somit auf den bestehenden konzeptionellen Rahmenbedingungen, die das Framework *openPASS* zur Verfügung stellt und orientiert sich ähnlich zur dort definierten Systemstruktur am menschlichen Kognitionsprozess. Diese Entwicklung ist angelehnt an vergleichbaren modularen Ansätzen [27], [28], [29], soll jedoch in vielen Teilen durch starke Vereinfachungen einen Mittelweg zwischen hohem möglichen Detaillierungsgrad einzelner Kognitionsprozessmodelle und der oftmals fehlenden Datengrundlage zur Parametrierung bilden. Die grundlegende Struktur des *Modular-Driver* ist in Bild 2.1 dargestellt.

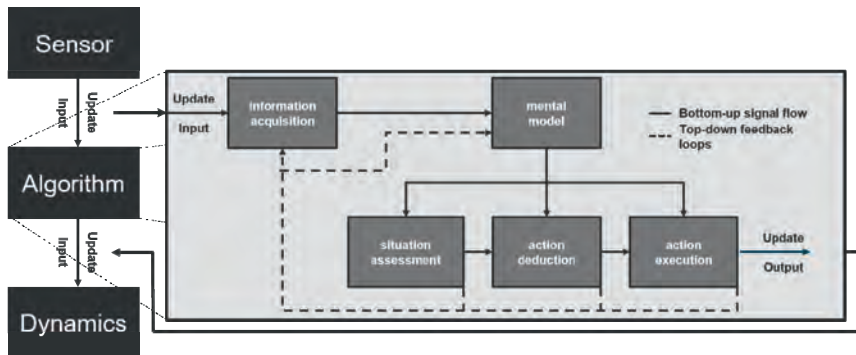


Bild 2.1: Aufbau des *Modular-Driver*

Der Sensor übernimmt die Aufnahme von relevanten Objekten und Informationen im Umfeld. Im Modul *information acquisition* erfolgt die Einordnung der Objekte in das Sichtfeld, welches durch Blickbewegung verändert werden kann. Somit werden an das Modul *mental model* nur Informationen übergeben, die auch gesehen wurden. Dieses beschreibt die mentale Repräsentation der Umwelt, die aus den wahrgenommenen Informationen aufgebaut wird. Das Modul beinhaltet Mechanismen der mentalen Extrapolation, sobald eine direkte Informationsaufnahme unterbrochen wird und Mechanismen des Vergessens. Wichtig ist an dieser Stelle festzuhalten, dass sämtliche kognitiven Leistungen des Menschen im Verkehr nur auf Basis dieses Umweltmodells erfolgen können, das u.U. fehlerhaft sein kann, was eine Ursache für Verkehrskonflikte und -unfälle darstellt. Das Modul *situation assessment* stellt das erste Modul kognitiver Leistungen entlang des Informationsflusses innerhalb des *Modular-Driver* dar. Die Aufgabe des Moduls besteht in der Bewertung der gegenwärtigen und auch der sich daraus entwickelnden Verkehrssituation. Das Ausgangssignal des Moduls besteht in der Beschrei-

bung eines Situationsmusters, z.B. „neues Führungsfahrzeug“, „neue Wunschgeschwindigkeit“ bzw. „neues Tempolimit“. Das Modul *action deduction* hat nun die Aufgabe, die eigenen Handlungen abzuleiten. Für die Fahraufgabe ergeben sich daraus Soll-Größen der Längs- und Querdynamik, welche in der anschließenden Handlungsausführung (*action execution*) in z.B. Gas- bzw. Bremspedalstellung oder Lenkradwinkel übersetzt werden. Mit diesen Größen erfolgt im gewählten Fahrzeugdynamikmodell die Berechnung der eigentlichen Fahrzeugbewegung.

Das geforderte Spurwechsel- und Abstandsverhalten der jeweiligen Agenten lässt sich im Modul *action deduction* einordnen, welches in dieser Untersuchung den wesentlichen Teil der Entscheidungslogik des Fahrers übernimmt. Da eine aufwändige Entwicklung eines eigenen Spurwechselalgorithmus zunächst ausgeschlossen wurde, soll im weiteren Verlauf auf Modelle der bewährten Verkehrssimulationsumgebung SUMO (*Simulation of Urban MObility*) [14] zurückgegriffen werden. Da diese als open-source Entwicklung vorliegt, können die benötigten und in [30]-[31] ausreichend dokumentierten Methoden zur Entscheidungsfindung in die *openPASS* Umgebung portiert werden. Da sich der generelle Programmablauf und das Zusammenspiel der Agenten untereinander und mit der Infrastruktur zwischen *openPASS* und SUMO deutlich voneinander unterscheiden, müssen bei der Portierung teilweise umfassende Anpassungen vorgenommen werden. Die in [31] beschriebenen Spurwechselintentionen sind somit auf deren wesentliche Inhalte zu reduzieren, da z.B. strategische Spurwechsel aufgrund der gewählten Route in der verwendeten *openPASS* Version (v0.6) noch nicht möglich sind. Für die benötigte Funktionalität auf BAB lassen sich die Bereiche der „taktischen“ (z.B. Überholen aufgrund höherer Wunschgeschwindigkeit), „regulatorischen“ (z.B. Rechtsfahrgebot) und „kooperativen“ (z.B. Geschwindigkeitsanpassung bei Fahrstreifenende) Spurwechsel als relevant einordnen. Hierbei ist jedoch zu erwarten, dass sich die Einflüsse der einzelnen SUMO-Spurwechselparameter deutlich von der ursprünglichen Anwendung unterscheiden und weiterer Untersuchung bedürfen.

Parametrierung

Die Simulation plausibler Verkehrsunfälle innerhalb einer Verkehrsflusssimulation birgt Herausforderungen auf mehreren Ebenen. So sollen durch die Entwicklung des modularen Fahrerhaltensmodells vor Allem menschliche Schwächen im Verkehrsgeschehen gezielt angesprochen werden, jedoch ist außerhalb dieser Funktionalität zunächst eine realistische unfallfreie Verkehrssimulation von entscheidender Bedeutung. So macht die Betrachtung von Veränderungen im Verkehrsunfallgeschehen durch automatisierte Fahrfunktionen durch stochastische Verkehrsflusssimulationen nur Sinn, wenn auch die Einflüsse der Funktionen

auf einen plausiblen Verkehr und auf das Auftreten kritischer Situationen hinreichend gut abgebildet werden können. Aus diesem Grund wird die Parametrierung des Modells in die Bereiche Verkehrssimulation und Unfallsimulation unterteilt. Hierbei ist unter der Parametrierung zunächst die Definition geeigneter Parameter innerhalb d Simulationsmodelle und anschließend die Festlegung konkreter Werte zu verstehen.

Parameterdefinition

Über die Portierung der Module aus *SUMO* und die Modularisierung des Fahrermodells ergeben sich Fahrerparameter zur Verkehrssimulation und dazugehörige plausible Variationsbereiche und deren stochastische Verteilungsform. Zusätzlich können unterschiedliche Fahrertypen erstellt werden, die ggf. verschiedene Fahrzeugtypen bewegen. Die Verkehrsparametrierung kann somit in unterschiedliche Bereiche untergliedert werden, die im Folgenden mit Beispielen beschrieben werden:

- Fahrerparameter:
 - Wunschgeschwindigkeit, Wunsch-Zeitlücke, Komfortbeschleunigungen
 - *SUMO*-Parameter: *SpeedGain*, *KeepRight*, *Cooperative*
- Fahrzeugparameter:
 - Maximale Geschwindigkeit, Maximale Beschleunigungen
 - Fahrzeugabmessungen
- Verkehrsparameter:
 - Fzg./h je Fahrstreifen, Verhältnisse Fahrertypen und Fahrzeugtypen
- Infrastruktur:
 - Beschreibung im *OpenDRIVE*-Format: Anzahl Fahrstreifen, Tempolimit

Zur Verkehrsunfallsimulation werden anschließend Fehlerparameter und –schnittstellen benötigt, da als häufigste Unfallursache noch immer der Mensch auszumachen ist [32]. Wie bereits erwähnt, sind der Detaillierung einzelner Kognitionsprozesse keine Grenzen gesetzt. So ist es, wie beschrieben in [33], durchaus möglich höhere Kognitionsprozesse zu adressieren. Damit einher gehen jedoch auch sehr umfassende Parametrierungs- und Validierungsprobleme und nicht zuletzt eine Verminderung der Recheneffizienz. Die in [34] klassifizierten Fahrfehler sollen deshalb durch vereinfachte Ersatzmodelle erzeugt werden.

Für den Bereich der Informationsfehler wird im *Modular-Driver* ein Blickabwendungsmodell integriert. Dieses wird in Bild 2.2 prinzipiell verdeutlicht. Die Informationsaufnahme im Modul *information acquisition* unterteilt sich abwechseln in die Bereiche Blickzuwendung (*ViewTime*) und Blickabwendung (*AvertViewTime*), die über die entsprechenden Parameter und deren Verteilungen definiert werden. Die Blickzuwendung ist zusätzlich unterteilt in einen Zeitbereich

mit Blick in Fahrtrichtung und dem Blick entgegen der Fahrtrichtung, was einen Blick in den Rückspiegel symbolisieren soll.

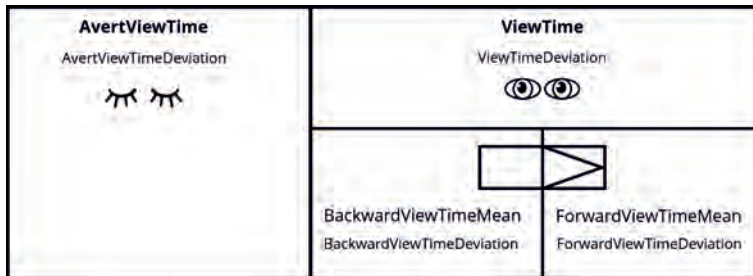


Bild 2.2: Blickabwendungsmodell im *Modular-Driver*

Während einer Blickabwendung werden die zuvor aufgenommenen Agenten im *mental model* in deren Bewegung extrapoliert und nur weiterhin gesehene aktualisiert. Alle Entscheidungsprozesse in den weiteren Modulen werden auf Basis dieser Informationen abgeleitet. Durch die kinematische Extrapolation ist anzunehmen, dass sich der Verkehr in strukturell unkritischen Situationen nicht bzw. kaum verändert. Zusätzlich zum Blickabwendungsmodell wird in den *Modular-Driver* ein vereinfachtes Reaktionszeitmodell implementiert, welches im Modul *situation-assessment* die verzögerte Reaktion auf z.B. ein neues Führungsfahrzeug darstellt.

Parametrierung der Verkehrssimulation

Zur Festlegung konkreter Parameterwerte für die Verkehrssimulation wurde das *highD*-Dataset [35] verwendet, welches aus natürlichen Fahrzeugtrajektorien besteht, die durch Drohnenaufzeichnungen auf deutschen Autobahnen und deren anschließender Verarbeitung generiert wurden. Der Datensatz enthält 110 500 Fahrzeuge mit insgesamt 44 500 gefahrenen Kilometern bei 147 Stunden Fahrtzeit. Die Aufzeichnungen wurden an 6 verschiedenen Orten durchgeführt und stellen hiermit ein breites Spektrum unterschiedlicher Verkehrskonstellationen dar. Für die Parametrierung wird ein manueller Ansatz verfolgt, um zunächst die generelle Lauffähigkeit der Simulation und des entwickelten Modells darzustellen. Hierfür wurden aus den Fahrzeugtrajektorien der einzelnen Fahrzeugtypen (hier Lkw und Pkw) aus *highD* Verteilungen erzeugt und einer Verteilungsart zugeordnet. So kann z.B. anhand des Verlaufs der Geschwindigkeitsverteilung eine logarithmische Normalverteilung für die Wunschgeschwindigkeit mit einem Mittelwert und einer Standardabweichung abgeschätzt werden. Hierbei muss jedoch auch die Überlagerung der Wunschgeschwindigkeiten mit den Fahrstreifentendenzen, den dort

möglichen Geschwindigkeiten und dem Folgeverhalten beachtet werden. Damit sollten zunächst die unterschiedlichen Parameter, vor Allem aus dem Spurwechselmodell, in deren Einfluss auf die Simulationsergebnisse ergründet werden. Hierfür wurden einzelne Parametereinflussstudien durchgeführt, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll. Anschließend erfolgten die manuelle Grund-Parametrierung der Simulation und die Festlegung plausibler Bereiche für den Anwender. Diese sind in der open-source Umgebung dokumentiert. Aufgrund der geringen Rechenzeiten der stochastischen Verkehrssimulation bei großen Simulationsumfängen wäre eine schrittweise verfeinerte Parametrierung des Verkehrs und damit des Fahrerhaltens über beispielsweise numerische Optimierungsverfahren an diese Daten denkbar.

Innerhalb des *highD* Datensatzes ist bereits eine enorme Vielfalt an möglichen Kombinationen aus Infrastruktur, Verkehrszusammensetzung und -stärke erkennbar, die bei zielgerichteter Parametrierung ggf. zu deutlich unterschiedlichen Parameterwerten führen kann. So ist, trotz der genannten Vorteile eines Verkehrsflusssimulationsansatzes, die Abdeckung aller möglichen Konstellationen, in der richtigen Proportion untereinander, innerhalb einer Gesamtsimulation nicht sinnvoll. Aus diesem Grund sollte die Verkehrsflusssimulation als Erweiterung zur Simulation konkreter Szenarien verstanden werden und somit ebenfalls in einzelne Verkehrsszenarien unterteilt werden.

Parametrierung der Unfallsimulation

Für die Betrachtung des Unfallgeschehens auf BAB im reinen Verkehrsfluss ergibt sich somit der Bedarf nach relevanten Verkehrskonstellationen zur Re-Simulation, ohne bereits konkrete Konfliktsituationen zu provozieren. Unter Verkehrskonstellationen wird in dieser Arbeit vor Allem die Komposition aus verschiedenen Fahrer- und Fahrzeugtypen, Verkehrsstärken, Tempolimits und Fahrstreifenmengen verstanden.

Zur Abschätzung relevanter Verkehrskonstellationen werden geeignete Bewertungskriterien des Verkehrsunfallgeschehens benötigt. Dafür sind entsprechende Daten der Schlüssel, die zumeist nicht in der benötigten Form vorliegen oder nicht direkt zugreifbar sind. Hierfür eignet sich der Ansatz einer Datenfusion, wie auch beschrieben in [36]. Unter dieser Prämisse soll im Folgenden eine Kombination aus öffentlich zugänglichen Quellen zur Schaffung einer Bewertungsgröße des Unfallgeschehens auf BAB für die Simulation durchgeführt werden. Auf Basis des Ansatzes der Datenanalyse aus [37] wurden die Unfälle mit Personenschaden aus dem Unfallatlas aus den Jahren 2016, 2017 und 2018 [38] mit Kartendaten aus *OpenStreetMap* (kurz: *OSM*) [39] und Informationen aus den automatischen Zählstellen auf Autobahnen

der Bundesanstalt für Straßenwesen (kurz: *BAST*) [40] aus denselben Jahren kombiniert. Der Prozess dieser Datenfusion wird in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1: Datenfusion *Unfallatlas+*

1	Auswahl aller Unfälle im Unfallatlas (mit Personenschaden)
2	Auswahl von OSM-Straßen vom key „highway“ und value „motorway“
3	Verknüpfung der Unfall-Positionen mit den OSM-Straßen
4	Auswahl von Unfällen auf BAB
5	Verknüpfung der Unfälle mit dem Abstand zur nächstgelegenen Auffahrt
6	Verknüpfung der Unfälle mit dem Tempolimit / Anzahl d. Fahrstreifen aus OSM
7	Verknüpfung der Unfall-Position und des Unfall-Zeitpunkts mit nächstgelegener <i>BAST</i> -Zählstelle und der entsprechenden Fahrtrichtung

Damit erhalten die Unfälle des Unfallatlas zusätzlich zu den dort enthaltenen Informationen die Auswahlkategorien „Anzahl der Fahrstreifen“, „Tempolimit“, „Verkehrsstärke“ (Lkw/h, Pkw/h, Fzg./h in der Unfallstunde) und ggf. „Abstand zur nächsten Auf-/Abfahrt“. Dies kann zur Auswahl relevanter Bereiche für die Verkehrsflusssimulation dienen. Da jedoch z.B. die verfügbare Gesamtstrecke ohne Tempolimit auf BAB einen großen Anteil einnimmt, ist diese absolute Zahl der Unfälle in deren Gewichtung verzerrt. Aus den verknüpften Datenquellen können nun auch Informationen über die Streckenlängen der Autobahnabschnitte der jeweilig gefilterten Kombination gewonnen werden. Somit lässt sich die Unfallhäufigkeit pro Streckenlänge für die gewählte Kombination ermitteln und dient ebenfalls der Vorauswahl für die Simulation. Als dritte Auswahlgröße wird eine Kombination der jeweiligen Streckenkilometer und der gefahrenen Kilometer vorgenommen. Durch die Verknüpfung der Dauerzählstellen mit den Streckenabschnitten, konnten die jährlich gefahrenen Kilometer der Verkehrsteilnehmer für jede gewählte Kombination der Auswahlkategorien errechnet werden.

Somit lassen sich zu jeder Kombination der Auswahlkategorien die absoluten und relativen Häufigkeiten „Anzahl der Unfälle“, „Unfälle pro Streckenkilometer“ und „Unfälle pro Mio. gefahrene km“ des Unfallgeschehens auf BAB bilden.

Mit diesen neuen Größen lässt sich ein vielfältiger Überblick über das Unfallgeschehen auf BAB erstellen, welcher sich zur Vorauswahl relevanter Konstellationen für die Simulation eignet. In Bild 2.3 ist die Unfallhäufigkeit über die Verkehrsstärke PLZ/h (Pkw, Lieferwagen und Zweiräder pro Stunde, gerundet auf 250) dargestellt. Hieraus können exemplarisch einige

Kenngrößen für die Verkehrsflusssimulation abgeleitet werden, welche jedoch auch viel Spielraum für Interpretation lassen. So ist die Verteilung der Unfälle im Bereich von 0-2500 PLZ/h deutlich höher als in Bereichen stärkeren Verkehrs. Etwa 30-40 % der Unfälle treten in der Nähe (max. Abstand = 200 m) von Autobahnauf- bzw. Abfahrten auf, weshalb eine separate Betrachtung sinnvoll ist.

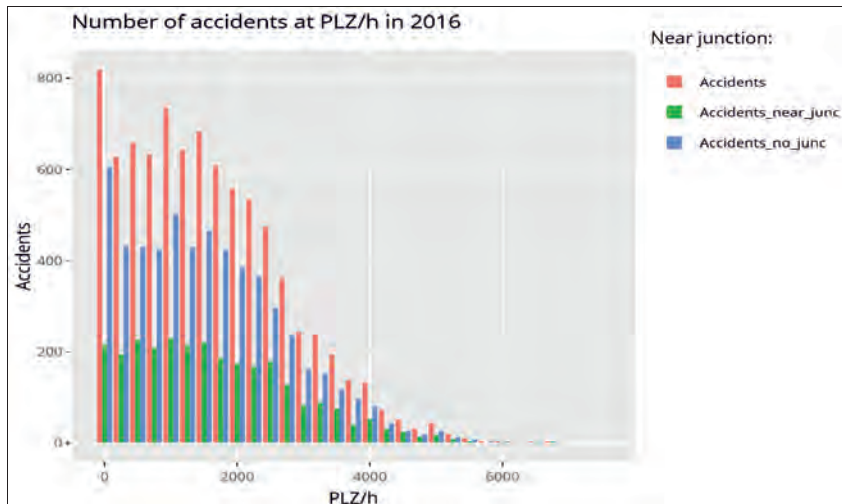


Bild 2.3: Unfälle auf Autobahnen in 2016 in Abhängigkeit von PLZ/h in der Unfallstunde

Im weiteren Verlauf werden somit nur Unfälle ohne äußere Indikationen betrachtet.

Für die Simulation ist die Kombination der Auswahlkategorien *Anzahl der Fahrstreifen*, *Tempolimit* und *Verkehrsstärke* von Interesse. Aus deren Aggregation können mehrere relevante Konstellationen ausgewählt werden, die jedoch untereinander einer Wichtung unterzogen werden müssen.

So sind nach dieser Auswertung z.B. 2016 absolut die meisten Unfälle auf zweispurigen Autobahnen, ohne Tempolimit bei einer Verkehrsstärke von 750 Fzg./h vorgefallen. In dieser Konstellation kam es jedoch nur zu etwa 0.13 Unfällen je einer Mio. gefahrener Kilometer. Vergleicht man dies mit dem Maximalwert der Kategorie Unfälle je Mio. gefahrene km, kann es bei der Auswahl von relevanten Konstellationen schnell zu einer Übergewichtung kommen, wenn die aus OSM erhaltenen Strecken-km der jeweiligen Kategorie z.B. überproportional klein ausfallen. In Tabelle 2.2 wird dieser Sachverhalt noch einmal verdeutlicht.

Tabelle 2.2: Vergleich des absoluten und relativen Unfallhäufigkeitsmaximums

KFZ/h	Fahrstreifen	Tempolimit	Unfälle	Unfälle je mio. gefahrene km
750	2	ohne	263	0.1260
4000	4	120	13	1.0172

Aus diesem Grund erfolgte die Einschätzung weiterer relevanter Konstellationen auf Basis von Expertenwissen und der aggregierten Informationen.

3. Plausibilisierung

Die vielfältigen Aspekte bei der Implementierung des Fahrermodells und dessen Parametrierung führen zu ebenso umfangreichen Fragestellungen beim Nachweis der Realitätstreue der Simulation und damit dem Bereitstellen einer plausiblen Baseline für die Bewertung automatisierter Fahrfunktionen und Fahrzeuge. Für die Verkehrsflusssimulation muss dies in mehreren Stufen durchgeführt werden. Aus den Entwicklungen innerhalb dieser Arbeit ergibt sich, dass dies ein iterativer Prozess ist, welcher bei der stetigen Weiterentwicklung des verwendeten Frameworks und des Fahrerverhaltensmodells noch nicht absehbar zu einem Ende kommen kann. Aus diesem Grund wird im Folgenden auch nicht von einer Validierung des Simulationsmodells gesprochen, sondern vielmehr von einer Plausibilisierung, sprich einem Nachweis der generellen Funktionalität und der möglichen Tendenz absehbar als Baselinesimulation dienen zu können, weshalb kein Bezug zu konkreten Parameterwerten erfolgen sollte.

Verkehrssimulation

Das für die Parametrierung verwendete *highD*-Dataset eignet sich ebenfalls sehr gut für die Plausibilisierung der Verkehrssimulation. Nach dem iterativen Prozess der Findung sinnvoller Parameterbereiche und Verteilungsformen wurde nun ein Bewertungsprozess der Realitätstreue der Verkehrssimulation im Ganzen angefügt. Dafür wurden die Situationsparameter automatisiert an die jeweilige *highD*-Messung angepasst und anschließend die Simulationsergebnisse vorverarbeitet. Hierfür wurde ein Abschnitt analog zum Messbereich der *highD*-Messung definiert. Die Auswertung erfolgte nun zweistufig.

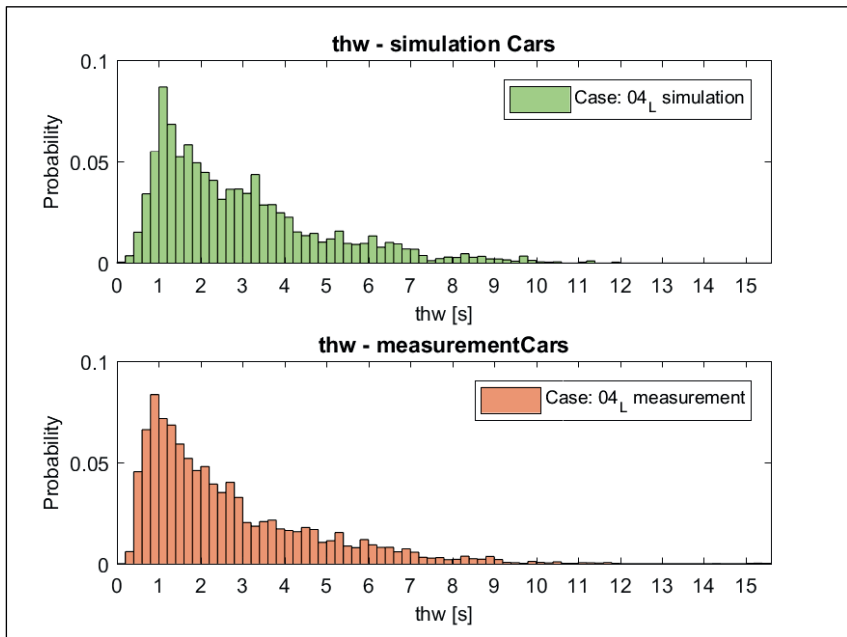


Bild 3.1: Vergleich der *time-headway*-Verteilung zwischen Simulation (oben) und einer *highD* Messung (unten)

Zum einen wurden für Größen wie *dhw*, *thw* (siehe Bild 3.1), *ttc*, *xAcceleration*, *xVelocity* und *laneld* Histogramme erzeugt, welche, aufgeteilt nach den Klassen Pkw und Lkw, die Unterschiede der Häufigkeitsverteilungen im Messabschnitt zwischen Messung und Simulation darstellen. Anschließend wurde für den Vergleich auf eine automatisierte Auswertung mithilfe statistischer Testverfahren zurückgegriffen. Da die untersuchten Größen in der Regel nicht als normalverteilt angenommen werden können, sollten für die Überprüfung des stochastischen Modellverhaltens zunächst mit dem Mann-Whitney-U-Test und dem Levene-Test zwei verteilungsfreie Test-Verfahren angewendet werden. Die notwendigen Grundlagen in diesem Anwendungskontext können der Arbeit nach [41] entnommen werden.

Zusätzlich wurden zum groben Vergleich die Mittelwerte und Standardabweichungen der Verteilungen gegenübergestellt. Die Auswertung aller Vergleichsgrößen lieferte folgende Ergebnisse:

- Die Verteilungsformen der jeweils zwei Stichproben nahezu aller Vergleichsgrößen sind in deren zentralen Tendenzen signifikant unterschiedlich
- Die Durchführung des Levene-Tests weist einen signifikanten Unterschied in den Variabilitäten der jeweils beiden Stichproben nach
- Die Darstellung von *xVelocity*, *dhw*, *thw*, und *laneId* ist deutlich besser
- Vereinzelt ist eine sehr gute Replikation einzelner Messgrößen eines Messvergleichs möglich, eine Parameteroptimierung für die Darstellung einer Messung ist möglich
- Die Parametrierung der PKW liefert bessere Ergebnisse, als die der LKW
- Die Größen *xAcceleration* und *ttc* liefern noch unzureichende Ergebnisse

Mit der festgelegten Parametrierung lassen sich somit vereinzelt die *highD*-Messungen in gewissen Bereichen nachbilden, womit eine gezielte Anpassung der Parameter für bestimmte Verkehrskonstellationen angestrebt werden sollte.

Unfallsimulation

Bei der Plausibilisierung der Unfallsimulation konnte nun der Einfluss der Fahrfehlerparameter auf das Verkehrsverhalten evaluiert werden. Die Datenfusion aus dem Abschnitt der Parametrierung ergab sich hier als sehr probates Mittel, um die Ergebnisse der Simulation entsprechend einzuordnen. So können sonst in der Simulation entstandene Unfälle nur schwer in deren tatsächlicher Häufigkeit mit der Realität verglichen werden. Es stellt sich die Frage, wie viele Unfälle bei einer definierten Simulationsdauer zu erwarten sind. Der in der Datenfusion errechnete Wert für die *Unfälle je Mio. gefahrene km* stellt hier eine geeignete Vergleichsgröße dar.

Für die Dauerlaufsimulationen in den gewählten Konstellationen wurde in dieser Untersuchung als Fehlerparameter nur der Wert der Blickabwendungszeit (*AvertViewTime*) mit 1000 ms parametrisiert. Diesen Parameter erhielten jeweils 50% der Pkw- und Lkw-Fahrertypen, bei einem Verhältnis von 9 zu 1 zwischen Pkw und Lkw. Die Ergebnisse der einzelnen gewählten relevanten Dauerlaufsimulationsstudien liegen zwischen 0 und ca. 4 Unfällen je einer Mio. gefahrener Kilometer. Zieht man in Betracht, dass der verwendete Unfallatlas nur Unfälle mit Personenschaden beinhaltet, bewegt man sich mit diesen Ergebnissen bereits in einem plausiblen Bereich des Verkehrsunfallgeschehens.

4. Diskussion

Die betrachtete Implementierung eines Fahrerverhaltensmodells in die bestehende Simulationsumgebung *openPASS* lieferte Erkenntnisse in den Bereichen der Fahrerverhaltensmodellierung und der Bewertung derer Einflüsse auf die Verkehrs- und Verkehrsunfallsimulation. Zur

Generierung einer validen Baseline zur Bewertung automatisierter Fahrfunktionen über den Ansatz der Verkehrsflusssimulation sind zunächst jedoch einige Hürden zu überwinden. Die Implementierung bestehender Modelle zu Abstands- und Spurwechselerhalten hat sich nur bedingt bewährt, da wesentliche Verhaltensweisen nicht vollends übertragbar waren und Einflüsse dieser nicht vollständig ergründet werden konnten. Deshalb wird derzeit bereits im Rahmen der open-source Umgebung *openPASS* an einer eigens dafür angepassten modularen Abstands- und Spurwechselmodellierung gearbeitet. Im Bereich der Verkehrssimulation war es möglich, sich iterativ an Realdaten anzunähern. Im Zusammenspiel mit der stetigen Weiterentwicklung der Modelle ist die Plausibilität jedoch weiterhin stets nachzuweisen.

Die Indikation einfacher Fahrfehler konnte erste Verkehrsunfälle in umfangreicheren Simulationsstudien provozieren, die den makroskopischen Unfallhäufigkeiten entsprechen. Da es sich hierbei um stark vereinfachte Modelle handelt, sollten in den nächsten Schritten die entstandenen Unfälle z.B. in Form von virtuellen Unfallstatistiken mit dem realen Unfallgeschehen verglichen werden. Hierfür eignet sich eine virtuelle Unfallcodierung. Mit diesen Erkenntnissen kann eine schrittweise Erweiterung gezielter Fahrfehlerfunktionalitäten erfolgen.

Die Entwicklung einer validen Baseline durch Simulation des aktuellen Verkehrs- und Verkehrsunfallgeschehens muss als langwieriger Prozess verstanden werden, auf dessen Weg nur bedingt auf bestehende Methoden zurückgegriffen werden kann. Auch wenn die Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen recht schnell voranschreitet, haben die Tools zur Bewertung und Absicherung dieser weiterhin einen enormen Entwicklungsbedarf.

5. Danksagung

Die Entwicklungen und Untersuchungen innerhalb dieser Arbeit entstanden überwiegend innerhalb des Projektes *KAUSAL* (Auswirkung autonomes Fahren auf RHS-Gestaltung) [42] unter dem Dach der Kooperationsplattform *Tech Center i-protect* in Zusammenarbeit mit der *Mercedes-Benz AG (MB)* und der *Robert Bosch GmbH (RB)* und basieren auf intensiven Abstimmungen mit Experten aus der Unfallforschung, Jan Dobberstein und Per Lewerenz (beide *MB*) und Dr. Daniel Schmidt und Thomas Lich (beide *RB*).

6. Literaturangaben

- [1] Batsch, F., Kanarachos, S., Cheah, M., Ponticelli, R., and Blundell, M., A taxonomy of validation strategies to ensure the safe operation of highly automated vehicles, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 0, no. 0, pp. 1–20, 2020
- [2] Riedmaier, S., Ponn, T., Ludwig, D., Schick, B., and Diermeyer, F., Survey on Scenario-Based Safety Assessment of Automated Vehicles, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 87456–87477, 2020
- [3] Rinnert, T. and Prokop, G., Automatisierter Realfahrversuch Hauptbestandteil zur Bewertung aktiver Sicherheitssysteme, *ATZelextronik*, vol. 13, no. 3, pp. 46–51, 2018
- [4] Tüschen, T., Konzeptionierung eines hochimmersiven und selbstfahrenden Fahrsimulators - Band 9 der LKT Schriftenreihe. Dissertation TU Dresden, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2018.
- [5] Wachenfeld, W. and Winner, H., Die Freigabe des autonomen Fahrens, in *Autonomes Fahren*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, pp. 439–464.
- [6] Sander, U., Lubbe, N., and Pietzsch, S., Intersection AEB implementation strategies for left turn across path crashes, *Traffic Injury Prevention*, vol. 20, no. sup1, pp. S119–S125, 2019
- [7] Schubert, A., Liers, H., and Petzold, M., The GIDAS pre-crash-matrix 2016 : Innovations for standardized pre-crash-scenarios on the basis of the VUFO simulation model VAST, 2017.
- [8] de Gelder, E. and Paardekoooper, J.-P. P., Assessment of Automated Driving Systems using real-life scenarios, in *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Jun. 2017, no. Iv, pp. 589–594.
- [9] Watanabe, H., Prokop, G., Wallner, J., and Malý, T., Erstellung eines Szenarienkatalogs für die Entwicklung prädiktiver Sicherheitsfunktionen, *ATZextra*, vol. 25, no. 1, pp. 34–37, 2020
- [10] Kober, C., Stochastische Verkehrsflusssimulation auf Basis von Fahrerverhaltensmodellen zur Absicherung automatisierter Fahrfunktionen. Springer Vieweg, 2018.
- [11] Papadoulis, A., Quddus, M., and Imprialou, M., Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways, *Accident Analysis and Prevention*, vol. 124, no. September 2018, pp. 12–22, 2019
- [12] Sander, U. and Lubbe, N., Market penetration of intersection AEB: Characterizing avoided and residual straight crossing path accidents, *Accident Analysis and Prevention*, vol. 115, no. March, pp. 178–188, 2018

- [13] Kitajima, S., Shimono, K., Tajima, J., Antona-Makoshi, J., and Uchida, N., Multi-agent traffic simulations to estimate the impact of automated technologies on safety, *Traffic Injury Prevention*, vol. 20, no. sup1, pp. S58–S64, 2019
- [14] Lopez, P. A. *et al.*, Microscopic Traffic Simulation using SUMO, in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2018, pp. 2575–2582.
- [15] Fellendorf, M. and Vortisch, P., Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM BT - Fundamentals of Traffic Simulation, Barceló, J., Ed. New York, NY: Springer New York, 2010, pp. 63–93.
- [16] Babojelić, K. and Novačko, L., Modelling of driver and pedestrian behaviour – a historical review, *Promet - Traffic - Traffico*, vol. 32, no. 5, pp. 727–745, 2020
- [17] Lehmann, M., Bäuml, M., Prokop, G., and Hamelow, D., Use of a criticality metric for assessment of critical traffic situations as part of SePIA, in *19. Internationale Stuttgarter Symposium*, 2019, pp. 1154–1167.
- [18] Danquah, B., Riedmaier, S., Rühm, J., Kalt, S., and Lienkamp, M., Statistical Model Verification and Validation Concept in Automotive Vehicle Design, *Procedia CIRP*, vol. 91, pp. 261–270, 2020
- [19] Zhao, D. *et al.*, Accelerated Evaluation of Automated Vehicles Safety in Lane-Change Scenarios Based on Importance Sampling Techniques, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 595–607, 2017
- [20] openPass Working Group, OpenPASS. 2021.
- [21] ASAM, ASAM OpenSCENARIO, 2021.
<https://www.asam.net/standards/detail/openscenario/>
- [22] ASAM OpenDRIVE®. <https://www.asam.net/standards/detail/opendrive/> (accessed May 05, 2021).
- [23] Hanke, T. *et al.*, A generic interface for the environment perception of automated driving functions in virtual scenarios. <https://www.hot.ei.tum.de/forschung/automotive-veroeffentlichungen/>
- [24] Functional Mock-up Interface. <https://fmi-standard.org/>
- [25] Treiber, M., Hennecke, A., and Helbing, D., Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, vol. 62, no. 2, pp. 1805–1824, 2000

- [26] Dobberstein, J., Schmidt, D., Östling, M., Lindman, M., András, B., and Höschele, P., OSCCAR D1.3 Final results on detailed crash configurations from collisions expected to remain for automated vehicles, 2021.
- [27] Witt, M., Kompaß, K., Wang, L., Kates, R., Mai, M., and Prokop, G., Driver profiling – Data-based identification of driver behavior dimensions and affecting driver characteristics for multi-agent traffic simulation, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 64, pp. 361–376, 2019
- [28] Calvert, S. C., Schakel, W. J., and van Lint, J. W. C., A generic multi-scale framework for microscopic traffic simulation part II – Anticipation Reliance as compensation mechanism for potential task overload, *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 140, pp. 42–63, 2020
- [29] Endsley, M. R., Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement, *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, vol. 32, no. 2, pp. 97–101, 1988
- [30] Krajzewicz, D., Kombination von taktischen und strategischen Einflüssen in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation, 2009.
- [31] Erdmann, J., SUMO's Lane-changing model, in *LECTURE NOTES IN CONTROL AND INFORMATION SCIENCES*, 2015, vol. 13, pp. 105–123.
- [32] Singh, S., Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey, *Traffic Safety Facts - Crash Stats*, 2015.
- [33] Ring, P., Modellierung kognitiver Prozesse für ein numerisches Fahrerverhaltensmodell - Band 12 der LKT Schriftenreihe. Dissertation der TU Dresden, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2020.
- [34] Gründl, M., Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen, Dissertation, p. 329, 2005.
- [35] Krajewski, R., Bock, J., Kloeker, L., and Eckstein, L., The highD Dataset: A Drone Dataset of Naturalistic Vehicle Trajectories on German Highways for Validation of Highly Automated Driving Systems, in *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, Dec. 2018, vol. 2018-Novem, pp. 2118–2125.
- [36] Bäumler, M., Dziuba-Kaiser, L., Yin, Z., Lehmann, M., and Prokop, G., Use Information You Have Never Observed Together: Data Fusion as a Major Step Towards Realistic Test Scenarios, in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2020, pp. 1–8.

- [37] Stotz, P., Unfallhäufigkeit und Unfallschwere auf Autobahnabschnitten mit/ohne Tempolimit, GitHub repository, 2019. <https://github.com/spiegel-data/2019-02-tempolimit/>
- [38] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Unfallatlas. https://unfallatlas.statistikportal.de/_opendata2021.html
- [39] OpenStreetMap, © OpenStreetMap-Mitwirkende. www.openstreetmap.org
- [40] Bundesanstalt für Straßenwesen (bast), Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen. https://www.bast.de/BASSt_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/zaehl_node.html
- [41] Mai, M., Fahrerverhaltensmodellierung für die prospektive, stochastische Wirksamkeitsbewertung von Fahrerassistenzsystemen der Aktiven Fahrzeugsicherheit - Band 4 der LKT Schriftenreihe. Dissertation der TU Dresden, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2017.
- [42] Schmidt, D. *et al.*, KAUSAL - A Virtual Tool Chain to Estimate the Impact of Automated Driving on Occupant Restraint Systems, Apr. 2018.

Anforderungen an die Fahrzeuginnenraumgestaltung zur Erhöhung der Insassensicherheit im Unfallgeschehen mit Güterkraftfahrzeugen

Requirements for vehicle interior design to increase occupant safety in the event of an accident with goods vehicles

B.Sc. **D. Preissner**, Dipl.-Ing., M.Eng, CAISS **A. Schäuble**,
DEKRA Automobil GmbH, Stuttgart;
Prof. Dr.-Ing. **W. Remlinger**, Dipl.-Ing. **P. Pomiersky**,
IKTD Universität Stuttgart

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Analyse des Unfallgeschehens hinsichtlich Deformationen von Güterkraftfahrzeugen, die Beurteilung der Verletzungsentstehung sowie die Ableitung von Optimierungspotenzialen bei der Fahrzeuginnenraumgestaltung. Hierzu wird ein Unfallschwerpunkt mithilfe umfassender Auswertungen der amtlichen Unfallstatistik des Deutschen Statistischen Bundesamtes nach der Art der Verkehrsbeteiligung, nach der Ortslage und nach der Unfallart präzisiert. Bei schweren Güterkraftfahrzeugen mit zulässigem Gesamtgewicht von mehr als 3,5 t waren im Jahr 2019 knapp 31 % aller Unfälle Kollisionen durch Auffahren auf den Vordermann – auf Autobahnen sogar 52,9 % [1]. Aus diesem Grund wird über die Unfalldatenbank von GIDAS die kritische Art der Auffahrunfälle auf deutschen Autobahnen mit beteiligten Güterkraftfahrzeugen über 3,5 t detailliert analysiert. Das Augenmerk liegt dabei auf Verletzungs- und Deformationsdaten, sodass Intrusionen in den Fahrgastraum in Korrelation zu den erlittenen Verletzungen gebracht werden können. Letztere werden bezüglich der Verletzungsentstehung tiefergehend betrachtet. Mithilfe einer eigens entwickelten Darstellung werden Verletzungsschwere und Häufigkeiten bestimmter Verletzungsarten visualisiert. Das Verletzungsschaubild ordnet ein Trauma dem betroffenen Körperteil zu, wobei anhand der Biomechanik zwischen Knochen- und Weichteilverletzungen sowie nach dem Schweregrad differenziert wird. Zur übersichtlichen Darstellung der auftretenden Deformationen im Realunfall wird ein Schaubild definiert, welches die Intrusionstiefen an einem Fahrzeug in den verschiedenen Zonen einer Fahrzeugseite abbildet und in der Gesamtbetrachtung aller Fahrzeuge eine Häufigkeitsverteilung herausstellt. So sind die Beschädigungen

sowie die für Verletzungen ursächlichen Strukturen schnell ersichtlich. Im Hinblick auf verletzungsverursachende Bauteile im Fahrgastraum des Güterkraftfahrzeugs werden konkrete Anforderungen an das Designkonzept eines Fahrzeuginnenraumes formuliert und konstruktive Designhinweise als Maßnahmen abgeleitet. Das Hauptproblem liegt neben der Dimensionierung in Fahrerhauslängsrichtung in Bauteilen wie Lenkrad oder Pedalerie. Deshalb liefert dieser Beitrag einen Ausblick zu Auswirkungen veränderter Innenraumarchitekturen durch automatisierte Fahrkonzepte auf die Fahrzeugsicherheit und damit einhergehende zunehmende Freiheitsgrade. Fundierte Ergebnisse des Projekts sind Werkzeuge zur Bewertung des Insassenschutzes, Methoden zur Beurteilung von Verletzungen und Lösungsansätze zur spezifischen Frage nach der Gestaltung des Fahrzeuginterieurs im Kontext der Insassensicherheit bei Güterkraftfahrzeugen mit maximal zulässiger Gesamtmasse von mehr als 3,5 t.

Abstract

The aim of this paper is the analysis of accidents regarding deformations of goods vehicles, the assessment of the origin of injuries as well as the derivation of optimisation potentials in vehicle interior design. For this purpose, an accident black spot is specified according to the type of traffic involved, the location and the type of accident by means of comprehensive evaluations of the official accident statistics of the German Federal Statistical Office. In the case of heavy goods vehicles with a gross vehicle weight of more than 3.5 t, almost 31 % of all accidents in 2019 were caused by crashing into the vehicle in front - on motorways as much as 52.9 % [1]. For this reason, the critical type of rear-end collisions on German motorways with heavy goods vehicles over 3.5 t is analysed in detail with the GIDAS accident database. The focus is on injury and deformation data so that intrusions into the passenger compartment can be put in relation to the injuries suffered. The latter are considered regarding the origin of the injury. With the help of a graph, frequencies, and injury severity of certain types of injuries are visualised. The injury diagram assigns a trauma to the affected part of the body, whereby the biomechanics are differentiated between bony and soft tissue injuries as well as according to the severity. For a clear presentation of the deformations that occur in a real accident, a diagram is defined that depicts the intrusion depths of a vehicle in the various zones on one side of the vehicle and shows a frequency distribution in the overall view of all vehicles. The injury-causing structures as well as the injuries are quickly visible. Regarding components causing injuries in the passenger compartment of the goods vehicle, concrete requirements for the design concept of the vehicle interior and constructive design instructions are derived as measures by means of a list of requirements. In addition to the dimensioning in the longitudinal direction of the driver's cab, the main problem lies in compo-

nents such as the steering wheel or pedals. Therefore, this article provides an outlook on the effects of changed interior architectures through automated driving concepts on vehicle safety and the resulting increased degrees of freedom. Well-founded results of the paper are tools for assessing occupant protection, methods for assessing injuries and approaches to solving the specific question of the design of the vehicle interior in the context of occupant safety in goods vehicles with a maximum permissible total weight of more than 3.5 t.

1. Einleitung

Im Jahr 2019 gab es insgesamt 2,69 Millionen polizeilich erfasste Unfälle, darunter knapp 37.000 unter Beteiligung von Güterkraftfahrzeugen, wobei 794 Insassen getötet wurden [2]. Getreu dem Motto „Vision Zero“ herrscht die Bestrebung vor, die Zahl der Unfalltoten an das Nullniveau anzupassen. Es bestand der Bedarf genauerer Untersuchungen der Verletzungen von Insassen bei Auffahrunfällen mit Güterkraftfahrzeugen auf Autobahnen, um einen Zusammenhang zwischen Deformationen am Fahrzeug und Verletzungswahrscheinlichkeit herstellen zu können. Fahrzeugseitige und körperliche Schäden wurden in Schaubildern abgebildet und gegenübergestellt. Dazu wurden zunächst kritische Unfallszenarien statistisch ausgewertet und die am häufigsten beteiligten Fahrzeugarten, die meistbetroffenen Ortslagen sowie die ursächlichen Unfallarten herausgearbeitet. Die Beteiligten dieser Szenarien wurden dann per Realunfallbetrachtung mittels der GIDAS- Unfalldatenbank (German In-Depth Accident Study) auf Beschädigungen und Traumata untersucht. Daraus ergeben sich stark betroffene Körperregionen und hauptsächlich für Verletzungen verantwortliche Bauteile im Innenraum eines Güterkraftfahrzeugs, welche im Zuge konstruktiver und ergonomischer Überlegungen als Gestaltungshinweise in Form von Anforderungen an das Design im Interieur formuliert wurden. Hierzu gibt diese Arbeit auch einen Ausblick auf zukünftige, alternative Steuer- und Bedienelemente sowie deren Vorteile für die Insassensicherheit.

2. Unfallstatistik

In der Verkehrsunfallforschung ist es üblich, das reale Verkehrs- und Unfallgeschehen genau zu analysieren. Die behandelte Unfallstatistik beschränkt sich in der Regel auf Unfälle infolge des Fahrverkehrs mit schwerwiegenden Folgen, zu denen die Polizei herangezogen wurde. Darunter gibt es den Unfall mit Personenschaden, bei welchem auch mehrere Personen verunglücken können. Die Zahl der Unfälle mit Personenschaden lag im Jahr 2019 bei etwa 300.000 und sank gemessen an der Gesamtunfallzahl in den letzten 20 Jahren um ca. 5 %. Die Summe an allen Straßenverkehrsunfällen hat besonders seit 2014 stark zugenommen und 2015 zum ersten Mal die 2,5 Mio.-Marke überstiegen. Grund dafür sind mehr

zugelassene Kraftfahrzeuge und eine steigende Fahrleistung. Bei Betrachtung der absoluten Zahlen der Unfälle mit Personenschaden stagniert deren Abnahme [2].

2.1 Art der Verkehrsbeteiligung

Kraftfahrzeuge können unter anderem in Personen- und Güterkraftfahrzeuge unterteilt werden. Absolut gesehen sind 2019 knapp 80 % aller Unfälle mit Personenschaden unter Beteiligung von PKW passiert und nur 9 % mit Beteiligung von Güterkraftfahrzeugen. Ein Güterkraftfahrzeug wird nach EG-Richtlinie und abhängig vom maximal zulässigen Gewicht in die Klassen N1 bis N3 unterteilt. Deren Zulassungszahl ist seit 2010 um 25% gestiegen und lag 2019 bei fast 7 % aller zugelassenen Fahrzeuge. Dagegen macht der Anteil an allen zugelassenen Fahrzeugen bei Personenkraftfahrzeugen über 80% aus, wobei die Neuzulassungen der letzten 10 Jahre bei nur etwa 10 % mehr liegen. Werden die Unfallzahlen auf die Gesamtzahl der jeweiligen Art der Verkehrsbeteiligung bezogen, sind nach Bild 1 weniger Unfälle mit Personenschaden bei PKW als bei Güterkraftfahrzeugen passiert, weshalb letztere näher zu betrachten sind [2].

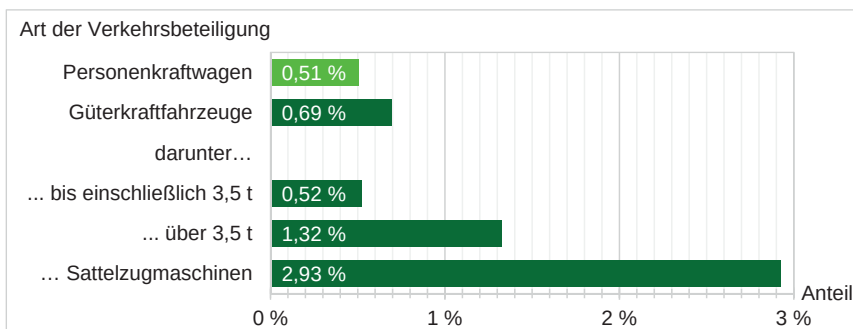


Bild 1: Prozentsatz der im Jahr 2019 erfassten Unfälle mit Personenschaden pro zugelassene Fahrzeuge im selben Jahr nach [1] und [2]

Ähnlich verhält es sich mit den Güterkraftfahrzeugen der Klasse N1 mit maximal 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht. Hier ist die absolute Unfallzahl mit Personenschaden innerhalb aller Güterkraftfahrzeugarten ebenso am höchsten, wie die Anzahl der Zulassungen, weshalb sich die Unfallhäufigkeit auf nur 0,52 % relativieren lässt. Die Klassen N2 und N3 der Güterkraftfahrzeuge über 3,5 t sind zusammen mit den Sattelzugmaschinen ähnlich häufig in einen Unfall mit Personenschaden involviert wie Fahrzeuge der Klasse N1. Da es aber nur etwas mehr als ein Viertel so viele Güterkraftfahrzeuge mit mehr als 3,5 t gibt wie unter 3,5 t, wirkt

sich die Unfallzahl je Fahrzeugbestand mit 1,32 % hier stärker aus. Je größer somit das Gewicht eines Güterkraftfahrzeugs, desto höher ist der Prozentsatz an Unfällen mit Personenschaden pro zugelassene Fahrzeuge [1] bis [2].

2.2 Ortslage

Eine weitere Bezugsgröße, um die Unfallzahlen an den Ortslagen inner- oder außerorts sowie auf Autobahnen zu beziehen, ist neben der Anzahl an zugelassenen Fahrzeugen die Straßenlänge. Diejenige der Autobahnen in Deutschland beträgt 6 % gemessen an allen Straßenarten hinter Bundes- (16 %), Landes- (38 %) und Kreisstraßen (40 %) und kann komplett auf die Ortslage „auf Autobahnen“ zurückgeführt werden. Bei dieser Ortslage passieren 606 Unfälle mit Personenschaden pro 1.000 km Straßenlänge unter Beteiligung von Güterkraftfahrzeugen, innerhalb geschlossener Ortschaften 278 und außerhalb nur 48. Zudem verunglücken auf der Autobahn, wie in Bild 2 ersichtlich ist, am meisten Insassen, wenn die Art der Verkehrsbeteiligung nicht unterschieden wird, und dort ist die Fahrleistung innerhalb der Güterkraftfahrzeuge höher als außer- sowie innerorts [2].

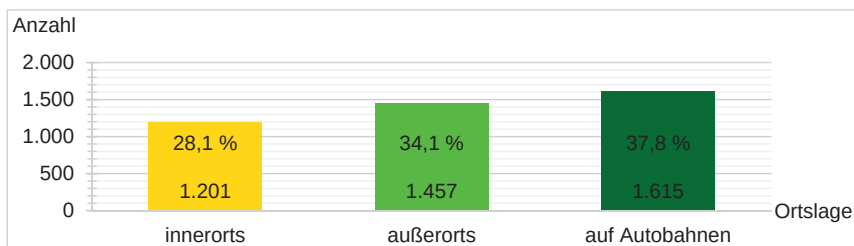


Bild 2: Verunglückte je 1.000 Unfälle mit Personenschaden nach [2]

2.3 Unfallart

Die häufigste Unfallart bei Unfällen mit Personenschaden auf Autobahnen unter Beteiligung von Güterkraftfahrzeugen ist mit großem Abstand die Unfallart 2. Über 4.200 Fahrer sind nach Bild 3 an einem Auffahrunfall beteiligt, welcher alle Zusammenstöße mit einem anderen vorausfahrenden oder verkehrsbedingt haltenden Fahrzeug einschließt. Die Unfallarten werden in Bild 9 des Anhangs beschrieben. Das Auffahren schwerer Güterkraftfahrzeuge auf einen weiteren Beteiligten dieser Art gilt vor allem am Stauende auf Autobahnen als Unfallhotspot mit mehr als 50 % aller Unfallarten mit Personenschaden [2].

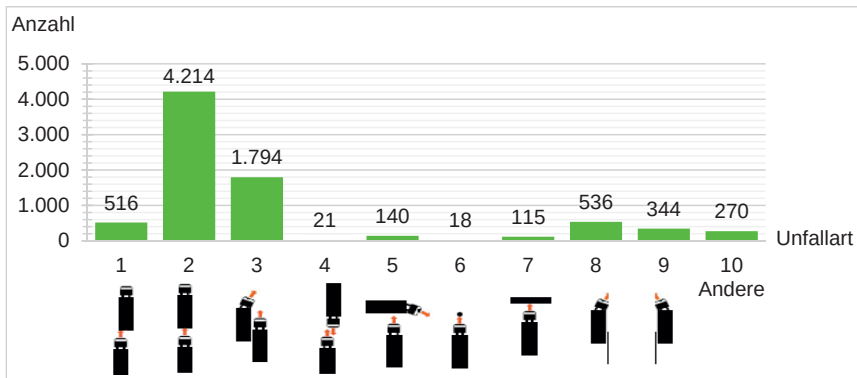


Bild 3: Nach der Unfallart beteiligte Fahrer von Güterkraftfahrzeugen an Unfällen mit Personenschaden auf Autobahnen 2019 [2]

3. Verletzungen und Deformationen

Im Folgenden werden Verletzungsschwerpunkte sowie Stellen extremer Intrusionen und Innenraumbeschädigungen vorgestellt, die bei 76 untersuchten LKW-Auffahrunfällen aus der GIDAS-Unfalldatenbank auftreten. Laut obiger Statistik nimmt auf Autobahnen das Risiko schwerverletzter und getöteter Insassen von Güterkraftfahrzeugen zu, wobei die Zahl der Leichtverletzten gleichzeitig abnimmt. Dabei gilt es herauszufinden, nach welchen Kriterien zwischen schweren und leichten Verletzungsfolgen differenziert wird.

3.1 Verletzungen

Die Schwere einer einzelnen Verletzung in Bezug auf den ganzen Körper eines sonst gesunden Erwachsenen kann anhand einer Skala, dem Abbreviated Injury Scale, von 1 bis 6 eingestuft werden. Dieser Schweregrad stellt die letzte Ziffer eines 7-stelligen AIS-Codes dar, welcher daneben noch die Körperregion, die Anatomische Struktur und die Art der Verletzung definiert. Als schwerverletzt gelten Unfallbeteiligte mit einem maximalen AIS-Wert von MAIS3 oder höher. Die Auswirkungen multipler Traumata können schwerwiegender sein, werden mit dem AIS-Score jedoch nicht berücksichtigt. Insgesamt wurden für diese Betrachtung 518 Einzelverletzungen von 107 Beteiligten in die statistische Auswertung einbezogen. Darunter sind hauptsächlich Verletzungen mit geringen oder mäßigen Folgen für den Menschen aufgetreten, welche anhand des AIS-Scores aus Tabelle 1 mit einem niedrigen Verletzungsschweregrad bewertet wurden [3] bis [4].

Tabelle 1: Verteilung der Verletzungsschwere nach AIS-Score [5]

Schweregrad Verletzungen		Maximal, AIS6	Kritisch, AIS5	Schwer, AIS4	Ernsthaft, AIS3	Mäßig, AIS2	Gering, AIS1
Anzahl	518	3	5	10	47	110	321
Anteil	100,00 %	0,58 %	0,97 %	1,93 %	9,07 %	21,24 %	61,97 %

Bei dieser Verletzungsanalyse lassen sich die marginalen Schweregrade mit zwei Faktoren begründen, welche sich auch gegenseitig bedingen. Zum einen hängt die Auswahl der Schwere mit der Beurteilung der Überlebenswahrscheinlichkeit einer Person infolge dieser einen Verletzung zusammen. Dabei spielt die Anatomie des menschlichen Körpers die Hauptrolle. Wird kein großer Blutverlust diagnostiziert oder sitzen an der zu bewertenden Körperregion keine überlebenswichtigen Organe, wie etwa an den meistbetroffenen Extremitäten, ist die Schwere der Verletzung mit kleinen Auswirkungen einzustufen. Zum anderen betreffen allein 54,44 % aller Traumata die Arme oder Beine der Insassen, welche oft mit maximal AIS2 und AIS1 bewertet wurden, weil an den oberen und unteren Extremitäten keine Organe verortet sind. Bei den unteren Extremitäten kam ein Maximalwert von AIS4 in dieser Auswertung selten vor. Dort trat die am häufigsten verletzte Körpergruppe mit 50 gezählten Einzelverletzungen jeglicher Art am Unterschenkel auf. Weiter wurden Verletzungen getöteter Personen sowie Prellungen und Frakturen als schlimmste Folgen tiefergehend untersucht. Beide zuletzt genannten Verletzungsarten machen mit jeweils 101 lokalisierten Einzelverletzungen 48 % aller bedeutendsten Verletzungsarten aus, während die andere Hälfte aus Schürfungen, Verstauchungen oder Schnitt- und Quetschwunden bestand. Durch die Eingrenzung der Betrachtung aller Arten mit mehr als 20-maligem Vorkommen vereinfacht sich die Zuordnung der Verletzung zur betroffenen Körpergruppe. Dennoch sollten auch alle anderen Verletzungen miteinbezogen und analysiert werden, sodass anhand des Menschmodells in Bild 10 im Anhang eine Häufigkeitsbetrachtung aller erfasster Verletzungen erfolgt. Über eine Farbskala werden alle Verletzungen den Körperteilen zugeordnet und die Gesamtverteilung für jede AIS-Schwere einzeln übersichtlich in einem Schaubild zusammengefasst. In einer vergleichbaren Grafik werden in Bild 4 untenstehend Prellungen und Frakturen dargestellt. Im Unterschied zu jener im Anhang zeigt das Skelett nicht ausschließlich knöcherne Traumata und die Säule nicht nur Weichteilverletzungen, sondern es kann zwischen lokalisierbaren Verletzungen und solchen mit unbekannter Angabe unterschieden werden. In den Knochen werden Traumata mit exakt bestimmter anatomischer Lage und rechts diejenigen ohne zugeordnetes Körperteil angezeigt [5].

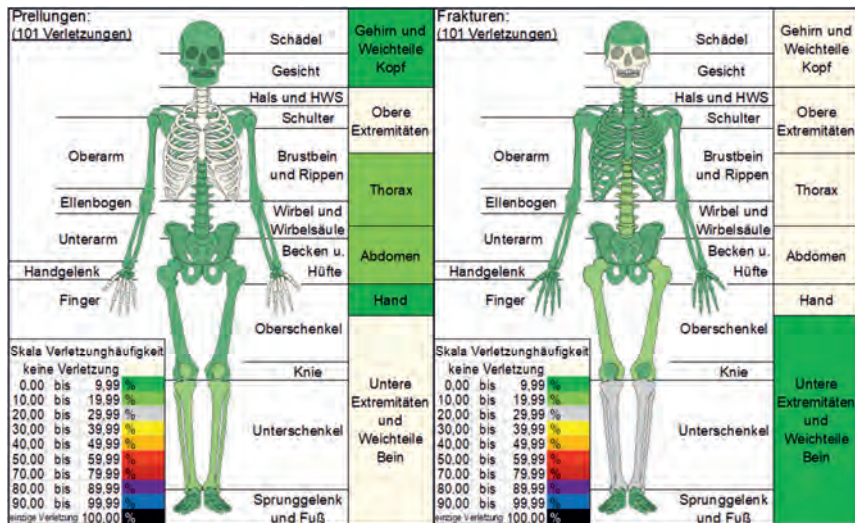


Bild 4: Durchschnittsverteilung von Prellungen und Frakturen nach Körpergruppen [5]

Eine Prellung ist nach Bild 4 (links) mit stark abnehmender Häufigkeit am Knie, dem Unterschenkel und den Füßen durch direkten Anstoß an umliegende Strukturen, wie etwa an die Pedale, an das Bodenblech sowie an das untere Armaturenbrett, aufgetreten. Zumeist war das Knie betroffen mit 20 Verletzungen und 19,8 %. Ebenfalls häufig wurde eine Prellung in dieser Analyse an den Weichteilen von Brust (15,8 %) und Bauch (11,9 %) diagnostiziert. Werden die Knochenbrüche in Bild 4 (rechts) betrachtet, wird klar, dass erneut die beiden Unterschenkel mit 21,8 % meistbetroffen sind vor den Wirbeln und der Wirbelsäule mit 15,8 %, dem Oberschenkel mit 11,9 % sowie den Sprunggelenks- und Fußknochen mit 9,9 %. Die Vielzahl an Prellungen und Frakturen im Bereich der unteren Extremitäten ist darauf zurückzuführen, dass im Fußraum des Güterkraftfahrzeugs bei einem Frontalaufprall sehr wenig Platz zur Verfügung steht und dort die größten Intrusionen den Überlebensraum deutlich reduzieren. Deshalb ist es unerlässlich, die auftretenden Deformationen näher zu betrachten [5].

3.2 Deformationen und Verletzungsverursachende Teile

Bei der Auswertung wurden 107 Fahrzeuge aus 76 Auffahrunfällen mit LKW-LKW- Kollisionspartnern aufgenommen. Davon sind 7 Fahrzeuge unbeschädigt geblieben und in den folgenden Betrachtungen nicht weiter berücksichtigt worden, sodass im Umkehrschluss 100

Güterkraftfahrzeuge mit Beschädigungen weiter auf Deformationen und Intrusionen in den Innenraum untersucht wurden. Unter den Ergebnissen der Deformationsbetrachtung sind die äußeren Schadensbilder der beteiligten Güterkraftfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 3,5 t an Unfällen des Auffahrens auf einen vorausfahrenden oder verkehrsbedingt haltenden Verkehrsteilnehmer auf Autobahnen zu verstehen. Im Falle der vorliegenden Ausarbeitung wurden wegen unzureichender Erfassung von Innenraumdeformationen und von Beschädigungen einzelner Teile aus dem Innenraum in der Datenbank von GIDAS die Deformationen der Außenseite herangezogen. Aufgrund der geringen Knautschzone bei Güterkraftfahrzeugen über 3,5 t und speziell bei den Frontlenkern über 7,5 t bzw. 12 t ohne Haube können Deformationen der Außenseite direkt auf den Innenraum und die hinter der Fahrerhausfront liegenden Strukturen übertragen werden. Durch den Anprall von vorne wird der untere Teil des Fahrerarbeitsplatzes in der Regel sehr schnell eingedrückt und verengt, da relevante Bauteile wie Armatur, Lenksäule, Pedalerie und Sitz alle in diesem Bereich verteilt sind [5].

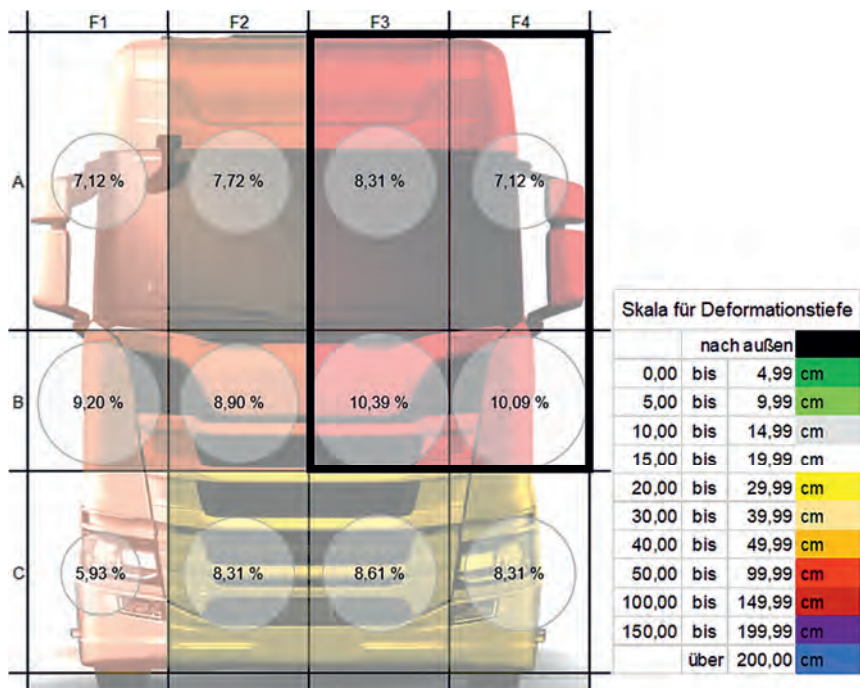


Bild 5: Durchschnittliche Deformationstiefen und Häufigkeiten in den verschiedenen Zonen der Fahrzeugfront [5]

Die durchschnittlichen Deformationen der Frontseite eines Güterkraftfahrzeugs liegen im Gesamten zwischen 20 cm und bis zu 100 cm, was durch die gelbe, beige oder orangene Färbung in Bild 5 verdeutlicht wird. Die tiefsten Intrusionen sind dabei im dick umrahmten Quadrat, welches den Bereich des Fahrers kennzeichnet, rot dargestellt. Der Höchstwert liegt in Zone F4B mit 56,82 cm und die geringste Deformation mit 21,03 cm in Zone F4C. Die Kreise stellen eine Häufigkeitsverteilung dar und werden gemeinsam mit den Prozentzahlen umso größer, je öfter eine Intrusion in einer Zone an der betroffenen Stelle bei allen verunfallten Fahrzeugen aufgetreten ist. Auch die Häufigkeiten der Deformationsdaten sind auf der Fahrerseite im Bereich B in Höhe des Fußraums eines Güterkraftfahrzeugs am größten. Bei Betrachtung der verletzungsverursachenden Bauteile im Interieur stehen erneut Traumata getöteter Insassen sowie die Verletzungsarten Prellung und Fraktur im Fokus. Bei getöteten Unfallbeteiligten werden Verletzungen jeglicher Art betrachtet. Häufigste bekannte Ursache für Verletzungen getöteter Insassen ist in vorliegender Analyse das Eindringen externer Teile in den Fahrgastraum mit 21 Nennungen (14,38 %). Werden der Lenkradkranz und das Lenkrad naheliegenderweise zu einem Bauteil zusammengefasst, macht dieses mit 24,65 % den größten Anteil aller verletzungsverursachenden Teile aus. Werden lediglich Prellungen betrachtet, stellt das Lenkrad inklusive Kranz ebenfalls das hauptsächlich für Verletzungen verantwortliche Bauteil dar (22,94%), gefolgt von der unteren Armaturentafel mit 18,35 %. Die Armaturentafel ist jedoch bei Frakturen das in den meisten Fällen verletzungsinduzierende Teil (18,35%). Eine große Rolle spielen bei Knochenbrüchen noch die Lenksäule mit Abdeckung sowie Bauteile im Fußraum mit Pedalerie und Spritzwand. Dazu gehört auch das Bodenblech, welches mit den beiden zuletzt genannten Teilen unter Zusammenfassung der drei Verletzungsszenarien in umgekehrter Reihenfolge an den letzten Stellen auftaucht, wie in Bild 6 zu sehen [5].

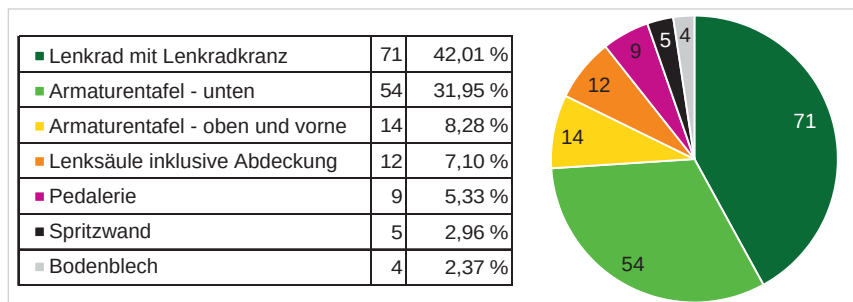


Bild 6: Verletzungsverursachende Innenraumbauteile von Güterkraftfahrzeugen bei Prellungen, Frakturen sowie Verletzungen getöteter Personen [5]

Mit 42 % ist das Lenkrad mit Lenkradkranz am häufigsten für Verletzungen hinsichtlich Prellungen, Frakturen und getöteter Unfallbeteiligter vor der Armaturentafel mit insgesamt etwas mehr als 40 % und großem Abstand vor der Lenksäule (7,10 %) verantwortlich. Hieraus werden einige Strukturen und Innenraumbauteile mit Potenzial der Verbesserung hinsichtlich Verletzungsentstehung hervorgehoben, die es zu nennen gilt [5].

4. Designhinweise im Sinne der Insassensicherheit

Generell besteht bei einem Auffahrunfall schwerer Güterkraftfahrzeuge ein Platzproblem in Längsrichtung des Fahrzeugs, welches aufgrund des Aufpralls und der hohen Masse besonders im Bereich der Fahrerkabine zusammengestaucht wird. Zudem sorgen den Fahrerplatz umgebende Strukturen und Bauteile für Einschränkungen. Diese Probleme sollen mit konkreten Designhinweisen für das Interieur gelöst werden.

4.1 Anforderungen an sichere Fahrzeuginnenräume

Das Maß längs des Fahrerhauses wird in Bild 7 anschaulich dargestellt und wurde bisher durch die gesetzlich vorgeschriebene Maximallänge in der EG-Richtlinie auf 16,5 m bei Sattel- bzw. 18,75 m bei Gliederzügen begrenzt, woraus sich auch ein maximales Längenmaß für das Führerhaus ergibt. Beim neuen LKW der Marke DAF wird durch das Aufheben dieser Längenrichtlinie von einem größeren und aerodynamischeren Fahrerhaus gesprochen [6]. Seitens der Hersteller wird dies im Sinne der Aerodynamik schon lange gefordert, doch auch im Bereich der Sicherheit hätte diese Verlängerung der Fahrerhäuser Vorteile. Es könnte eine ausgiebigere Dimensionierung der sogenannten Knautschzone vor dem Fahrerplatz umgesetzt werden, ohne das Ladevolumen zu verkleinern.

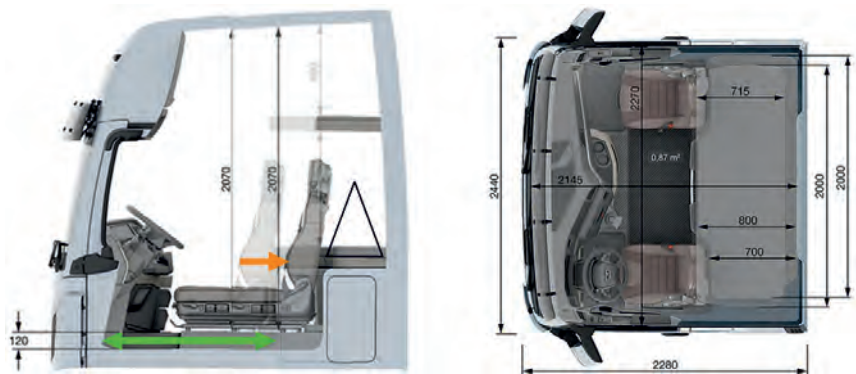


Bild 7: Verschiebemechanismus des Fahrerplatzes und Abmessungen des Fahrerhauses eines Güterkraftzeugs [5]

Außerdem kann der Freiraum zwischen Fahrerhausrück- und Ladebordwand bzw. Aufbau vergrößert werden und somit ebenfalls mehr Stoßenergie absorbiert werden. Auf der anderen Seite schränken eine ergonomische Sitzposition und eine sichere Wahrnehmung die Freiheitsgrade der Innenraumgestaltung ein. Diese bleibt auch im Crashfall starr und befindet sich wegen besseren Sichtverhältnissen und der Erreichbarkeit von Pedalerie und Lenkrad möglichst weit vorne. Abhilfe würde ein nach hinten Rutschen des kompletten Sitzes vor dem Aufprall bei einer Frontalkollision schaffen. Dazu müsste hinter dem Sitz ausreichend Raum zu Verfügung stehen. Um dies bei großen Fahrerkabinen sicherzustellen, muss die Liegefläche in einer möglichen Schlafkoje im Notfall aufklappen und das Staufach hinter bzw. unter dem Sitz schmaler konstruiert werden, ähnlich der Skizze aus Bild 7. Einen vergleichbaren Mechanismus gibt es bereits in der Lagerung der Fahrerkabine auf dem starren Unterbau, indem der Gesamtkomplex durch eine geeignete Lagerung mit Sollbruchstelle nach hinten ausweichen kann. Diese Kipplagerung hat auch einen praktischen Nutzen, um Motor und Getriebe reparieren zu können, und muss unbedingt beibehalten werden, da sie wichtigen Überlebensraum für Insassen von Güterkraftfahrzeugen schafft bzw. erhält. Neben weiteren Neuerungen, wie abklappenden bzw. verschwindenden Pedalen im Crashfall oder weichen Innenraumstrukturen, gilt es an bestehenden Sicherheitssystemen in Form von Rückhaltesystemen festzuhalten [5].

4.2 Zukünftige Bedien- und Steuerelemente

Das für Verletzungen meistverantwortliche Innenraumbauteil wurde bereits erörtert und stellt mit dem Lenkrad das wohl wichtigste Element des Fahrzeugführers dar. Dort ist eine mög-

lichst starke Senkrechtheilung ähnlich dem PKW-Cockpit vorteilhaft für den Insassenschutz und verhindert mit einer größeren Anprallfläche extreme Verletzungen im Bauchbereich. Da die Lenkradstellung trotzdem frei einstellbar sein muss, wäre eine Neuerung zusätzlich über Sollbruchstellen im Lenkradkranz denkbar, die ein Einschnitten in den menschlichen Oberkörper verhindern sollen. Die technische Realisierung veränderter Lenkradkonzepte innerhalb der Möglichkeiten zukünftiger, automatisierter Fahrkonzepte in der LKW-Fahrerkabine ließe sich sehr elegant mit modernen Steer-by-wire-Systemen verwirklichen. Auf Basis einer mehrfach-redundanten, elektronischen Übermittlung des Lenkbefehls wäre die Notwendigkeit der mechanischen Übertragung über eine nahezu senkrecht stehende Lenksäule nicht mehr erforderlich. Sowohl der Einfluss des Lenkrads auf die Unfallverletzungen des Fahrers als auch der Einfluss der Lenksäule ließe sich durch diese Technik erheblich reduzieren. Im Bereich der Behindertenfahrzeuge und bei mobilen Arbeits- und Landmaschinen wird diese Technologie bereits seit einiger Zeit eingesetzt und ist bewährt. Die großen Zulieferer von Lenkungssystemen bieten solche Systeme auch den PKW- und LKW-Herstellern an. Die elektronische Übermittlung der Aktuatorik ermöglicht zusätzliche, unterstützende Funktionalität. Beispielsweise kann der Lenkbefehl in unterschiedlichen Fahrzuständen eine unterschiedliche Charakteristik aufweisen. Auf diese Weise können eine Autobahnfahrt, das Abbiegen oder das Rangieren ganz unterschiedlich und jeweils speziell unterstützt werden. Auch bietet die Rückkopplung der Fahrzeugreaktion als taktiles ‚Force-Feedback‘ in die Lenkvorrichtung eine wirksame Hilfestellung, damit der Fahrer mehr vom Verhalten seines Fahrzeugs spüren kann. Dies verspricht einen positiven Effekt hinsichtlich der aktiven Sicherheit des Fahrzeugs. Das Potential für die passive Sicherheit ließe sich bei der Verwendung von Steer-by-wire-Technologie noch weiter steigern, indem man vom klassischen Lenkrad auf eine Joystick- bzw. Sidestick-Steuerung als primäres Bedienelement übergeht. Ein solches Bedienelement wird nach Bild 8 idealerweise im Bereich der Armauflagen am Fahrersitz positioniert. Damit wäre das Bedienelement bereits aus dem gefährlichsten Bereich der Vorverlagerung des Insassen beim Frontalaufprall entfernt. Ein Sidestick besitzt ebenso die Möglichkeit, die Funktionen von Gas und Bremse zu integrieren (drive-by-wire). Damit wäre die Sitzposition des Fahrers nicht mehr notwendigerweise mit dem heutigen Fahrerfußraum verkoppelt. Eine vergrößerte Distanz zur Spritzwand wäre somit möglich und die Wirkung von Intrusionen ließe sich auch hier entschärfen [8].



Bild 8: Frühes Konzept eines PKW-Cockpit mit Sidesticks als Steuerelemente [7]

Weiterhin wird auch im Segment der Nutzfahrzeuge die Integration von automatisierten Fahrfunktionen weiterwachsende Verbreitung finden. Der Einsatz von (teil-)autonomen Fahrfunktionen ist bereits absehbar. Der temporäre Wechsel der verantwortlichen Fahrzeugführung vom menschlichen Fahrer auf hochautomatisierte Fahrfunktionen wird den Fahrer immer häufiger in eine Stand-by-Rolle und später in eine Ruhesituation verlagern können. Die Wechsel der verantwortlichen Fahrzeugführung vom automatischen System zum menschlichen Fahrer und wieder zurück lassen sich in Verbindung mit Steer-by-wire- bzw. Drive-by-wire-Technologien deutlich verständlicher für den Fahrer realisieren. Die phasenweise und auch länger andauernde automatische Fahrzeugsteuerung wird die Zahl der Unfälle reduzieren, weil nur bei weitgehender Fehlerfreiheit das automatische Fahren akzeptiert und erlaubt sein wird. LKW-Fahrer werden die Gelegenheit haben, während der Fahrt zu regenerieren und zu schlafen, um für Fahrtabschnitte, auf denen Ihre menschliche Kompetenz erforderlich ist, fit zu sein. Obwohl eine vollumfängliche Umsetzung der automatisierten Fahrfunktionen noch einige Jahre in Anspruch nehmen wird, ist langfristig auch eine LKW-Fahrertätigkeit denkbar, die von außerhalb des Fahrzeugs durchgeführt wird, von einem Fahrerplatz ähnlich einem heutigen Fahrsimulator mit online-Verbindung zum realen LKW auf der Straße. Bei der Steuerung von unbemannten militärischen Flugzeugen ist dies bereits Realität [8].

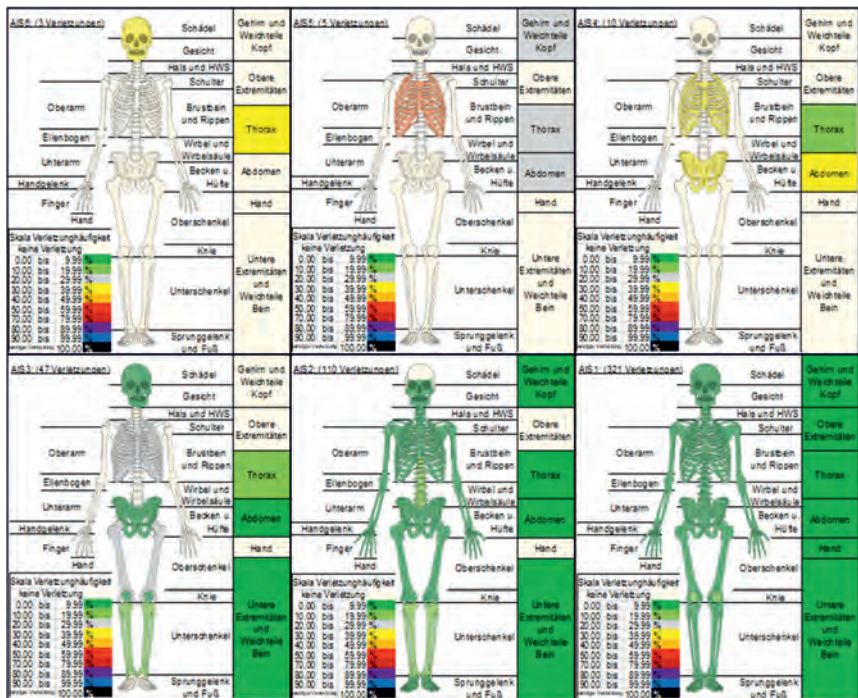
5. Fazit

Auf Basis der herausgestellten Unfallszenarien, Verletzungsarten und ursächlichen Strukturen im Fahrzeuginnenraum sowie den Fahrzeugdeformationen werden in diesem Beitrag qualitative Hinweise zur Verletzungsvermeidung und -minderung in Form von Anforderungen gegeben. Das Unfallgeschehen ist sehr vielfältig. Selbst, wenn nur Güterkraftfahrzeuge betrachtet werden und die Unfallart auf Auffahrunfälle auf Autobahnen beschränkt wird, gibt es unzählige Faktoren und Einflussgrößen, welche die Folgen für Mensch und Fahrzeug beeinflussen können. Für eine genauere Herausstellung der Korrelation zwischen Verletzung und Deformation eines einzelnen Falls ist die Unfallrekonstruktion ein hilfreiches Mittel, um den Ablauf exakt zu rekonstruieren und auf detaillierte Intrusionen zu schließen. Mit der umfangreichen Betrachtung in diesem Beitrag sind aber mit hoher Wahrscheinlichkeit auftretende und wiederkehrende Ereignisse und Verletzungsmuster abgedeckt, sodass die Beachtung der Designhinweise repräsentativ für die Minderung der Unfallfolgen im Sinne von Verletzungen steht. Bei der Analyse eines gesonderten Einzelfalls können dennoch davon abweichende Verletzungen auftreten. Die Wirksamkeit der Maßnahmen muss in weiteren langwierigen Studien und Erprobungen verifiziert werden.

6. Anhang

	Unfallart 1	Unfall im ruhenden Verkehr
	Unfallart 2	Unfall durch Auffahren
	Unfallart 3	Unfall durch Streifen oder Schneiden
	Unfallart 4	Unfall im Begegnungsverkehr
	Unfallart 5	Unfall mit Querverkehr
	Unfallart 6	Unfall mit Fußgänger
	Unfallart 7	Unfall mit Hindernis
	Unfallart 8	Unfall durch Abkommen nach rechts
	Unfallart 9	Unfall durch Abkommen nach links
	Unfallart 10	Unfall anderer Art

Bild 9: Beschreibung der Unfallarten [5] nach [9]



- [1] Statistisches Bundesamt (Destatis): Verkehrsunfälle.- Unfälle von Güterkraftfahrzeugen im Straßenverkehr 2019: S. 26-108; Wiesbaden 2020
- [2] Statistisches Bundesamt (Destatis): Verkehr.- Verkehrsunfälle 2019: Fachserie 8 Reihe 7: S. 10-342; Wiesbaden 2020
- [3] Schmitt, K.; et.al. (2020): Trauma-Biomechanik.- Einführung in die Biomechanik von Verletzungen: S. 27-28 und 222-225, Berlin: Springer-Verlag.
- [4] Association for the Advancement of Automotive Medicine AAAM: The Abbreviated Injury Scale: 2015 Revision: S. XV; Chicago: 2016
- [5] Preissner, D.: Unfallgeschehen mit Güterkraftfahrzeugen.- Analyse der Fahrzeuginnenraumgestaltung im Kontext der Insassensicherheit, IKTD Universität Stuttgart und DEKRA Automobil GmbH. Masterarbeit. Stuttgart 2021
- [6] DAF Trucks Deutschland GmbH: Start the Future. Die neue Generation XF, XG und XG+. Frechen 2021, S. 10-11
- [7] Institute for Automotive Engineering (ika): Aachen: Internet 2021-10-08, <https://www.ika.rwth-aachen.de/en/research/projects/driver-behaviour/3218-evaluation-of-active-sidesticks-as-alternative-controls-in-real-traffic.html>
- [8] Klein, M.; et.al.: Potentials and Challenges for the Application of Active Sidesticks – Case Study “SpeedE”.- 21st Aachen Colloquium Automobile an Engine Technology 2012: S. 1-12, Aachen 2012
- [9] Malczyk, A.; Koch, M.: Injuries Sustained by Occupants of Heavy Trucks.- 2021 crash.tech Conference (GDV): S. 8; Berlin 2021

Results of the EU project OSCCAR from Mercedes Benz perspective

Ergebnisse des EU Projekts OSCCAR aus der Sicht von Mercedes-Benz

Jan Dobberstein, Christian Mayer, Dr. Christian Kleinbach,
Mercedes-Benz AG, R&D Fahrzeugsicherheit, Sindelfingen

Zusammenfassung

Die Entwicklung zukünftiger Fahrzeugkonzepte bedeutet für den Insassenschutz einen dramatischen Wandel in Bezug auf neue Crash-Konfigurationen, Sitzpositionen und heterogene Insassencharakteristiken. Diese neuartigen Anforderungen und deren Komplexität wurden vom EU-Projekt OSCCAR durch die Entwicklung virtueller Bewertungsmethoden adressiert. Beispielhafte Schutzprinzipien wurden entworfen und dafür erforderliche digitale Menschmodelle weiterentwickelt. Dieser Beitrag fasst die Entwicklungen aus Sicht von Mercedes-Benz zusammen, um aufzuzeigen, wie sie einem OEM mit dem Ziel automatisiertes Fahren weiterhelfen.

Abstract

Future vehicle developments create a need to assess relevant crash configurations not addressed by today's regulations or consumer crash tests. The EU project OSCCAR analyzed occupant vehicle safety requirements for HAVs and defined enablers for the automotive industry to design and develop new safety systems for advanced, safe and comfortable seating positions. Dedicated, advanced protection principles and concepts were developed and assessed by using harmonized, enhanced human body models (HBMs) suitable for complex test cases, where conventional physical crash test dummies, technically known as anthropomorphic test devices (ATDs), cannot reliably be used. This paper focuses on the use of these virtual assessment methods at Mercedes-Benz as an OEM within OSCCAR and highlight, why the results are relevant for Mercedes-Benz from an OEM perspective, regarding the path to virtual testing.

Objectives of OSCCAR

The Horizon 2020 EU funded project “OSCCAR” (Future Occupant Safety for Crashes in Cars”) ran from June 2018 to November 2021 and focused on future protection principles for occupants of highly automated vehicles. The project's approach focused on the evaluation of new and more comfortable seating positions, while expecting fundamental changes to current interior concepts such as vis-à-vis seats. These novel seat positions and seating postures implicate new challenges for the safety of occupants in crashes, while the crash configurations are expected to change in future mixed traffic compared to nowadays traffic crashes. Due to the variety and complexity driven by these multi-dimensional changes, OSCCAR aimed at developing a novel simulation-based approach to safeguard occupants in traffic accidents [1]. The highlights in terms of scientific or methodological progress – from a perspective of Mercedes as an OEM who wants to make use of such approaches - are described in the chapters below.

Future accident scenarios in mixed traffic

OSCCAR showed that current accident data can be the basis for prediction of crashes expected to remain in future mixed traffic, within the Operational Design Domain (ODD) of the automated driving use cases “highway pilot” and “urban robo car”. This was done based on real-world crash data, assuming inherent avoidance of automated vehicles due to the expected driving behavior, and simulating collision avoidance functionality based on pre-crash trajectories [2]. This approach resulted in exactly defined crash configurations like “left turn across path” crashes at urban crash velocities reported in D1.1 that were provided as generic crash pulses based on structure FE simulation with various vehicle models. These “OSCCAR pulses” were the basis for the work in the subsequent work package WP2 on protection principles [4].

After defining this set of crash configurations, a novel traffic simulation approach for mixed traffic scenarios and according future crashes based on the open source traffic simulation environment openPASS was developed and applied [3][4]. This approach links the accident-based methods applied in D1.1 with scenario-based assessment from virtual testing of automated driving functions. Based on these demonstrations and the discussion within the project, a vision of fully integrated virtual safety assessment was derived. OSCCAR showed the feasibility to create a toolchain from functional assessment of automated driving functions in realistic, virtual traffic, resulting in virtual remaining crashes – which are used as basis for

design and assessment of future occupant safety solutions for such automated vehicle concepts.

OSCCAR Test Case Matrix & Protection principles

The basis for the design of novel protection principles was the OSCCAR Test Case Matrix, which involved all OSCCAR partners and help harmonizing the different perspectives on what is relevant for defining future test cases. This framework structured the characteristics of a potential degrees of freedom with regard to future vehicle concepts in three dimensions: crash configurations (front, side, rear impact..), interior use cases (seating arrangement, seating position, occupant behavior) and occupant characteristics (population heterogeneity). Based on pre-selection processes, the space of potential combinations can be narrowed down in order to obtain a manageable set of test cases for simulation studies [5].

In project wide workshops with almost all partners, five different exemplary protection principles were drafted, both considering adaptation of the restraint systems to the changed boundary conditions and repositioning the occupant into a conventional position. By the use of human body models, the occupant kinematics and the related injury mechanism for selected test cases were evaluated, showing the advantages of using HBMs in such novel evaluation tasks, compared to existing ATDs [6].

Addressing population heterogeneity with advanced human body models

Besides the general ability to replicate occupant kinematics in novel seating positions, HBMs have another great advantage, they can be scaled and morphed to represent population heterogeneity with respect to age, gender, BMI and anthropometry. Together with the partner project OSCCAR China HBMs with Chinese anthropometry were generated. Through advanced morphing methods, a 5th percentile female model and a 50th percentile male model were derived from existing HBMs on the basis of the CNIS 2009 anthropometric database. Another focus was on HBMs representing obese occupants. In novel, reclined seating positions the interaction of lap belt and pelvis are increasingly important. For a good representation of the belt interaction, realistic material properties, location and thickness of skin, adipose tissue and muscle are required for the HBM. An obese HBM was developed with a BMI of 38. The model was successfully validated on body region and full body level, see [9].

A third aspect of advanced HBMs covered in the OSCCAR project is active musculature. Active HBMs (AHBMs) can simulate occupant behaviour in normal driving or pre-crash scenarios.

Here the LS-Dyna implementation of the extended Hill-type muscle (EHTM) model [8], was improved further. Aside from numeric reasons, the integrated reflex controller makes this model computational efficient when used for the complete musculature of an AHBM. To enhance the usability when dealing with large numbers of muscles, a so-called vectorized hierarchical controller is proposed. The muscle model was also implemented in VPS to make it available to a wider range of users. The development and validation of the muscle models, controllers and various AHBMs are described in [10]. These models can further improve the assessment of the proposed protection principles.

One of the major OSCCAR goals of HBM development in general was to have injury predictors on tissue level instead of having to introduce measurement devices as in ATDs. This means evaluating local stress and strain via statistical methods and finding correlations with structural limits or injurious loads. In order to enable virtual testing, candidate criteria were screened and consolidated within OSCCAR. Harmonized injury criteria for brain, neck, thorax, lumbar spine, pelvis and minor injuries in muscle are published in [11].

Homologation test case & future application in virtual testing

The goal of the homologation use case in OSCCAR was setting up a virtual as well as a physical homologation demonstrator. The sled tests with the physical demonstrator provided the data necessary for the development and validation of the virtual evaluation framework. In a project task linked to the protection principles design, validated environment simulation models of seat, interior and restraints were provided and served as basis for the virtual homologation demonstrator [7].

HBMs are far superior to ATDs in novel seating positions. ATDs have reached limits. HBMs are digital only and require virtual testing (VT). VT is a cost-efficient way to improve occupant safety. HBMs are validated with PMHS and volunteer data [10][14]. But also the remaining parts of the virtual simulation environment need to be validated. Validation starts on component level, continues on submodel level and finally the full vehicle model needs to be validated. On all levels hardware experiments are required. On component level this can be simple set-ups. For submodels or full vehicle models, ATDs or ATD-like devices are needed to replicate the occupant load on the systems. OSCCAR developed guidelines for a process to admit vehicle environment simulation models to be used in a VT procedure involving Human Body Models (HBMs) [13].

Many different HBMs exist, they can be completely different models or even types of models, but they can also be different only due to different pre-processing e.g. postural adjustments. These different HBM won't produce identical results even if used in identical virtual environments. Methods for dealing with such differences or numerical scatter are demonstrated in a homologation test case, where 6 different HBMs in 3 different codes are compared [12]. Above mentioned harmonized injury predictors are applied.

Finally, these steps towards virtual testing will not only help safeguarding future interior concepts and ensuring occupant safety in comfortable sitting positions in automated vehicles. The OSCCAR improvements to HBMs (and to the methods using HBMs) contribute to the use of such approaches in consumer test and regulatory assessment of conventional vehicles as well. The intensive work in OSCCAR on comparability and robustness of HBMs showed the challenges ahead (e. g. sort out different injury predictions with different codes); but the project showed as well what is needed (validation procedures, protocols, quality check tools) to bring the assessment with HBMs from the field of safety research to a level of industry standards.

Literature

- [1] Leitgeb W et. al. 1st OSCCAR Newsletter, retrieved from www.osccarproject
- [2] Dobberstein J, Lich T, Schmidt D (2019) Accident data analysis – remaining accidents and crash configurations of automated vehicles in mixed traffic; Deliverable 1.1, OSCCAR Project; Grant Agreement No 768947
- [3] Woessner U (2021) openPASS framework for integrated safety assessment; Deliverable 1.2, OSCCAR Project; Grant Agreement No 768947
- [4] Dobberstein J, Schmidt D, Ostling M, Lindman M, Balint A, Hoeschele P (2021) Final results on detailed crash configurations from collisions expected to remain for automated vehicles, Deliverable 1.3, OSCCAR Project; Grant Agreement No 768947
- [5] Jakobsson L, Fornells A, Köhler A, Mayer C (2019) Test Case Matrix and selecting Demonstrator Test Cases; Deliverable D2.1, OSCCAR Project; Grant Agreement No. 768947
- [6] Hamacher M, Becker J, D'Addetta G A, Ostling M, Mayer C, Compigne S (2021) Final virtual design of advanced passenger protection principles, Deliverable 2.4, OSCCAR Project; Grant Agreement No 768947

- [7] Compigne S, Schiessler M, Dussinger S, Lancshire R, Hamacher M, Becker J, Mensa G (2021) Validation and demonstration of advanced passenger protection principles; Deliverable D2.5, OSCCAR Project; Grant Agreement No. 768947
- [8] Kleinbach C., Martynenko O., Promies J., Haeufle D., Fehr J. and Schmitt S.: Implementation and validation of the extended Hill-type muscle model with robust routing capabilities in LS-DYNA for active human body models, BioMedical Engineering OnLine (2017) 16:109, DOI 10.1186/s12938-017-0399-7
- [9] Peldschuss S et. al. (2021) Population of validated and robust passive HBMs, Deliverable 3.1, OSCCAR Project; Grant Agreement No 768947
- [10] Davidsson J et al. (2021) Validated and computationally robust active HBM, Deliverable 3.2, OSCCAR Project; Grant Agreement No 768947
- [11] Mayer C, Iraeus J, Meyer F, Mroz K, Huang Y, Noelle L, Lancashire R, Weber J (2021) Criteria and risk functions for prediction of injury risks in new sitting positions and new crash scenarios, Deliverable 3.3, OSCCAR Project; Grant Agreement No 768947
- [12] Klein C et al. (2021) Homologation scenario demonstration using advanced harmonized HBMs, Deliverable 4.3, OSCCAR Project; Grant Agreement No 768947
- [13] Eggers A, Peldschuss S, Dussinger S, Berger A (2021) Standardised procedure for validating a vehicle environment for VT, Deliverable 5.1, OSCCAR Project; Grant Agreement No 768947
- [14] Peldschuss S et. al. (2021) Standardised validation procedure for qualifying the HBM to be used for assessing effectiveness of pilot protection principles, Deliverable 5.2, OSCCAR Project; Grant Agreement No 768947

Ausbildung von Rettungskräften

Realitätsnahe Ausbildung mit Live Crash

Dr.-Ing. **Burkhard Scholz**,
IAV-Fahrzeugsicherheit GmbH & Co. KG, Großmehring;
Marco Pannhausen, Vetter, Lukas, IDEX, Zülpich

Zusammenfassung

Es ist klar: die Zahl der Elektrofahrzeuge wird kurzfristig deutlich steigen. Gleichzeitig stellt sich für Feuerwehren und Rettungskräfte die Frage, wie mit dieser neuen Technologie im Falle eines Unfalls umzugehen ist. Ein weiterer Aspekt für die Rettungskräfte ist die zunehmende Verwendung von hochfesten Stählen. Zwar gehören Rettungskarte und Rettungsschere heute zur Standardausstattung von Pkws und Feuerwehrfahrzeugen, aber der Umgang damit muss geübt werden.

Durch die Möglichkeit das Unfallgeschehen auf den Crashanlagen der IAV nachzustellen, ist die Idee entstanden, die Feuerwehren in der Ausbildung zu unterstützen. Einerseits ist es möglich hier Fahrzeuge real zu crashen und damit Deformationen zu erzeugen, die denen realer Unfälle entsprechen. Für die Rettung aus diesen Fahrzeugen kommen dann die neuesten Rettungsgeräte der Firmen Lukas und Vetter zum Einsatz. Zum anderen ist aufgrund der zahlreichen Crashversuche mit Hochvoltfahrzeugen umfangreiches Wissen zu diesen Fahrzeugen vorhanden. Diese Erfahrungen sollen ebenfalls im Rahmen des Lehrkonzeptes weitergegeben werden.

Abstract

It is clear: the number of electric vehicles will increase significantly in the short term. At the same time, the question for fire departments and rescue forces is how to deal with this new technology in the event of an accident. Another aspect for rescue forces is the increasing use of high-strength steels. Although rescue cards and rescue shears are now part of the standard equipment of cars and fire engines, the use of them needs to be practiced.

The possibility of recreating the accident scene on IAV's crash facilities has given rise to the idea of supporting fire departments in their training. On the one hand, it is possible to crash vehicles here in real life and thus create deformations that correspond to those of real accidents. The latest rescue equipment from the companies Lukas and Vetter is then used for the

rescue from these vehicles. On the other hand, extensive knowledge about these vehicles is available due to the numerous crash tests with high-voltage vehicles. This experience is also to be passed on as part of the training concept.

1. Einleitung



Bild 1: Übungsfahrzeug nach dem Aufprall

Ein Opel Omega (Baujahr 1998) rast mit 80 km/h auf den Baum zu. Die beiden Insassen rühren keinen Finger. Das Fahrzeug hat keine Möglichkeit auszuweichen. Mit lautem Knall prallt es gegen das Hindernis. Der Pfahl dringt auf der rechten Fahrzeugseite bis zum Federbeindohm ein, dann dreht sich das Fahrzeug um seine Hochachse. Die Teile des Vorderwagens fliegen in Sekundenbruchteilen in alle Richtungen davon, die Frontscheibe splittert komplett und die Fahrertür wird aufgeschoben. Für die Umherstehenden ist es sofort zu sehen: die Insassen sind eingeklemmt.

Doch obwohl die Zuschauer alle Rettungskräfte sind, bleiben sie ruhig an Ihren Plätzen. Dem einen oder anderen entfährt ein begeistertes „Wow“.

2. Hintergrund

In Deutschland gibt es derzeit 22.155 Freiwillige Feuerwehren und 105 Berufsfeuerwehren. Während letztere in Städten ab 100.000 Einwohnern aktiv sind, agieren die Freiwilligen Feuerwehren in der Fläche auf dem Land.

Gleichzeitig bekommt die technische Hilfeleistung einen zunehmenden Stellenwert bei den Einsätzen der Feuerwehren in Deutschland und Europa. 70% der Einsätze sind technische Hilfeleistung und nur hoch 30% gehören zu den klassischen Brandeinsätzen.

Der überwiegende Teil der Feuerwehren sind damit Organisationen, die auf dem Engagement von freiwilligen Helfern aufbauen. Diese Freiwilligen stehen tagsüber ihre Frau bzw. ihren Mann in den angestammten Berufen und engagieren sich bei Notfällen und in ihrer Freizeit im Rahmen der Freiwilligen Feuerwehr ihres Ortes. Damit auch dieser oft hoch motivierte Personenkreis im Einsatz, ebenso wie die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Berufs- und Werkfeuerwehren, eine professionelle Hilfeleistung geben kann, ist es erforderlich, diese Personen gezielt im Bereich der Technischen Hilfeleistung auszubilden. Je besser dabei die Randbedingungen sind, desto besser wird die Ausbildung gelingen.



Bild 2: Einsatzszenario in der Crash-Halle Großmehring Bayern

Aufgrund der aktuell vorherrschenden gesellschaftlichen Transformation ergeben sich nicht nur für die Entwickler in der Automobiltechnik neue technischen Herausforderungen, sondern auch für die Rettungskräfte. Neben dem Autonomen Fahren ist die Elektromobilität im automobilen Sektor in der Öffentlichkeit derzeit das beherrschende Thema. Aktuell wird die Elektromobilität durch die Politik sehr stark gefördert. Deshalb wird die Zahl der Elektrofahrzeuge kurzfristig deutlich steigen. Gleichzeitig stellt sich für Feuerwehren und Rettungskräfte die Frage, wie mit dieser neuen Technologie im Falle eines Unfalls umzugehen ist. Das hierzu fehlende Wissen führt dazu, dass sich Rettungskräfte nicht an havarierte Fahrzeuge heranwagen, z.T. mit verheerenden Folgen für die Insassen.

Ein weiterer Aspekt für die Rettungskräfte ist die zunehmende Verwendung von hochfesten Stählen. Zwar gehören Rettungskarte und Rettungsschere heute zur Standardausstattung von Pkws und Feuerwehrfahrzeugen, aber der Umgang damit muss regelmäßig geübt werden, zumal der Entwicklungsfortschritt hier aufgrund der Akku-Technologie ebenfalls stark voranschreitet.

Für den Betrieb einer Crashanlage sind bei laufendem Motor und bei vollelektrischen Fahrzeugen vorsorglich Maßnahmen für die Brandbekämpfung bzw. die Evakuierung von auffälligen Fahrzeugen erforderlich [1]. Die Automobilhersteller haben hierfür Ihre Werksfeuerwehren und auch die IAV Fahrzeugsicherheit GmbH & Co. KG hat ausgebildete Feuerwehrfrauen und –männer in ihren Reihen. Aufgrund von persönlichen Kontakten hat sich dann mit der Freiwilligen Feuerwehr in Großmehring eine für beide Seiten vorteilhafte Zusammenarbeit etabliert. So rücken die Feuerwehrrkräfte der IAV Fahrzeugsicherheit GmbH & Co. KG bei Einsätzen im Industriepark, in welchen sich die Crashanlage befindet, aus und können so die Rettungszeiten verkürzen. Auf der anderen Seite werden aber auch gemeinsame Ausbildungen durchgeführt, die sowohl bei den Rettungskräften der Freiwilligen Feuerwehr als auch bei denen der IAV Fahrzeugsicherheit GmbH & Co. KG mit großer Begeisterung aufgenommen wurden. Bei diesen Ausbildungsaktivitäten entstand die Idee, die intensive Ausbildung auch anderen Rettungskräften zugänglich zu machen [2].

3. Inhalt der Ausbildung

Kerninhalt der Schulungspakete ist es, praxisorientiert mit den modernsten Rettungsgeräten zu üben. Bei diesem Ausbildungstag kommen die neuesten Generationen an Rettungsgeräten (Akku-Technologie) zum Einsatz. Diese werden von den Firmen Lukas und Vetter zur Verfügung gestellt, so dass die Ausbildung im auf dem aktuellen Stand der Technik ist.

Begonnen wird der Tag mit einem Vortrag zu den Grundlagen der Fahrzeugsicherheit. Neben den historischen Hintergründen werden hier v.a. Crashstrukturen (z.B. Einsatz hochfester Stähle), Lösungsansätze zur Verringerung der Crasheschwere (z.B. Lastpfade, etc.) und moderne Rettungssysteme (z.B. eCall, etc.) vorgestellt, um den auszubildenden Teilnehmer ein besseres Verständnis zu geben, was bei einem Crash passiert, wo zur Rettung der Insassen angegriffen werden muss und welche möglichen Verletzungen die Insassen haben könnten. Danach erfolgt ein erster Live-Crash mit anschließender Crashanalyse durch erfahrene Versuchsingenieure der Fahrzeugsicherheit. Anhand des beim Versuch verwendeten Fahrzeugs werden dann noch einmal typische Versagensmechanismen, die Fahrzeugbeschädigungen sowie mögliche, aus dem Aufprall resultierende Verletzungen der Insassen und mögliche Gefahren für die Einsatzkräfte besprochen. Diese Analyse erfolgt mit Hilfe von High-Speed-Videos vom Aufprall und der Begutachtung der deformierten Fahrzeuge. Für den Versuch werden in aller Regel ältere Fahrzeuge verwendet. Das hat nicht nur wirtschaftliche Gründe, sondern es wird vor allem deshalb gemacht, weil bei älteren Fahrzeugen die Deformationen größer sind als bei modernen Fahrzeugen. Aus dem gleichen Grund werden Geschwindigkeiten genommen, die normalerweise höher als die gesetzlichen oder Verbraucherschutzanforderungen sind. Das wird so gemacht, da die Fahrzeuge im Anschluss für die Rettungsübung verwendet werden und eine größere Verformung mit eingeklemmten Insassen einen größeren Lerneffekt hat, als bei modernen Fahrzeugen mit intakter Fahrgastzelle und den geforderten Geschwindigkeiten.

Der nächste Ausbildungspunkt ist die reale Übung der Rettungsgeräte als Gruppe im Einsatz gemäß FwDV 3 (Feuerwehrdienstvorschrift), Teil 1 [3]. Hier erfolgt jetzt der Einsatz der von den Firmen Lukas und Vetter zur Verfügung gestellten Rettungsmitteln. Nach einer Vorstellung der Rettungsgeräte (Bedienung, technische Daten, Grenzen) und der Einweisung in die grundsätzliche Handhabung und das Arbeiten mit der Rettungskarte, werden die Teilnehmer zunächst schulmäßig den Einsatz am Unfallfahrzeug in der Gruppe üben.

Am Nachmittag wird dann ein zweiter Live-Crash mit erneuter, anschließender Crashanalyse durch erfahrene Versuchsingenieure der Fahrzeugsicherheit analog zum 1. Versuch durchgespielt.



Bild 3: Übung gemäß FwDV 3 mit neuestem Gerät

Bei der darauffolgenden Übung werden die Bedingungen verschärft. Hier sollen jetzt nicht nur die Geräte erprobt, sondern vor allem das Zusammenspiel in der Gruppe gemäß FwDV 3 (Teil 2) unter Zeitdruck trainiert werden. Es wird Einsatzlage VUEP (Verkehrsunfall eingeklemmte Person) durchgespielt. Gekennzeichnet ist diese Übung durch eine vorherige Einweisung, das Üben einer realistischen Einsatzlage und die Rettung der Insassen (dargestellt durch Crash-Test-Dummies) in der Einsatzgruppe. Dabei können die Ausbildungsteilnehmer rollieren, so das unterschiedliche Funktionen geübt werden können. Am Ende der Übung erfolgt ein Feedback zum Gruppeneinsatz durch die Ausbilder und Teilnehmer.

Diese grundlegenden Inhalte lassen sich je nach Ausbildungsziel anpassen, modifizieren und erweitern. So gibt s folgende Alternativen:

- Herausforderungen moderner Fahrzeuge:
hier werden zum einen alternative Antriebe (Gas- und Hochvolt-Fahrzeuge) sowie moderne Technologien (hochfeste Stähle, Carbon, etc.) näher betrachtet

- Der innere Retter
hier ist die Rettung der eingeklemmten Insassen im Focus der Ausbildung. Nach einem Vortrag über typische Verletzungsmuster und die Zusammenarbeit mit dem Rettungsdienst durch geeignetes Fachpersonal erfolgt der Schwerpunkt bei der sanitätsdienstlichen Versorgung der zu rettenden Insassen
- Führungskräfteausbildung
Diese Schulung richtet sich v.a. an Zug- und Gruppenführer (SIEGER-Regel), Hauptaugenmerk liegt auf der Führungsleistung der verantwortlichen Feuerwehrleute
- Einsatznachstellung
hier sollen besonders gut oder besonders schlecht verlaufene Einsätze nachgestellt und zum besser Verständnis der Einsatzanforderungen geübt werden
- Ausbildung mit dem eigenen Rettungsgerät
- Training bei Dunkelheit oder anderweitig erschwerten Randbedingungen

Darüber hinaus ist eine Schulung zur Brandbekämpfung von HV Fahrzeugen in Planung.

Prinzipiell können die Schulungen auch ganz individuell angepasst werden. Dazu gibt es neben den oben angesprochenen Alternative noch einzelne Module, die hinzugebucht werden können:

- Heben und Bewegen von Lasten, Sichern und Stabilisieren
- Aufrichten von (schweren) Fahrzeugen
- Physiologische Betreuung (KID, PSNV-E)
- Messen und Erden havariierter HV-Fahrzeuge
- Rettungseinsätze auf der Autobahn (Baustelle)
- etc.

Es ist kein Fehler, wenn freiwilliges Engagement und Lernen den Teilnehmern auch noch Spaß macht. Dafür sorgen in dem Ausbildungsprogramm nicht nur die gezeigten Crashversuche, die der Normalbürger nicht jeden Tag sehen kann, sondern auch das Bestreben theoretische Inhalte mit praktischen Übungen abzuwechseln, so dass die Aufmerksamkeit der auszubildenden Teilnehmer den ganzen Tag gewährt bleibt.

4. Partner

Um den Ausbildungsteilnehmern immer die neuesten Rettungsgeräte für die Übungen zur Verfügung stellen zu können, ist die IAV Fahrzeugsicherheit GmbH & CO. KG mit den Firmen Lukas und Vetter, die zur IDEX fire & safety Cooperation mit Sitz in Lake Forest (Illinois) gehören, eine Partnerschaft eingegangen.



Bild 3: Die Partner nach der Arbeit

Die Firma Lukas fertigt seit Ende der 1940er Jahre in Erlangen Hydraulikprodukte: zunächst nur im Bereich industrieller Anwendungen tätig, entwickelte LUKAS 1972 als erster Anbieter das erste hydraulische Schneidgerät für den Rettungseinsatz. Im Laufe der Jahre wurden die Rettungsgeräte weiter optimiert, im Jahr 2010 gelang LUKAS als erstem Anbieter die Entwicklung elektrohydraulischer Rettungsgeräte, die nun unabhängig von Schläuchen und Aggregaten die gleiche Leistung wie bisher nur aggregatbetriebene, rein hydraulische Geräte liefern. Die Rettungskräfte sind durch diese Mobilität viel flexibler und freier bei den unterschiedlichen Rettungsszenarien. Wenn die Batterie leer ist, wird der Akku schnell gewechselt, die Einsatzkräfte haben nicht mehr die großen und oft sehr schweren Aggregate im Schlepptau. 2019 kam die eWXT Serie. Diese Geräte können ohne Bedenken unter Wasser eingesetzt werden

und haben mit 9Ah außerdem den leistungsstärksten Akku weltweit, der sogar unter Wasser gewechselt werden kann.

Die 1964 als Großhandel für Feuerwehr- und Zivilschutz gegründete Firma Vetter in Zülpich produziert seit 1971 pneumatische Rettungsgeräte und Zelte für Feuerwehren und Sanitätsdienste auf der ganzen Welt. 2015 präsentierte Vetter die weltweit ersten 12 bar Mini Hebekissen. Zusätzlich wurden verbindbaren Hebekissen mit 10 bar eingeführt. Mit diesem Material können nicht nur Fahrzeuge vom Boden angehoben, sondern komplette Lastkraftwagen aufgerichtet werden. Die Firma Vetter hat sich schon länger darüber Gedanken gemacht, wie die richtige Handhabung Ihrer Produkte an die Anwender vermittelt werden können. So erfolgte 1992 die Einrichtung eines Ausstellungs- und Schulungszentrums in Langendorf und 2005 die Inbetriebnahme der neuen Trainingsakademie in Zülpich.



Bild 4: Standorte der LUKAS RESCUE LEAGUE

Die Zusammenarbeit mit den beiden Firmen geschieht im Rahmen der LUKAS RESCUE LEAGUE [4]. Dabei handelt es sich um ein Trainernetzwerk. Die unabhängigen Trainer sind im ganzen Bundesgebiet sowie den Niederlanden und Österreich verteilt und haben unterschiedliche Ausbildungsschwerpunkte. Alle Trainer sind untereinander gut vernetzt und können so die neuesten Methoden und Techniken zur Technischen Hilfeleistung vermitteln.

5. Vorteile der Ausbildung auf der Crashanlage

Die Crashanlagen der IAV Fahrzeugsicherheit GmbH & CO. KG können einen wichtigen Beitrag zu einer gelungenen Feuerwehrausbildung bieten. Üblicherweise erfolgt die Feuerwehrausbildung bei den Freiwilligen Feuerwehren vor dem eigenen Gerätehaus. Ein Schrottfahrzeug wird behelfsmäßig zerdrückt (mit dem Stapler oder Bagger des örtlichen Bauhofs) und dann für die Rettungsübung herangezogen.



Bild 4: Die Crashanlage der IAV Fahrzeugsicherheit GmbH & Co. KG

Auf der Crashanlage dagegen ist es nicht nur möglich, den Fahrzeugen reale Deformationen zuzufügen. Es können außerdem mehrere reale Unfall-Szenarien, wie z.B. einem nach einem Baumaufprall oder bei einem Böschungsunfall nachgestellt werden, um dann an den Fahrzeugen, die technische Hilfeleistung zu erproben und abzuarbeiten. In der Crashhalle lassen sich weiterhin Szenarien abbilden, wie sie z.B. an Autobahn Baustellen zu finden sind, sprich die beengte Rettung zwischen den begrenzenden Jersey - Barrieren. Da die Crashhalle auch mit

den großen Einsatzfahrzeugen der Feuerwehren (LF8 = Löschfahrzeug mit 8 Mann Besatzung) befahren werden kann, ist es so möglich von der Alarmierung über das Eintreffen am Unfallort, der Absicherung der Unfallstelle, der Erkundung der aktuellen Lage, der Einteilung der einzelnen Funktionen sowie der eigentlichen Rettung bis zum Abrücken der Mannschaft einen kompletten Einsatz abzubilden.

Darüber hinaus erlauben die klimatisierten Hallen eine wetterunabhängige Ausbildung. So ist es möglich auch im Sommer bei hohen Temperaturen über längere Zeit in voller Schutzausrüstung zu trainieren, ohne dabei das Ausbildungsergebnis stärker als nötig zu gefährden. Umgekehrt erlauben die Hallen auch im Winter ausbildungsgerechte Randbedingungen. Ein weiterer Vorteil ist, dass in der Halle bei Bedarf auch erschwerte Übungsbedingungen wie z.B. bei Rauch, Nebel oder in der Dunkelheit dargestellt werden können.



Bild 5: Theoretische Hochvolt-Ausbildung von Feuerwehrleuten

Aktuell werden zunehmend Versuche mit Fahrzeuge mit alternativer Antriebstechnologie wie z.B. Hochvolttechnologie oder Gasmotoren auf der Versuchsanlage gefahren. Dadurch besitzen die Mitarbeiter der IAV wertvolle Erfahrung im Umgang mit Hochvolt- Fahrzeugen, die sie

gerne an die Rettungskräfte weitergeben wollen. Aufgrund dieser Erfahrungen wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Zimmermann auch nach Lösungen gesucht, um die Gefährdung, die von einem Hochvolt-Fahrzeug für die Rettungskräfte ausgeht zu bewerten (freiprüfen) und entsprechend darauf reagieren zu können (erden).

Die Feuerwehrdozenten der IAV Fahrzeugsicherheit GmbH & CO.KG sind erfahrende Ausbilder und Führungskräfte von Berufs- und Freiwilligen Feuerwehren, so dass die Bedürfnisse und Anforderungen der Feuerwehren aus erster Hand bekannt sind. Die Zusammenarbeit mit den Firmen Lukas und Vetter, welche das neueste Material bereitstellen, garantiert, dass bei den Rettungsgeräten immer die neueste Technologie zum Einsatz kommt.

6. Quellenverzeichnis

- [1] Weinkopf, A; Scholz, B.; Mayr, F.; Hochmuth, C.: Hochvolt im Sicherheitsversuch. – ATZ elektronik: 05/2021: 1862-1791; Wiesbaden.

- [2] Santa, A.: Aus Crashtests lernen. – Feuerwehr · Retten Bergen Löschen.- 7-8/2021: 0500-6260; Merching.

- [3] Staatliche Feuerweherschule Würzburg: Projektgruppe Feuerwehrdienst-Vorschriften. Online: <https://www.sfs-w.de/projektgruppe-feuerwehr-dienstvorschriften/vom-afkzv-verabschiedet-und-zur-einfuehrung-in-den-laendern-empfohlen.html>, aufgerufen 28.09.2021.

- [4] Lukas: Lukas Rescue League. Online: <https://lukas.com/rescue/lukas-rescue-league>, aufgerufen am 28.09.2021.

VTEHIL – A novel Technology for assessing the Safety Performance of full Vehicles in ADAS and ADS Scenarios

Rainer Hoffmann, Shanghai Digauto Automobile Technology Co., Ltd.,
Jiading, Shanghai, China

Zusammenfassung

Die Gewährleistung der Sicherheit zukünftiger Automobile verändert ihren Charakter erheblich. Während die Sicherheit von Fahrzeugen mit menschlicher Führung (SAE Level 0 bis 2) für eine begrenzte Anzahl von Lastfällen für die passive Sicherheit und eine überschaubare Anzahl von potenziellen Unfallszenarien für die aktive Sicherheit bewertet wird, müssen automatisierte und autonome Fahrsysteme (SAE Level 3 und höher) ihre Sicherheitsleistung in einer im Grunde unendlichen Anzahl von Fällen nachweisen.

Der größte Teil der Arbeit wird durch numerische Simulationstechniken erledigt werden, zwei Bereiche müssen jedoch durch physikalische Tests weiter untersucht werden. Ein Bereich sind kritische Fälle und Grenzfälle, die bei der Datenerfassung auf der Straße möglicherweise nie vorkommen und daher sowohl bei der Algorithmenentwicklung oder dem KI-Training als auch bei der Validierung durch die Simulation fehlen. Der zweite Bereich, in dem weitere Tests durchgeführt werden sollen, ist die Validierung von physikalisch basierten Simulationsmodellen von Wahrnehmungssystemen, insbesondere unter verschiedenen Umgebungsbedingungen.

Zwar können einige dieser Tests auf Versuchsgeländen durchgeführt werden, doch sind der experimentelle Aufbau der Testfälle und ihre Reproduzierbarkeit schwierig bis unmöglich zu erreichen und die Kosten sind sehr hoch.

Die VTEHIL Technologie verlagert die Prüfung von ADAS- und ADS-Szenarien in ein Innenraumlabor. Durch die Positionierung des Gesamt-Fahrzeuges (VUT) auf einem beweglichen und drehbaren Rollenprüfstand, bei gleichzeitiger relativer Bewegung von Verkehr und Umgebung, kann das ADAS- oder ADS-System unter äußerst realistischen Bedingungen getestet werden.

Da die Hauptbewegungsrichtung des Prüflings wegfällt, ist der Platzbedarf erheblich reduziert. Der Prüfling nutzt alle seine Sensoren und Aktoren. Die Verkehrssurrogate, d.h. Fahrzeug- oder VRU-Targets, sind identisch mit denen, die heute bei Tests auf dem Prüfgelände verwendet werden. Parameter wie Straßenoberflächen, Fahrbahnmarkierungen oder

Infrastrukturkomponenten werden über den Prüfstand oder über elektronische Komponenten simuliert.

Umgebungsbedingungen wie Regen, Nebel, Beleuchtung usw. werden an die Erfordernisse der Testfallbeschreibung angepasst, die z. B. aus einer Szenario-Datenbank stammt.

Abstract

The assurance of safety for future automobiles is changing its nature significantly. While the safety of human-supervised automobiles (SAE Level 0 to 2) is assessed for a limited number of accident load cases for passive safety and a manageable number of potential accident scenarios for active safety, automated and autonomous driving systems (SAE Level 3 and above) will be required to prove their safety performance in a basically infinite number of cases. Numerical simulation techniques will do the majority of the work, however two areas will need to be further addressed by physical testing. One area are critical and edge cases which are potentially never encountered in road data collection, and are therefore both missing in the algorithm development or AI training and the validation by simulation. The second area for continued testing will be the validation of physics-based simulation models of perception systems, in particular under multiple environmental conditions.

While some of such testing may be done on proving grounds, the experimental setup of the test cases and their reproducibility are difficult to impossible to achieve and costs are prohibitive.

VTEHIL moves the testing of ADAS and ADS scenarios into an indoor laboratory. By positioning the full vehicle (VUT) on a movable and rotatable chassis dynamometer while moving traffic and environment at the relative speeds, the ADAS or ADS system can be tested under highly realistic conditions.

Due to the elimination of the main direction of motion of the VUT, the space requirements are significantly reduced. The VUT uses all its sensors and actuators. Traffic surrogates, i.e., vehicle or VRU targets are identical to the ones used today in proving ground testing. Parameters like road surfaces, lane markings or infrastructure components are simulated via the dynamometer or via electronic devices.

Environmental conditions, like rain, fog, lighting, etc., are adapted to the needs of the test case description e.g. coming from a scenario databases.

1. Introduction

Assurance of safety has been in the focus of automobile development for more than 60 years. Legal and consumer protection requirements are forcing automobile developers to systematically prove that certain potentially harmful events will not lead to an accident (in case of accident avoidance technology) or to an injury or death (in case of passive safety). The number of events considered for the safety assurance has, for practical reasons, been limited to a small subset of the highly complex reality. In passive safety we are typically considering around 100 load cases, like frontal crashes, side crashes etc. which mostly represent statistically relevant worst case scenarios derived from accident analysis.

In active safety, i.e. advanced driver assistance system related to safety, the number of scenarios and test cases is already significantly bigger. If we consider different worldwide assessments for Level 0 - 2 systems then the number is around 2,000 now, but is increasing quickly. [1]

Common to the current testing requirements in passive and active safety is the idea that with the limited number of tests the most likely accident events will be covered. For passive safety this assumption is valid as it's statistical relevance has been shown through accident analysis over the last 60 years. Furthermore the passive safety systems are activated only after an accident has occurred, which is a very rare situation [2]. For active safety the situation is different. Autonomous emergency system (AEB, ESS, LSS) are designed to support the driver in potentially unsafe situation. And although the tested scenarios cover a large amount of such unsafe situation, many more are not addressed. And autonomous emergency systems are not designed to cover 100% of the potential cases as they are only assisting the driver with the driver being the back-up. A good example is the much publicized crash of a Tesla into a turned-over truck on a highway in Taiwan [3]. The Tesla AEB system did satisfy all test cases it was designed for, e.g. the Euro NCAP assessments. However a turned-over truck is not included in such scenarios. So it was the drivers role to pay attention and initiate the braking, the driver has the full responsibility for the driving safety of the vehicle.

Moving to Level 3 and beyond the situation changes significantly as the responsibility for the driving safety in automated and autonomous modes is shifting from the driver to the vehicle. And it is clear that the assessments for driving safety of such vehicles or robots cannot be based on a limited number of scenarios or tests. There has been a lot of debate of what it takes to assure driving safety of the robot, e.g. number of scenarios, kms, unknown and unsafe cases etc. For simplifying things we just assume that it takes 100 million tests to assure the safety of Level 3 or higher automated driving systems (ADS). The problem is therefore of infinite complexity [4].

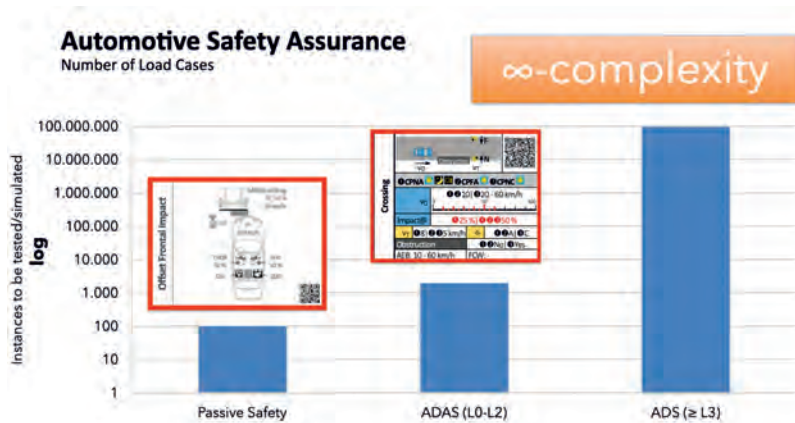


Fig. 1: Number of Load Cases/Instances in Safety Assurance of Vehicles (log-scale)

2. Functional Testing and Validation

It is obvious that the vast majority of these 100 million functional tests have to be virtual tests. The process to determine the individual tests or instances has been derived in the Pegasus project starting with a limited number of functional scenarios from which the instances to be tested are derived by suitable design of experiment (DOE) techniques [5]. The purpose of this paper is not to elaborate on this in detail but rather discuss what kind of real testing is needed to complement the virtual tests.

In particular the following areas will be reviewed in more detail here:

- **Validation of simulation models**
- **Environmental simulation**
- **Testing for Robustness**
- **Reproducibility of Proving Ground Testing**
- **Cost and Time of Proving Ground Testing**

These areas address both shortcomings of a virtual only approach as well issues of proving ground testing.

2.1.Validation of simulation models

Today most simulation is based on collected road data and variations of the collected data. Cars equipped with multiple sensor technologies are driving with the purpose of collecting data. These data are then used to develop and simulate new algorithms or AIs. The simulation is based on the collected data. However critical cases and or edge cases may never be part of the collected data despite millions of kms driven. This results in gaps in the training data for AI and obviously big gaps for safety relevant cases. Such gaps both of the known and unknown type need be tested and the resulting data is used for the simulation work.

2.2.Environmental simulation

The possible environmental conditions are unlimited and again road data collection will only be able to gather a subset of all possible data. Furthermore the determination of the exact environmental conditions is practically impossible. On the other hand physical simulation models of the perception systems are just starting to be developed and may be too compute-intensive to be used in large-scale simulation work.

2.3.Testing for Robustness

Robustness of ADAS and ADS safety functions is today assessed in very limited ways by generating multiple test cases for a specific scenario where e.g. speeds, overlaps and lighting conditions are varied. However the majority of parameters is fixed on one specific level and not varied at all. Targets are representing a single car, pedestrian or scooter come in a single size and color. Weather and road conditions are fixed at specific values. Optimizing perception systems on such narrow objectives will not lead to robust systems. The lack of robustness of Autonomous Emergency Braking (AEB) systems has been demonstrated by different organisations. [6,7]

2.4.Reproducibility of Proving Ground Testing

Proving ground testing is the first choice to validate ADAS/ADS functions for critical situations in real environments (Fig. 2). Using driving and steering robots for the VUT and targets, a high accuracy of their motion can be achieved. However reproducibility is very much dependent on the proving ground itself, weather and lighting conditions and even the team that performs the tests.

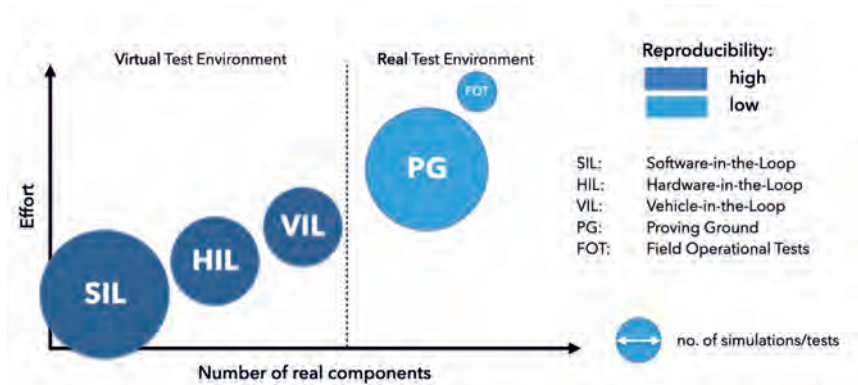


Fig. 2: Current Virtual and Real Test Environments

2.5. Cost and Time of Proving Ground Testing

The big advantage of virtual testing is the low cost per tested instance. On the other hand proving ground testing is very expensive. VUT, testing equipment and people have often been moved to remote locations only to find that the weather conditions do not permit testing. Typically the scenarios are set up in the morning and taken down in the evening which includes communication hardware, initial measurements, etc., [8].

3. In-door Testing with VTEHIL

In order to overcome the short-comings of proving ground testing while maintaining the closeness to the real world, a novel technology for assessing the safety performance of full vehicles in ADAS and ADS scenarios is proposed.

VTEHIL (Vehicle Traffic Environment Hardware-in-the Loop) is a vehicle-in-the-loop technology that allows the reproducible simulation of a fully equipped vehicle in an in-door laboratory. VTEHIL has been conceptualised, designed and built by Shanghai Digauto Automobile Technology Co., Ltd., Jiading, Shanghai, China and is patented technology [9].

A prototype in-door installation near Shanghai is used to further enhance and validate the technology. First platforms have been built and delivered to customers.

The road simulation platform is equipped with a four-wheel independent drive controlled dynamometer, which can realise independent longitudinal driving and lateral motion control. The platform can simulate the vehicle driving loads, such as acceleration, deceleration and

other load simulations. It can simulate the load for front-wheel, rear-wheel and four-wheel drive vehicles. It can also simulate the load of vehicle going uphill and downhill.

The platform can realize the independent lateral motion simulation of the test vehicle when changing lanes. For this the platform is equipped with a swiveling mechanism to achieve the rotation of the whole vehicle, which can realize the independent cross-swing motion simulation.



Fig. 3: The rotating and transversally moving Platform of VTEHIL.

The vehicle can be driven directly onto the test bench when performing the test, and only the body needs to be reliably connected to the test bench, without dismantling the tires or other structural parts of the chassis of the vehicle under test.

The vehicle steering front wheels have an independent steering load simulation function; the whole vehicle road test does not require the removal of the tires of the vehicle under test, as shown in Figure 3.

A dynamic steering force simulation mechanism allows the steering of the front wheels with an independent load simulation function. It can realize the vehicle fixed speed lane change driving motion control, and the two front wheels with moving steering, the maximum speed is not less than $45^\circ/\text{s}$.

Dynamic steering simulator shall be applied to achieve the steering wheel turning action of the vehicle which under test, and with other equipment such as chassis dynamometer system to restore the steering resistance of the vehicle during the driving process.

This system can accurately restore the steering resistance calculated and simulated by the simulation platform.

VTEHIL is highly scalable to the testing requirements. Depending on the type of scenarios the laboratory can differ in size (length and width), accommodating up to 5 lanes. The platform can be scaled to accommodate passenger vehicles and light trucks.

The technical specifications of the highly scalable VTEHIL platform are given in Table 1.

Table 1: Main technical Parameters of VTEHIL

Total laboratory floor space	120 - 300 × 15 - 40 (m)	The maximum speed of the tested vehicle	150 kph
Test bench area size	20 × 10 m	Maximum longitudinal relative speed	80 kph
Test bench layout	Underground	Maximum longitudinal relative acceleration of target	+ 0.6 g / - 0.8 g
Number of simulated lanes	up to 5	Lateral motion displacement range	0 - ± 4 m
Type of drive of the vehicle under test	Front-wheel drive, rear-wheel drive, 4w drive	Lateral motion speed range	0 - 3.5 m/s
Maximum mass of the VUT	3.000 kg	Maximum acceleration of lateral motion	0.6 g
Wheelbase width of the VUT	1.2 ~ 1.6 m	Rotational range of motion	± 45°
Wheelbase length of the VUT	2.3 ~ 3.0 m	Max. speed of rotational motion	30 °/s

4. Example Scenarios

VTEHIL has been designed for the validation of a large variety of different scenarios in the ADAS and ADS domain. The goal is to cover current scenarios as described by the different consumer testing programs (NCAPs) [10] as well as current and future legal requirements for ADS. Tests include among others AEB, ELK, BSD, Lane Change, Cut-in, Cut-out situations.

Validation of the technology has been carried out by comparing results of different scenarios/instances from proving ground (PG) testing and VTEHIL.

One major difference between PG and VTEHIL is obviously the difference in camera coverage. While in PG-testing, the main motion is the movement of the VUT, this movement does not exist in VTEHIL. Therefore the targets move with the relative speed between target and VUT as specified for a specific scenario/instance. Any camera coverage has to take this into account.

VTEHIL uses existing test and measuring technologies and processes which allows a smooth transition from PG Testing to In-door testing with VTEHIL. Positioning of the targets is realised via an in-door positioning system which replaces the commonly used GNSS/Inertial Systems.



Fig. 4: Comparison of Test with GVT on VTEHIL (upper) and Proving Ground (lower)

5. Discussion

VTEHIL allows the testing of critical scenarios in an in-door lab while maintaining the characteristic of proving ground testing. It uses the full production vehicle with all sensors and actuators (see table 2). Due to its design the installation of the VUT on the testing platform is realised in a short time.

Table 2: VTEHIL in Comparison to existing ADAS/ADS Validation Technologies

	SIL	HIL	VIL	VTEHIL	Proving Ground	Road Test
Road/Environment	simulated	simulated	simulated	surrogate	real	real
Traffic participants	simulated	simulated	simulated	surrogate	surrogate	real
Road side unit	simulated	simulated	real	real	real	real
Sensors	simulated	simulated	simulated	real	real	real
Controller	surrogate	real	real	real	real	real
Actuators	simulated	real	real	real	real	real
Vehicle Dynamics	simulated	simulated	real	real	real	real

VTEHIL complements the existing validation technologies by a providing reproducible testing in a fully controlled environment.

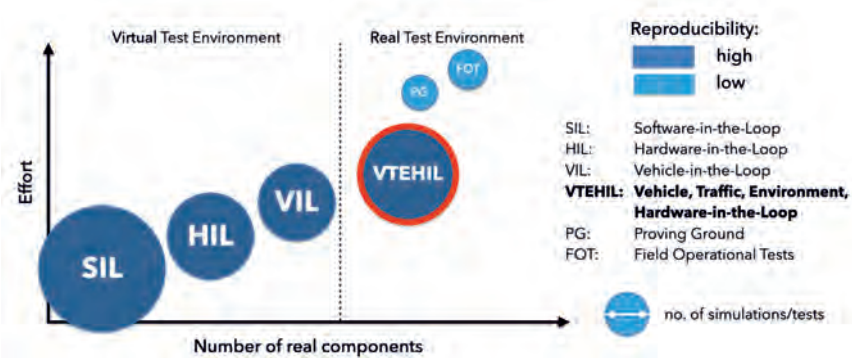


Fig. 4: VTEHIL adds Reproducibility to the Real Test Environments

One of the major advantages of VTEHIL becomes apparent once multiple scenarios are to be tested in a rapid sequence. The VUT is not moved and therefore has not be moved back to its starting position, resulting both in significant time savings and a safe operation as the number of object movements is radically reduced.

Furthermore no driver is needed to operate the VUT. It can be fully controlled by the HIL controller software.

6. Conclusion

VTEHIL takes ADAS/ADS validation from experiment to production by providing a reproducible, efficient, safe and secure testing environment which can be operated independent of environmental conditions.

Furthermore environmental conditions like lighting, rain and fog can be added to an in-door laboratory with VTEHIL moving ADAS/ADS validation from an uncontrollable to fully controllable environment.

- [1] Schädler, O. (2021): Euro NCAP 2023: AEB, ESS & LSS Vulnerable Road Users, Praxiskonferenz SafetyAssist.
- [2] Winner, H. (2017): Safety Assurance for Highly Automated Driving, TRB Annual Meeting, Washington D.C.
- [3] [forbes.com](https://www.forbes.com) (2020) Tesla In Taiwan Crashes Directly Into Overturned Truck, Ignores Pedestrian, With Autopilot On
- [4] Neurohr, C. et. al. (2021) Criticality Analysis for the Verification and Validation of Automated Vehicles, IEEE ACCESS 10.1109/ACCESS.2021.3053159
- [5] <https://www.pegasusprojekt.de/en/about-PEGASUS>
- [6] <https://www.aaa.com/AAA/common/aar/files/Research-Report-Pedestrian-Detection.pdf>
- [7] Cummings, M., Bauchwitz, B., (2021) Safety Implications of Variability in Autonomous Driving Assist Alerting, https://hal.pratt.duke.edu/sites/hal.pratt.duke.edu/files/u43/IEEE_Tesla_aug21.pdf
- [8] Golowko, K., (2021): The daily struggle on test track, SafetyTesting, Würzburg
- [9] US Patent US 10,801,924 Comprehensive Performance Test System for automated Driving Vehicles, Oct. 13, 2020
- [10] GLOBAL AEB TESTS 2021/2022, Poster by carhs.training gmbh

Outlier-Crash Detection at the BMW Accident Research Program

Dr. Valentin Protschky, Olaf Jung,
BMW Group, Munich

Zusammenfassung

Höchste Ansprüche an die (Fahrzeug-)Sicherheit sind für die BMW Group als Premium-Automobilhersteller selbstverständlich. Dazu gehört die kontinuierliche Weiterentwicklung und Verbesserung von Sicherheitskonzepten in einem ganzheitlichen Ansatz. Aufgrund dieser selbst auferlegten Anforderungen setzen wir modernste Methoden wie Simulation sowie obligatorische und freiwillige umfassende Crash-Vorversuche ein. Über die bekannten Standards hinaus beobachten, untersuchen und bewerten Spezialisten des BMW Group Unfallforschungsprogramms auch reale Unfälle, um mehr zu erfahren und einen noch breiteren Blick auf die Gesamtleistung von Fahrzeugen der BMW Group zu gewinnen und letztendlich die Fahrzeugsicherheit zu verbessern.

Zur kontinuierlichen Weiterentwicklung der BMW-Sicherheitskonzepte gehört auch eine kontinuierliche Verbesserung des BMW Crash-Untersuchungsprozesses im Rahmen des Unfallforschungsprogramms. Daher schlagen wir in diesem Beitrag ein Modell basierend auf maschinellem Lernen vor, das in der Lage ist, innerhalb kurzer Zeit eine hohe Anzahl von Fällen auf potenzielle Ausreißer bei der Airbag-Auslösung zu überprüfen. Das Modell wurde mit Parametern trainiert, die bei früheren Crashes aufgezeichnet wurden. In unserer Testumgebung mit künstlich erzeugten Ausreißerfällen weist das Modell hohe Genauigkeitswerte bei der Erkennung potenzieller Ausreißerfälle (80 % bis 99,9 %) auf, was seinen Nutzen für die weitere Verbesserung der Arbeit des BMW Group Unfallforschungsprogramms belegt.

Abstract

The highest expectations for (vehicle) safety is self-evident for the BMW Group as a premium car manufacturer. This includes the continuous development and improvement of safety concepts with a holistic approach. Because of these self-imposed requirements we employ state-of-the-art methods such as simulation as well as mandatory and voluntary comprehensive preliminary crash tests. Beyond the well-known standards, specialists within the BMW Group Accident Research Program also observe, investigate and asses real life accidents in order to

learn more and obtain an even broader perspective of the overall performance of BMW Group vehicles and eventually improve vehicle safety.

The continuous development of BMW safety concepts also involves a continuous improvement of the BMW crash investigation process within the Accident Research Program. Therefore, we propose in this paper a machine learning model that is able to screen an enormous number of cases for potential outliers in airbag deployment within seconds. The model has been trained by parameters that have been recorded at past crashes. In our test environment with artificially created outlier cases, the model exhibits high accuracy scores in detecting potential outlier cases (80% to 99.9%) providing evidence for its benefit in further improving the work of the BMW Group Accident Research Program.

Introduction

During the past decades, traffic fatalities in Germany, the US and other developed countries have been trending downwards. In Germany for example, the overall number of motor vehicle deaths has decreased from more than 21,332 people in 1970 to 3,170 people in 2017 [1]. Traffic fatalities in the US have been mostly plummeting for decades. According to the German Federal Statistical Office, possible reasons are traffic regulations, such as mandatory use of seat belts, speed limits, better emergency medical system (EMS) support or improved vehicle safety [1].

Vehicle manufacturers are continuously contributing significant safety improvements for a new car design. With the objective to avoid crashes and minimize accident consequences, such as injuries, BMW Group Vehicle Safety Divisions along with other car manufacturers develop and assess solutions for further enhancing the vehicle safety. In the past years, many innovative systems in the automotive sector (such as Dynamic Stability Control, Dynamic Traction Control, Active Cruise Control, Lane Keep Assist, Forward Collision Warning and Mitigation, Preventive Pedestrian Warning, among others) supported the overall goal to improve vehicle safety.

BMW Accident Research Program (ARP)

Nevertheless, the development of new systems and its assessment in full vehicle tests areas including crashes, is only one aspect of enhancing the safety of the driver and others involved in the accident. Prof. Klaus Kompass, former head of the BMW vehicle safety division, commented: *"Highest expectations for (vehicle) safety is self-evident for a premium manufacturer. What distinguishes our cars, is the continuous development of our safety concept with a holistic approach (Dt.: Höchster Anspruch an Sicherheit ist für einen Premiumhersteller*

selbstverständlich. Was unsere Fahrzeuge auszeichnet, ist die kontinuierliche Weiterentwicklung unseres Sicherheitskonzepts mit einem gesamtheitlichen Ansatz)".

A holistic approach includes the observation and investigation of real crashes as well as comprehensive preliminary crash tests. For this reason, the BMW Group Accident Research Program (ARP) investigates real life crashes where BMW vehicles are involved. The BMW Group ARP can be found in three markets: Germany (and ECE), US and China. Due to partnerships with local authorities as well as the Intelligent Emergency Call System (eCall), the BMW ARP gets informed on those accidents, where BMW vehicles are involved. "To enable rescue services to promptly provide the required care for those involved in the accident, the precise position of the vehicle, plus other data relevant for the rescue services, such as risk of severe injury, number of passengers, seat belt use, model and color of the vehicle is all sent from the vehicle automatically [2]" (depending on vehicle model).

Case selection

After EMS is finished at the scene, it is the responsibility of BMW ARP to decide whether a case is relevant for a detailed investigation by BMW experts - a quite challenging task supported by fixed process guidelines. From BMW Group's perspective, it has to be ensured that all BMW vehicles at least meet or exceed the requirements to provide protection for all that are involved in the crash.

Therefore, a detailed investigation of the relevant crash and reconstruction of the accident is necessary. Still, the challenge is to identify crashes showing for example:

- Anomalies in the accident's sequence
 - Atypical damage patterns
 - Specific injuries
 - Overall crash severity
 - Other anomalies
- ...



Fig. 1: Case Selection Process. Only a subset of crashes can be investigated in detail by BMW Group specialists.

The BMW ARP introduced a complex and comprehensive case selection process involving (not exclusively) the aforementioned aspects. Nevertheless, it is challenging to assess the relevance of a particular crash without having more details for that specific case. Even though typical parameters, such as DeltaV, Airbag Deployment, Final Rest Position (FRP) information are given as a first insight on the crash, many further aspects cannot be addressed without detailed analysis. More specifically, it is not possible to assess in advance, if a vehicle's safety system deviates from an assumed standard behavior. Let's give an example: a (fictive) front crash, results in a driver's side front airbag deployment and a curtain airbag deployment. Without a further inspection of that case, it is not possible to assess the airbag deployment strategy a priori for that particular crash. Should a driver's side knee airbag have been deployed? Was the deployment of the curtain airbag appropriate?

Aggravating this situation, an investigation of all crashes in which a BMW is involved is obviously not feasible due to the sheer number of cases all around the world. As shown in Figure 1, only a subset of cases can be addressed after the comprehensive case selection process. Again, only a subset of those cases is accessible, as there might be legal constraints, the lack of customer's consents or other limiting aspects such as the vehicle already being repaired before BMW ARP can access the vehicle.

In this paper, we propose a (Machine Learning) model that is able to detect possible anomalies (outliers) in crashes e.g. the airbag deployment. By selecting appropriate input data with the help of a preliminary exploratory data analysis, the model is able to implicitly learn the typical airbag deployment behavior in crashes. The high number of cases alongside with certain crash

values, that have been recorded by the BMW group, enables us to precisely train our model for the expected deployment behavior in all kind of crashes.

The advantage of the model lies in the availability to screen a enormous number of cases for potential anomalies within seconds.

In the remainder of this paper, we briefly categorize current work and present our outlier detection model in section II. Section III provides an evaluation of the proposed model. We review our results and suggest some extensions to this work in section IV.

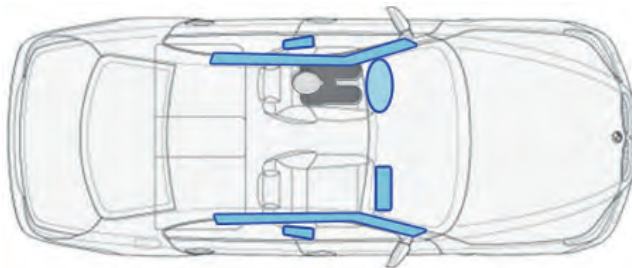


Fig. 2: Airbags: Driver Front, Driver Head (Curtain), Driver Knee, Driver Thorax, Passenger Front, Passenger Head, Passenger Knee, Passenger Thorax.

OUTLIER-CRASHES DETECTION

Motivation

The case selection process by BMW ARP, specialists can be supported and even made more efficient by being provided additional information on (probable) anomalies together with new cases provided by the Intelligent Emergency Call System. We chose the following design for updating the existing process: a large amount of (anonymous) past crashes data based on in-depth Accident Research exist (cf. Figure 3(1)). Based on this data, we train our outlier detection model on airbag deployment (cf. Figure 3(2)). With each new provided case (cf. Figure 3(3)), we input the data into the model and compare the results (cf. Figure 3(4)). If the model prediction deviates from the crash data, the BMW ARP specialists receive a notification to take special attention to that specific case.

Pattern Detection

In the following, we present possible features which proved to be suitable to describe our classification problem.

- Seatbelt status (belted / not belted)
- Vehicle basictype: type of vehicle (e.g. 118i)
 - Position of crash
- Drivetype (left-hand drive, right-hand drive)
- dvx: the (negative) acceleration caused by the crash in x-Direction
(delta-v in x-direction)
- dvy: the (negative) acceleration caused by the crash in y-Direction (side-crashes)
(delta-v in x-direction)
- overall dv: combined delta-v values after Pythagorean theorem
- Principal Direction of Force (PDOF): we compute the PDOF according to the simple equation: $\text{atan}\left(\frac{|dvy|}{|dvx|}\right)$

It was found that the features vehicle basic type, position, and drive type have no significant impact on model accuracy, which is why those features will not be considered further in this paper.

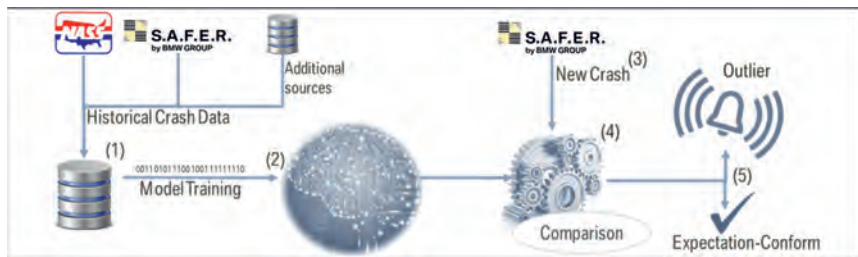


Fig. 3: Methodology: For model training, BMW-specific crash data and external crash data (e.g. NASS CDC [5] have been used. With each new case provided, a comparison with the trained model is conducted by the BMW Safety Analysis Framework for Evaluation and Research (S.A.F.E.R). If the model prediction deviates from the crash details, the BMW ARP specialists receive a notification to take special attention to that specific case.

Training the Random Forest Classifier

A number of Machine Learning models that can be applied to underlying problem already exist. From a Machine Learning point of view, the underlying task is a simple classification problem: predictions of airbag deployment or non-deployment should be assigned correctly to a real deployment, or respectively non-deployment. This task is ideal for Supervised Learning methods. Supervised learning is the task of inferring a function from labeled training data [3]. In our case, the information on airbag deployment status represents our label (or target function) we want to employ to optimize our model.

It was decided to pick a Random Forest Classifier as the Supervised Learning method, as this model is considered to be very effective on many datasets [4]. The model will be compared to a Support-Vector-Machine (SVM) model, which serves as Benchmark model.

Within the Random Forest Classifier method, several decision trees are constructed during the training phase using bootstrap aggregation, where each new tree is fit from a bootstrap sample of the training observations $z_i = (x_i; y_i)$. For this reason, it is advisable to evaluate the generalization accuracy of created Random Forest by computing the out-of-bag (OOB) error. In other words: by doing this, we want to avoid over-fitting to our training data. The OOB error is the average error resulting from using predictions from the trees that do not contain z_i in their respective bootstrap sample.

Number Estimators:

For performance reasons, it is useful to approximate a suitable number of estimators at which the (OOB) error stabilizes. In Figure 4, the measured OOB error for a different number of estimators is depicted. OOB scores for all models show a stable behavior. As the model computation time within a few seconds is acceptable, a number of estimators in the range of 60 to 90 is reasonable. To avoid over-fitting, 60 estimators as a lower boundary for the designed model were set.

Minimum Samples Leaf and minimum Samples Split:

The number of leafs and the number of splits of a Random Forest Tree was varied during the fitting process. To achieve a higher model accuracy, we varied the minimum number of leafs and minimum number of splits in order to meet our model performance requirements. Variations in the minimum Samples Leaf and minimum Samples Split show marginal improvements (cf. Figure 5). Eventually a minimum Samples Leaf of 5 and minimum Samples Split of 5 were identified as the best values.

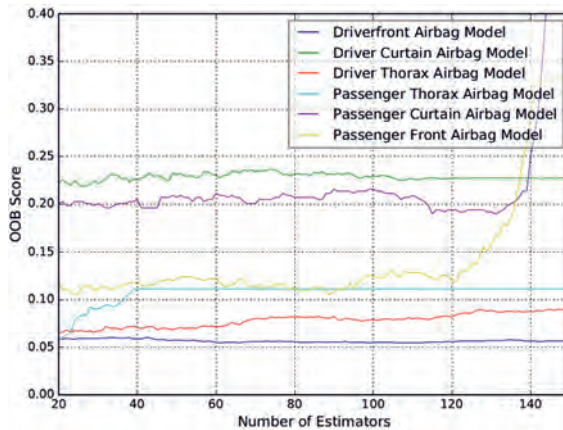


Fig. 4: OOB Score for all Outlier Prediction Models.

Feature Importance Scores:

To assess the relative importance of individual features regarding the predictability of the target variable, it is custom to use the relative depth/rank of a feature used as a decision node in a tree. Features used close to the root of the tree have a higher impact on the final prediction decision of the input samples. The expected fraction of the feature's contribution to an estimation can thus be used as an approximation to the relative importance of the features. Figure 6 shows the feature's relative importance scores. As expected, the Principal Direction of Force (PDOF) is an important feature for all models (first and third quartiles are closest to each other). The variables dv_x and dv_y show a high variance, as we can see a higher distance between first and third quartiles. This is due to the fact that the dv_x feature is more important for frontal airbag deployment models, the dv_y feature has more impact on side airbag deployment models. The feature 'belted' has a small impact on the models.

	Driver Front Airbag	Driver Thorax Airbag	Driver Curtain Airbag	Passenger Front Airbag	Passenger Thorax Airbag	Passenger Curtain Airbag
Accuracy:	93,70%	93,50%	75,40%	91,70%	93,10%	77,20%
Precision:	90,30%	90,30%	74,60%	85,20%	91,90%	68,30%
Recall:	95,50%	83,00%	74,40%	92,90%	78,10%	76,10%
f1:	90,60%	76,10%	72,70%	83,30%	87,30%	68,40%
	96,60%	65,30%	73,60%	95,00%	64,00%	71,30%
	93,60%	52,00%	73,70%	90,00%	51,90%	59,80%

Fig. 7: Evaluation: Accuracy, Precision, Recall and f1 scores for the Random Forest Classification (black) and Support Vector Machine (grey). The Random Forest Classification model outperforms the SVM model.

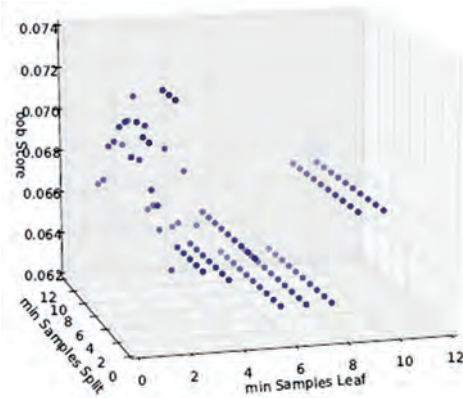


Fig. 5: OOB Score for the Frontal Airbag Deployment Model with varying minimum Samples Leaf and minimum Samples Split. The OOB Score is between 0.072 and 0.062 and shows its optimum at a minimum Samples Leaf and minimum Samples Split of 5 respectively. The behavior of the other models is comparable.

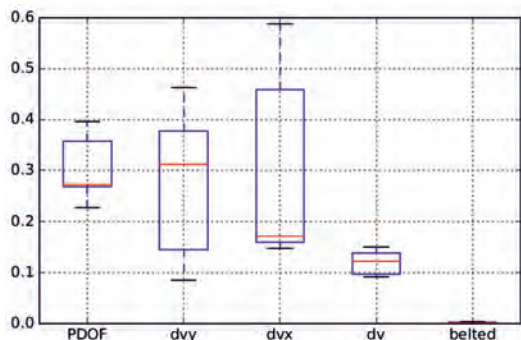


Fig. 6: Feature Importance. PDOF is an important feature for all models, as first and third quartils are closest to each other. The dvx feature is - not surprisingly - especially important for the driver front airbag model and passenger front airbag model, whereas the dvx feature is more important for the side airbag deployment models.

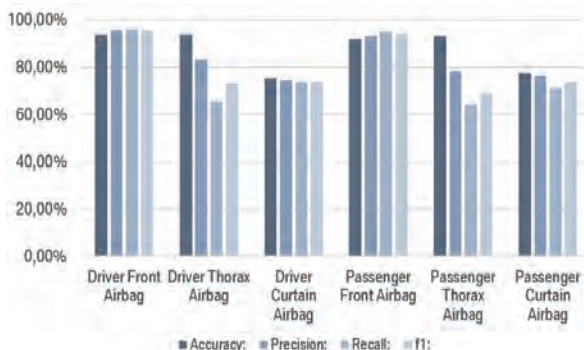


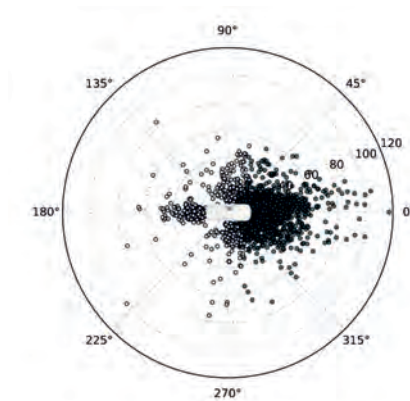
Fig. 8: Model accuracy: Plot of Accuracy, Precision, Recall and f1 scores.

EVALUATION

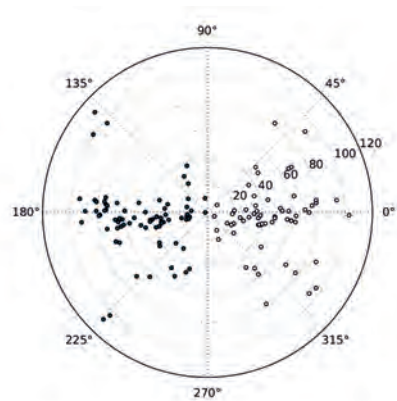
Model Accuracy

We evaluate our model by computing the accuracy, precision, recall and f1 score, the standard metric to evaluate classifier output quality. Precision (P) describes the number of crashes that were correctly predicted as cases where the airbag should have deployed (true positives T_p) over the number of true positives plus the number of false positives (F_p) (model has incorrectly predicted an airbag deployment): $P = T_p / (T_p + F_p)$ Recall (R) is defined as the number of true positives (T_p) over the number of true positives plus the number of false negatives (F_n): $R =$

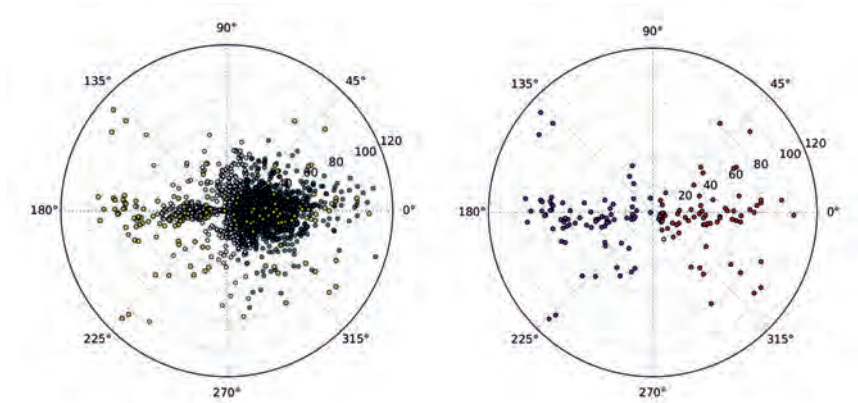
$T_p/(T_p + F_n)$. The f_1 score is the harmonic mean of precision and recall: $f_1 = 2(PxR)/(P + R)$. Figures 7 and 8 show the results. Driver front airbag deployment and passenger front airbag deployment can be classified with the highest metric values, whereas curtain airbag deployment shows the lowest scores. This can be explained with the different airbag deployment strategies. While a front airbag deployment is conducted especially in frontal crashes, a more complex deployment behavior like the curtain airbag deployment cannot be covered completely with the available features. Nevertheless, all models exhibit scores can be regarded as sufficient for a reliable source for pointing out potential anomalies in the airbag deployment strategy during a crash.



(a) PDF, dv and airbag deployment status of exemplary anonymized crashes.



(b) Artificially created outlier cases. The airbag either did not deploy in frontal crashes or did deploy in rear crashes.



(c) Test data set is a combination of test data and outlier case data: the artificially created outlier cases are colored in yellow.

(d) Outlier detection model applied to the combined cases. Red: according to the model, the airbag have deployed. Blue: the airbag should not have deployed. One outlier out of 96 artificially created outlier cases has not been detected.

Fig. 9: Outlier detection process for the driver frontal airbag. The figures display PDOFs (in degree), dv values (distance to center of the polar chart) and frontal airbag deployment status (black equals deployment, white equals non-deployment). A randomly chosen set of crashes (Figure 9a is combined with artificially created outlier cases (Figure 9b and Figure 9c). Figure 9d shows the outlier cases and prediction results. One outlier out of 96 artificially created outlier cases has not been detected.

Outlier Detection Accuracy

Although the results from Section III-A show that we are able to achieve a high model accuracy, the scores do not provide information on the model's accuracy on correctly detecting outliers. Because of that, we artificially create feature-value combinations that would be regarded as crash scenarios with anomalies: we randomly chose dvx values, dvy values, a 'belted' status and did assess the cases by our ARP specialists whether the respective airbags should have deployed, or not - and record exactly the opposite in the respective data set. An exemplary data set of artificially created outlier cases for the driver frontal airbag is shown in the polar chart of Figure 9b. The polar charts in Figure 9 display the features PDOF, dv and airbag

deployment status. The angular positions of each point corresponds to the Principal Direction of Force (PDOF) of crashes, radial position corresponds to the dv value of each individual crash. Grey-filled points represent crashes with airbag deployment, white-filled points are those without airbag deployment.

Figure 9a shows exemplary data on frontal crashes which serves as model testing data. Note that we have artificially added random noise to the displayed parameters (PDOF, and dv) for anonymity reasons.

Figure 9b displays the outlier cases, which the BMW ARP specialists have created artificially. The outlier detection model is applied to the combined data set including test data (Figure 9a) and outlier case data (Figure 9b). The combined data set is displayed in Figure 9c). In order to get a better understanding, the outlier cases are colored in yellow. We have set a ratio between outlier cases and test data of 3%, i.e. the combined set consists of 3% artificially created outlier cases. The model results are displayed in Figure 9d. The comparison of Figures 9b and 9c does not reveal significant deviations between the groundtruth outlier data and the predicted outlier cases. In fact, only one case was not detected as an outlier case by the model. We used the same procedure of artificially generating outlier cases, subsequently mixing them with non-outlier cases and applying the outlier models for all airbag deployment models: the BMW ARP specialists have designed feature values indicating anomalies for all six airbag systems.

The generated outlier cases were mixed with test data and the outlier detection performance was assessed by computing the accuracy, precision, recall and f1 score.

Figure 10 shows the results. The accuracy scores for the outlier detection in driver front airbag deployment and passenger front airbag deployment is nearly at 100%. Outliers in the driver thorax and passenger thorax airbag deployment can be predicted with accuracy scores by approximately 95%. The accuracy scores in detecting outliers of the driver curtain and passenger curtain airbag are between 80% and 85% at the lowest. This matches with our observation from section III-A where we stated that a curtain airbags deployment strategy cannot be completely covered by the available features. Still, we are assessing the accuracy of driver curtain outlier detection and passenger curtain outlier detection for indicating potential outlier cases. It is obvious, that the outlier detection accuracy scores are only representative to a certain extent. The model's outlier detection accuracy score directly depends on the method of how outlier cases have been determined by our specialists. However, there is no other method of assessing the outlier detection model's performance, since the focus is on outlier cases, which - as the name already suggests - extremely seldom occur.

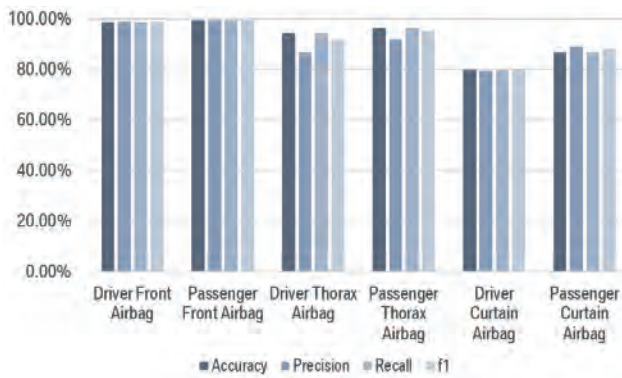


Fig. 10: Outlier detection accuracy: plot of accuracy, precision, recall and f1 scores.

CONCLUSION AND FUTURE WORK

The proposed outlier detection model is able to detect possible anomalies in airbag deployment for all airbag systems (Driver front, passenger front, driver thorax, passenger thorax, driver curtain, passenger curtain) with high accuracy scores. We were able to prove benefit of our outlier detection model by presenting its accuracy in detecting artificially created outliers. Outlier detection applied to cases with at least one airbag deployment is the first step in assisting BMW ARP researchers in their work. Additional Machine Learning models should be developed and deployed in later investigation steps, e.g. during the injury assessment in order to increase BMW ARP research effectiveness. With the information pertaining to the exact event of the accident and the resulting injuries, a model can be trained for assessing the most probable Maximum Abbreviated Injury Scale (MAIS), which will help identifying anomalies in the injury level as well.

REFERENCES

- [1] Statistisches Bundesamt, Zahl der Verkehrstoten sinkt im Jahr 2017 weiter – voraussichtlich um rund 1 %, Pressemitteilung, 7.12.2017 [Online]. Available: https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2017/12/PD17_442_46241.html
- [2] BMW Group Connected Drive, FOR ANY CIRCUMSTANCE. Intelligent Emergency Call. [Online]. Available: <https://www.bmw.com.au/offersand-services/connect-eddrive/digital-services/emergency-call>
- [3] Robert Layton, Learning Data Mining with Python, PACKT publishing, 2015
- [4] Colin Enachescu, Supervised Learning using an Active Strategy, The 7th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2013, 10-11 October 2013, Petru Maior University of Tirgu Mures, Romania. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313006634>
- [5] National Center for Statistics and Analysis, 400 Seventh Street, S.W., Washington, D.C. 20590, National Automotive Sampling System, 1997-2003 and 2004-2015. [Online]. Available: <https://www.nhtsa.gov/research-data/national-automotive-sampling-system-nass>

Vermeintlich unwichtig? Unfälle zwischen Pkw und Radfahrenden an Grundstückszufahrten

Dr.-Ing. **Matthias Kühn**, Dipl.-Ing. (FH) **Jenoe Bende**,
Dipl.-Ing. **Jörg Ortlepp**,
Unfallforschung der Versicherer, Berlin

Zusammenfassung

Im Jahr 2020 verunglückten 426 Radfahrende tödlich [1]. Absolut gesehen ist die Zahl der getöteten Radfahrenden über die letzten Jahre gesunken, trotz deutlich gestiegenem Anteil des Radverkehrs. Allerdings sank die Zahl nicht so stark wie die der anderen getöteten Verkehrsteilnehmer. Relativ gesehen ist der Anteil der getöteten Radfahrenden an allen Verkehrstoten in Deutschland sogar von 8,1% im Jahr 1991 auf 16% im letzten Jahr gestiegen. Unfallgegner Nummer eins ist der Pkw.

Mit Unfällen an Grundstückszufahrten, also Ein- und Ausfahrten, analysiert dieser Beitrag einen scheinbar kleinen Aspekt der verschiedenen Unfallszenarien des Pkw-Rad Unfalls. Dabei zeigen Unfalldaten, dass jeder fünfte Unfall zwischen Pkw und Radfahrenden an einer Grundstückszufahrt geschieht. Die dabei verunglückten Radfahrenden machen etwa 15% an allen Schwerverletzten oder Getöteten aus. Unter anderem deshalb ist es wichtig, die typischen Merkmale dieses Unfallszenarios zu verstehen und deren Vermeidungsstrategien zu untersuchen. Dazu werden die Daten der Unfalldatenbank der Versicherer (UDB) der Jahre 2002 bis 2015 analysiert. Diese Datenbank stellt einen repräsentativen Ausschnitt aller Kraftfahrzeug-Haftpflicht Schadenfälle in Deutschland mit Personenschaden und einem Schadenaufwand von wenigstens 15.000€ dar. Für die Analyse wurden 619 Fälle mit Beteiligung von Pkw und Radfahrenden analysiert. Zusätzlich wurden polizeilich erfasste Unfalldaten aus mehreren Bundesländern genutzt, um die Ergebnisse auf breitere Fallzahl abzustützen.

In mehr als der Hälfte der Unfälle verlässt der Pkw das Grundstück vorwärtsfahrend. Dabei handelt es sich in jedem vierten Fall, und damit am häufigsten, um Tankstellen gefolgt von Privatparkplätzen. Sicht Einschränkungen, und hier vor allem Hecken und Buschwerk, sind ein wichtiger Aspekt bei diesen Unfällen. Sie treten bei fast der Hälfte aller Fälle mit vorwärts-

herausfahrenden Pkw auf. Kommt es zu einer Kollision mit einem Pkw ist die rechte Seite des Fahrzeuges doppelt so häufig betroffen wie die linke Seite.

Die Analysen zeigen weiterhin, dass nur etwa 10% aller Unfälle zwischen Pkw und Radfahrenden an Grundstückszufahrten durch ein herkömmliches AEB System mit Radfahrererkennung vermieden werden könnte. Ein generisches Notbremssystem, deren Sensoren nicht durch die baulichen Sichthindernisse gestört wird, könnte ca. 29% der Unfälle an Grundstückszufahrten vermeiden. Diese alltägliche und vermeintlich nicht häufig auftretende Unfallsituation muss Bestandteil der Bewertung der AEB-Systeme werden, so wie es EuroNCAP bereits im Testprotokoll 2020 honoriert [2]. Der Beitrag zeigt und bewertet weiterhin, wie auch infrastrukturelle Maßnahmen (z.B. Sichtbeziehungen, Absetzen von Radwegen) diese Situation entschärfen können.

Abstract

In 2020, 426 cyclists were involved in fatal accidents [1]. In absolute terms, the number of cyclists killed has fallen over the last few years, despite a significant increase in the proportion of cyclists. However, the number did not decrease as much as the number of other killed road users. In relative terms, the share of cyclists killed in all traffic fatalities in Germany has actually risen from 8.1% in 1991 to 16% last year. The number one opponent in accidents is the passenger car.

With accidents at property access roads, i.e. entrances and exits, this article analyzes a seemingly small aspect of the various accident scenarios of car-bicycle accidents. Accident data show that every fifth accident between cars and cyclists occurs at a driveway. The bicyclists involved in these accidents account for about 15% of all serious injuries or fatalities. For this reason, among others, it is important to understand the typical characteristics of this accident scenario and to investigate their avoidance strategies. To this end, data from the Insurers Accident Database (UDB) from 2002 to 2015 are analyzed. This database is a representative sample of all motor vehicle liability claims in Germany with personal injury and a claim cost of at least 15,000€. For the analysis, 619 cases involving passenger cars and cyclists were analyzed. In addition, police-recorded accident data from several German states were used to base the results on broader case numbers.

In more than half of the accidents, the passenger car leaves the property moving forward. In every fourth case, and thus most frequently, these are gas stations followed by private parking

lots. Visibility restrictions, and here especially hedges and bushes, are an important aspect in these accidents. They occur in almost half of all cases involving forward-extending passenger cars. If a collision with a passenger car occurs, the right side of the vehicle is affected twice as often as the left side.

The analyses further show that only about 10% of all accidents between passenger cars and cyclists at driveways could be avoided by a conventional AEB system with cyclist detection. A generic emergency braking system, whose sensors are not interfered with by the structural sight obstructions, could avoid about 29% of the accidents at driveways. This everyday and supposedly not frequent accident situation must become part of the evaluation of AEB systems, as EuroNCAP already honors in the 2020 test protocol [2]. The article further shows and evaluates how infrastructural measures (e.g., sight relationships, setting down bike lanes) can also mitigate this situation.

1 Einführung

Im Jahr 2020 verunglückten 426 Radfahrende tödlich [1]. Absolut gesehen ist die Zahl der getöteten Radfahrenden über die letzten Jahre gesunken, trotz deutlich gestiegenem Anteil des Radverkehrs. Allerdings sank die Zahl nicht so stark wie die der anderen getöteten Verkehrsteilnehmer. Relativ gesehen ist der Anteil der getöteten Radfahrenden an allen Verkehrstoten in Deutschland sogar von 8,1% im Jahr 1991 auf 16% im letzten Jahr gestiegen. Unfallgegner Nummer eins ist der Pkw.

Auch wenn im Folgenden fahrzeugtechnische Maßnahmen im Vordergrund stehen, erfolgt am Ende des Beitrages auch eine interdisziplinäre Bewertung verschiedener Maßnahmen.

In 2020 gab es in Deutschland insgesamt 264.499 Unfälle mit Personenschaden¹. Rund 7% davon (17.424) ereigneten sich an Grundstücksein- oder ausfahrten (Grundstückszufahrt); die meisten davon innerorts (16.055; 92%). Bei diesen Unfällen starben 86 Personen, 62 innerorts und 24 außerorts. Innerorts wurde demnach jede elfte im Verkehr verunglückte Person bei einem Unfall an einer Grundstückszufahrt verletzt. Jeder 13. Verkehrstote innerorts steht im Zusammenhang mit einem Unfall an einer Grundstückszufahrt.

Um sich der Problematik der Radunfälle an Grundstückszufahrten zu nähern, wurden zunächst die polizeilich erfassten Unfalldaten aus mehreren Bundesländern für das Jahr 2019 analysiert. Dabei zeigte sich, dass bei den Unfällen mit Personenschaden U(P) an Grundstückszufahrten auffällig viele Radfahrende beteiligt sind. Während der Anteil Rad fahrender Personen an allen U(P) im Gesamtunfallgeschehen bei 29% liegt, liegt ihr Anteil an Grundstückszufahrten bei 45%.

Die Auswertung zeigt weiter, dass 19% der Radverkehrsunfälle Alleinunfälle sind. Von den 81% der Unfälle mit mehreren Beteiligten entfallen 75% auf eine Kollision zwischen Pkw und Fahrrad, 14% davon ereignen sich an Grundstückszufahrten (Tabelle 1). Bezogen auf Unfälle mit Personenschaden an Grundstückszufahrten haben Unfälle zwischen Pkw und Fahrrad hier einen Anteil von 39% und stellen damit die häufigste Unfallkonstellation an Grundstückszufahrten dar.

Tabelle 1: Polizeilich erfasste Radunfälle mit Personenschaden, 2019, mehrere Bundesländer, eigene Auswertung

Radunfälle mit Personenschaden 2019	Anzahl	Anteile	Anteile
Gesamt	53.568	100%	
Alleinunfälle	9.928	19%	
Unfälle mit mehreren Beteiligten	43.640	81%	100%
davon an Grundstückszufahrten	5.442	10%	12%
Unfälle mit Pkw	32.601	61%	100%
davon an Grundstückszufahrten	4.682	9%	14%

12% der in dem Untersuchungskollektiv vorhandenen 4.682 Unfälle mit Personenschaden zwischen Pkw und Fahrrad an Grundstückszufahrten haben schwere Verletzungen zur Folge. Von den beteiligten 9.470 Personen starben vier, 535 wurden schwer und 4.186 leicht verletzt. Das bedeutet 4% der Getöteten, 12% der Schwerverletzten und 15% der Leichtverletzten bei allen Unfällen zwischen Pkw und Fahrrad geschehen an Grundstückszufahrten.

Die häufigsten Ursachen bei Unfällen an Grundstückszufahrten sind Fehler beim Einfahren in den fließenden Verkehr (32%) oder beim Abbiegen (9% nach links, 7% nach rechts) gefolgt von Ungenügendem Sicherheitsabstand, Fehler beim Wenden oder Rückwärtsfahren und der verbotswidrigen Benutzung der Fahrbahn oder anderer Straßenteile (jeweils 6%). Die letzte Ursache beinhaltet im Wesentlichen Fehler von Radfahrenden wie das Befahren von Gehwegen oder das Fahren gegen die Fahrtrichtung.

Für vertiefende Untersuchungen der Unfallhergänge und Verletzungsmuster sind die polizeilich erfassten Unfalldaten aber nur bedingt geeignet. Daher werden im Weiteren detailliertere Daten ausgewertet.

2 Beschreibung des UDB Fallmaterials

Die hier vorgestellten weiterführenden Ergebnisse wurden mit Hilfe der Unfalldatenbank der Deutschen Versicherer (UDB) erstellt. Diese enthält eine geschichtete Stichprobe aller dem GDV gemeldeten Kraftfahrzeug-Haftpflicht-Schadensfälle und ist repräsentativ für das Schadensgeschehen der Deutschen Versicherer. Durchschnittlich werden ca. 500 - 1.000 Fälle pro Jahr in der UDB erfasst. Das Datenmaterial umfasst nur Unfälle mit Personenschaden und einem Schadenaufwand von mindestens 15.000 €.

Für die Analyse der Unfälle an Grundstückszufahrten wurden insgesamt 619 Unfälle mit Beteiligung von Pkw (inklusive Kleintransporter) und Radfahrenden herangezogen. Das untersuchte Fallmaterial erstreckt sich über die Unfalljahre 2002 bis einschließlich 2015.

3 Fallselektion und Relevanz im Unfallgeschehen

In einem ersten Schritt wurden in der UDB alle Pkw-Rad Unfälle vorselektiert (n=615). Diese Fälle machen ca. 60% aller Radverkehrsunfälle in der UDB aus. Daraus wurden insgesamt n=114 Unfälle identifiziert, bei denen der Konflikt zwischen dem Pkw und dem Radfahrenden an einer Grundstückszufahrt stattfand. Ausschlaggebend war dabei der Konflikt zwischen den beiden Unfallgegnern und nicht, ob es tatsächlich zu einer Kollision kam.

Wie der Tab.1 zu entnehmen ist, machen die Unfälle an Grundstückszufahrten 11% aller Rad-Unfälle (siehe Tabelle 1: 12%) und 18% aller Pkw-Rad- Unfälle (siehe Tabelle 1: 14%) in der UDB aus. Dies weist auf eine erste nennenswerte Relevanz im Schadensgeschehen der Versicherer hin und unterstreicht, wie repräsentativ die UDB im Vergleich zu den polizeilich erhobenen Unfalldaten ist (siehe Tabelle 1).

Des Weiteren zeigen die Analysen, dass bei diesen Unfällen die Radfahrenden immer verletzt wurden. Mit einem Anteil von ca. 15% an allen - gemäß amtlicher Definition [1] - schwerverletzten und getöteten Radfahrenden im Fallmaterial waren diese Verletzungen zudem häufig schwer.

Tabelle 2: Relevanz von Grundstückszufahrten hinsichtlich Unfälle sowie getötete schwerverletzte Radfahrende bezogen auf Pkw/Rad- sowie auf alle Radverkehrsunfälle

Alle Pkw (inkl. Kleintransporter)	Unfälle		Getötete und Schwerverletzte		Anteil (%) bezogen auf alle Rf-Unfälle (n=1.033)
	n	%	n	%	
Alle Pkw/Radfahrer Unfälle	619	100	407	100	60
davon im Bereich einer Grundstücksein- oder ausfahrt	114	18	62	15	11

Auch ein Blick auf die Verletzungsschwere nach MAIS (**M**aximum **A**bbreviated **I**njury **S**cale) in Abb.1 bestätigt dieses Bild [3]. Auf der einen Seite traten keine MAIS 0 Werte auf (MAIS 0 = unverletzt). Auf der anderen Seite trugen fast drei Viertel der Radfahrenden mindestens eine schwere Verletzung (MAIS 2+) davon.

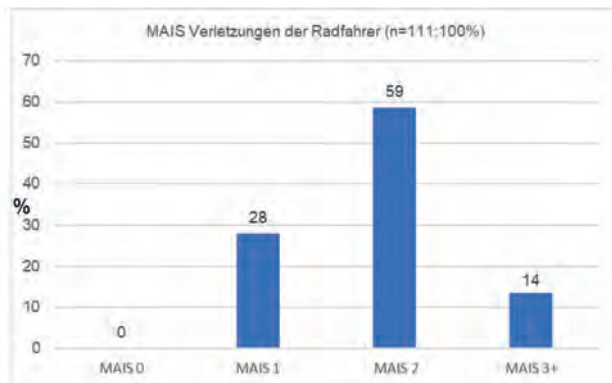


Bild 1: Verteilung der MAIS Werte des Radfahrenden bei Pkw-Rad Unfällen an Grundstückszufahrten

4 Struktur der Unfälle an Grundstückszufahrten

Um ein besseres Verständnis für die Unfälle zu bekommen, wurden diese zunächst in grobe Kategorien (Datenpools) aufgeteilt. Gemäß Abb.2 wurde danach unterschieden, ob einer der Beteiligten zum Unfallzeitpunkt das Grundstück verließ oder einfuhr und ob sich der Pkw dabei vorwärts oder rückwärts bewegte. Alle nachfolgenden und die in Abb. 2 gezeigten Zahlen beziehen sich zur besseren Übersichtlichkeit nur auf die Grundgesamtheit von n=114 Unfällen.

Der erste und größte Datenpool 1 (n=71; 62%) wird von „Unfällen beim Verlassen des Grundstücks durch den Pkw“ gebildet (Abb. 2). Diese lässt sich wiederum in zwei weitere Teilmengen unterteilen:

- Datenpool 1 a: „Pkw fährt vorwärts aus dem Grundstück heraus“ (n=62; 54%)
- Datenpool 1 b: „Pkw fährt rückwärts aus dem Grundstück heraus“ (n=9; 8%).

Weitere n=34 Unfälle (30%) konnten der Kategorie „Pkw biegt in das Grundstück ein“ zugeordnet werden (Datenpool 2). Die verbleibenden Fälle wurden dem Datenpool 3 „Radfahrender verlässt das Grundstück“ (n=8; 7%) zugewiesen.

Die Vielfalt der möglichen Unfallkonstellationen an Grundstückszufahrten weist darauf hin, dass bei der späteren Maßnahmenfindung aus fahrzeugtechnischer Sicht unterschiedliche Ansätze erforderlich sind, damit die Unfälle z.B. auch mit den passenden Fahrerassistenzsystemen adressiert werden (z.B. Notbremssystem mit Querverkehrsfunktion Front/Heck, Abbiegeassistent).

In den nachfolgenden Kapiteln wird nur auf die beiden größten Datenpools in den Unfalldaten eingegangen: Datenpool 1a „Pkw fährt vorwärts heraus“ (n=71; 62%) und Pool 2 „Pkw biegt in das Grundstück ein“ (n=34; 30%).

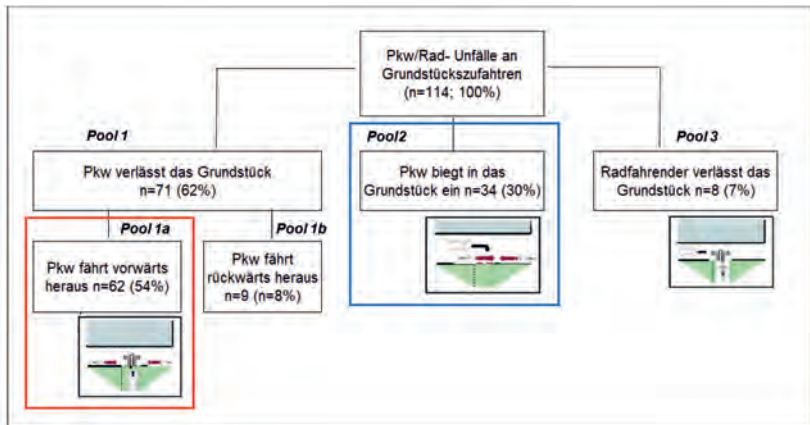


Bild 2: Unterteilung der n=114 Pkw/Rad- Unfälle an Grundstückszufahrten in Datenpools

5 Unfälle mit Pkw die ein Grundstück vorwärts verlassen

Für diesen Datenpool 1a (Abb. 2) wurden folgende fahrzeugtechnische und infrastrukturelle Aspekte analysiert:

- Unfallursachen
- Art des Grundstückes
- Sichteinschränkungen

Darüber hinaus wurde typische Unfallszenarien beschrieben. In einem letzten Schritt wurden Nutzenpotenziale für geeignete Fahrerassistenzsysteme berechnet.

5.1 Unfallursachen

Im Rahmen einer Einzelfallanalyse für den Datenpool 1a „Pkw fährt vorwärts heraus (n=62; 54%)“ wurden die Unfallursachen ermittelt.

Neben der Unaufmerksamkeit des Fahrers kommen an Grundstückszufahrten zwei weitere Aspekte zum Tragen:

- Sichteinschränkungen an der Grundstücksausfahrt und
- entgegen der vorgegebenen Richtung (falsch) fahrender Radfahrender.

Alkoholeinfluss, Dunkelheit und die erhöhte Geschwindigkeit des Pkw hatten bei diesen Unfällen keine Relevanz.

5.2 Art des Grundstücks

Für $n=57$ der Unfälle aus dem Datenpool 1a ($n=63$) konnte die Art des Grundstücks ermittelt werden. Die insgesamt fünf Grundstücksarten sind in Tab. 2 nach ihrer Häufigkeit aufgelistet. Dabei zeigte es sich, dass die im Datenmaterial enthaltenen Kleintransporter durchaus einen Einfluss auf das Ranking haben.

Werden Kleintransporter in die Analysen einbezogen, so treten die Grundstückszufahrten von Firmengeländen erwartungsgemäß etwas häufiger auf als andere Grundstücksarten (33%). Ohne Kleintransporter kommen im Ranking mit einem Anteil von je 26% an erster Stelle Tankstellen und Privatparkplätze, knapp gefolgt von Supermarktparkplätzen und Tiefgaragen (je-weils 14%).

Tabelle 2: Ranking der fünf ermittelten Grundstücksarten im Datenpool 1a (siehe auch Abb.2)

Art des Grundstücks	Mit Kleintransporter ($n=57$)	Ohne Kleintransporter ($n=42$)
Firmengelände	33 %	19 %
Tankstelle	23 %	26 %
Privatparkplatz	21 %	26 %
Parkplatz Supermarkt	12 %	14 %
Parkhaus/Tiefgarage	11 %	14 %

5.3 Sichteinschränkungen

In fast der Hälfte der Fälle aus dem Datenpool 1 a „Pkw fährt vorwärts aus dem Grundstück heraus“ wurde eine Sichteinschränkung dokumentiert ($n=29$; 46%). Dabei war dem Fahrer beim Verlassen des Grundstücks die Sicht zur Straße und zum unmittelbar vor der Grundstückszufahrt verlaufenden Radweg teilweise oder komplett versperrt. Die identifizierten

Sichteinschränkungen aus dem Datenpool 1a machen ein Viertel aller $n=114$ Unfälle an Grundstückszufahrten aus. Weil theoretisch auch in den anderen Datenpools aus Abb 2. Sichteinschränkungen auftreten können (hier nicht quantifiziert), liegt derer Gesamtanteil vermutlich höher.

Hecke und Buschwerk ($n=18$; 29% von Datenpool 1a) wurden als die häufigste Art der Sichteinschränkung genannt. Abb. 3 zeigt dazu einige Beispiele von Grundstückszufahrten. Die Analysen zeigten, dass sich die Pkw-Fahrer beim Verlassen des Grundstücks oft „vortasten“ musste. Wie in mindestens zwei Fällen dokumentiert wurde, kann dies bereits zum Unfall führen - auch wenn der Fahrer anhält und nicht weiterfährt - da der herannahende Radfahrende beim Erkennen der hinausragenden Pkw-Front durch Überbremsung stürzen kann.

Geparkte Fahrzeuge ($n=2$), Gebäudeteile ($n=3$) sowie Plakate/Schilder (2 Fälle) zählen ebenfalls zu den dokumentierten Sichteinschränkungen. Grundsätzlich können alle Arten von Grundstückszufahrten von Sichtbehinderungen betroffen sein (Abb. 4).

Die Bedeutung der Sichteinschränkung bei diesen Unfällen wurde auch von Baier et al. thematisiert [4].



Bild 3: Beispiele von ausgewählten Grundstückszufahrten mit Sichtbehinderung in Berlin (Quelle: UDV)

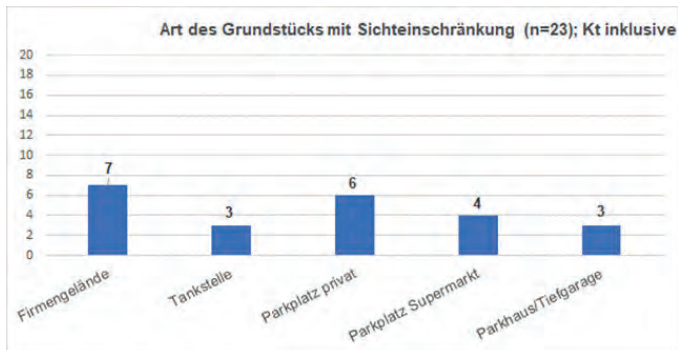


Bild 4: Verteilung der des Merkmals „Sichteinschränkung“ auf die Arten der Grundstückszufahrt

5.4 Unfallszenarien

Für $n=54$ ausreichend dokumentierte Fälle konnten insgesamt sechs typische Unfallszenarien abgeleitet werden. Diese werden durch die Merkmale „Fahrtrichtung der beiden Unfallgegner“ - beim Pkw jedoch nur die beabsichtigte Fahrtrichtung - sowie „Sichteinschränkung“ bestimmt (Abb. 5). Kleintransporter hatten keinen Einfluss auf die Häufigkeit der Unfallszenarien.

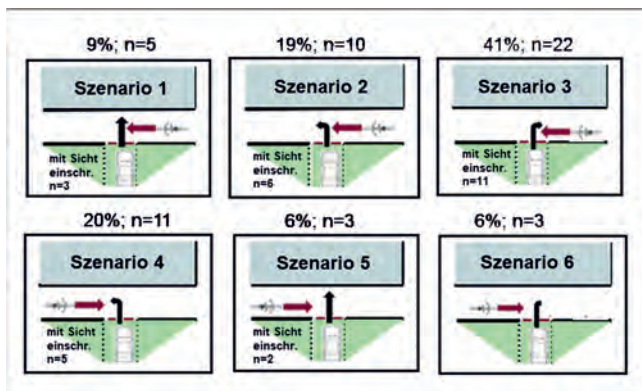


Bild 5: Unfallszenarien für den Datenpool 1a „Pkw fährt vorwärts heraus“

Mit einem Anteil von 41% dominiert das Szenario 3 bei dem der Pkw das Grundstück nach rechts verlässt und mit einem sich von rechts nähernden Radfahrender kollidiert. Dieses Szenario weist absolut gesehen auch die meisten Sichteinschränkungen auf (11 von 22 Fällen). Ein weiterer Hinweis für die schlechte Erkennbarkeit des Radfahrenden ist, dass in diesem Szenario bis auf einen Fall keinerlei Bremsung durch den Pkw erfolgte. Der Gesamtanteil der Fälle, bei denen der Pkw gebremst hatte, lag bei nur 18% im gesamten Datenpool 1a.

Fasst man alle Fälle, die sich durch die Bewegungsrichtung des Radfahrenden „von rechts kommend“ charakterisieren lassen, zusammen (Szenarien 1 -3), so machen diese fast 70% (n=37) der Fälle aus. In über der Hälfte dieser Fälle lag auch eine Sichteinschränkung vor.

Für die Unfälle, bei denen der Pkw mit einem von rechts kommenden Radfahrenden kollidiert, zeigten die Analysen zudem, dass in n=20 Fällen der Radfahrenden nachweislich entgegen der erlaubten Fahrtrichtung fuhr. Falsch fahrende Radfahrende machen insgesamt die Hälfte aller Szenarien im Datenpool 1 a und 19% aller Unfälle an Grundstückszufahrten aus.

Ein Blick auf die Anstoßstellen am Pkw bestätigt die hohe Relevanz der Unfälle, bei denen sich der Radfahrende von rechts näherte (Abb. 6). So wurde die rechte Seite des Fahrzeuges doppelt so häufig getroffen wie die linke Seite.

Analog früherer UDV Studien zum Thema Pkw-Rad Unfälle [5] hatte aber insgesamt gesehen der Pkw seinen Erstanstoß überwiegend mit der Fahrzeugfront. Dies zeigt nochmals die Bedeutung eines Notbremssystems als mögliche unfallvermeidende Maßnahme.

Des Weiteren konnte für n= 21 Fälle im Szenario 3 auch die Verkehrsfläche aus Sicht des Radfahrenden ermittelt werden. Es zeigte sich, dass nur zwei Radfahrende zum Unfallzeitpunkt anstatt des Radweges den Gehweg benutzen, wobei in einem Fall der Radfahrende vorher vom Fahrrad abgestiegen war.

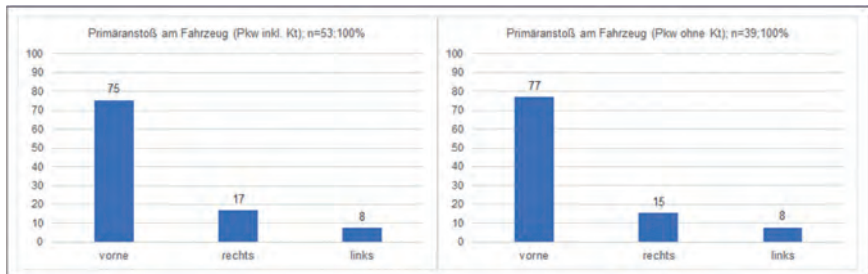


Bild 6: Erstanstoß am Fahrzeug bei Unfällen an Grundstücksausfahrten für Fälle mit vorwärts herausfahrendem Pkw (Datenpool 1a, Abb. 2) unterteilt nach Unfällen mit und ohne Kleintransporter

6 Unfälle mit Pkws die in ein Grundstück einbiegen

Nachfolgend werden Ergebnisse aus den Analysen zum Datenpool 2, also jene Unfälle, bei denen der Pkw während des Einbiegens in das Grundstück mit dem Radfahrenden einen Konflikt hatte, beschrieben (siehe auch Abb. 2). Aufgrund des teilweise niedrigeren Dokumentationsgrades können diese Unfälle nicht in dem Detaillierungsgrad beschrieben werden wie die Unfälle aus dem Datenpool 1 a. Auch eine Nutzenpotentialabschätzung von Fahrerassistenzsystemen im Sinne von tatsächlich vermeidbaren Unfällen war nicht möglich. Hier wird lediglich die positive Beeinflussbarkeit durch geeignete FAS aufgezeigt.

Eine erste Erkenntnis aus den Analysen war, dass sich diese in ihrem Ablauf von den sonstigen Abbiegeunfällen an Knotenpunkten grundsätzlich nicht unterscheiden. So lassen sich 29 der insgesamt 34 Unfälle aus diesem Datenpool gut mit Hilfe des dreistelligen Unfalltyps abbilden (Abb. 7).

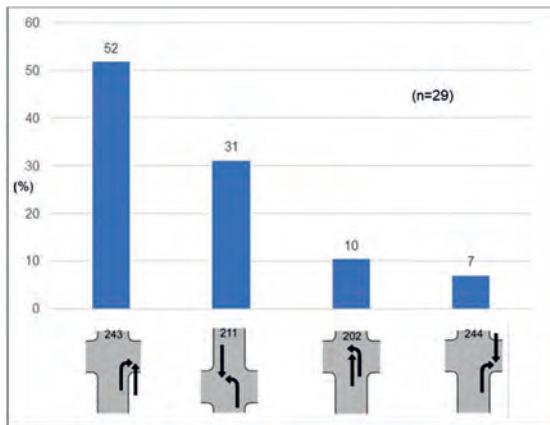


Bild 7: Kategorisierung der Unfälle mit einbiegendem Pkw an Grundstücksausfahrten anhand des dreistelligen Unfalltyps (Datenpool 2, siehe auch Abb. 2)

Mehr als die Hälfte dieser Unfälle wird durch den Unfalltyp 243 adressiert (52%; n=15). Hierbei handelt es sich um Unfälle, bei denen der Pkw nach rechts in das Grundstück einbiegt und mit dem rechts von ihm in gleicher Richtung fahrenden Radfahrenden kollidiert. Diese Unfälle lassen sich weiter wie folgt beschreiben:

- In 11 von 15 Fällen fand der Unfall bei Tageslicht statt.
- In 4 von 10 Fällen hatte der Pkw Fahrer gebremst.
- Die Pkw-Geschwindigkeit unmittelbar vor dem Unfall lag im Schnitt bei 10 km/h.
- Eine Sichtbehinderung durch parkende Fahrzeuge lag nur in zwei von 15 Fällen vor.
- In 12 von 15 Fällen hätte ein System mit der Funktionalität eines Abbiegeassistenten in Form einer Totwinkelwarnfunktion, einen positiven Einfluss auf den Unfall gehabt.

An zweiter Stelle des Rankings folgt mit 31% (n=9) der Unfalltyp 211, also jene Unfälle, bei denen der Pkw nach links in das Grundstück einbiegt und - hier den entgegenkommenden Radfahrenden - übersieht. Für diese Unfälle gilt:

- In sieben von neun Fällen fand der Unfall bei Tageslicht statt.
- In zwei von neun Fällen hatte der Pkw Fahrer gebremst.
- Die durchschnittliche Geschwindigkeit unmittelbar vor dem Unfall lag bei 20 km/h.

- Eine Sichtbehinderung durch parkende Fahrzeuge konnte in keinem der Fälle festgestellt werden.
- In acht von neun Fällen hätte ein System mit der Funktionalität eines herkömmlichen Notbremssystems mit Radfahrererkenennung einen positiven Einfluss auf den Unfall gehabt.

Für die verbleibenden 5 Fälle aus dem Datenpool 2 - Unfalltyp 202 und 244 - wird aufgrund der geringen Fallzahl auf die Beschreibung verzichtet. Es sei lediglich angemerkt, dass in beiden Fällen aus der Kategorie des Unfalltyps 244 („Pkw biegt nach rechts ein und kollidiert mit dem entgegenkommenden Radfahrenden“) ein positiver Einfluss durch ein Notbremssystem mit Radfahrererkenennung zu erwarten wäre. Hingegen ist für die n=3 Fälle des Unfalltyps 202 („Unfälle mit links einbiegendem Pkw, welcher mit einem von hinten kommenden Radfahrenden kollidiert“) nur mit einer vollständigen Rundumsicht ein Nutzen zu erwarten. Für einen Abbiegeassistenten wurde der seitliche Abstand zwischen Pkw und Radfahrenden als zu groß eingeschätzt, so dass diese Unfälle durch ein solches System nicht adressierbar wären.

7 Maßnahmen

Nachfolgend werden fahrzeugspezifische, infrastrukturelle und verhaltensbasierte Maßnahmen aufgezeigt. Auf fahrzeugtechnischer Seite werden die Nutzenpotenziale für Notbremssysteme quantifiziert.

7.1 Maßnahmen

Nachfolgend sind Maßnahmen aufgezeigt, die einen positiven Einfluss auf dieses Unfallszenario haben könnten:

Infrastruktur:

- Sicht herstellen und freihalten
Wesentlich für die Verbesserung der Verkehrssicherheit an Grundstückszufahrten ist eine gute Sicht der Verkehrsteilnehmenden aufeinander. Dazu sind die erforderlichen Sichtdreiecke von Sichtbehindernissen wie parkende Fahrzeuge, Bepflanzung oder Ainfbauten freizuhalten

- **Beschilderung/Markierung**
Um die Erkennbarkeit einer Radverkehrsführung an Grundstückszufahrten zu verbessern, eignen sich eindeutige und gut erkennbare Vorrangbeschilderungen („Vorfahrt achten“ oder „Halt“ u.U. mit Hinweis auf Radverkehr aus beiden Richtungen), deutliche Furtmarkierungen mit Sinnbildern Radverkehr und bei Bedarf flächig rot eingefärbte Furten.
- **Aufpflasterung /Schwellen**
Langsamere Geschwindigkeiten tragen zu mehr Aufmerksamkeit und im Falle eines Unfalls zu geringerer Unfallschwere bei. Zur Reduzierung der Geschwindigkeit bei der Ein- und Ausfahrt an Grundstückszufahrten können Aufpflasterungen, Anrampungen oder Schwellen verwendet werden.
- **Ampelgeregelte Ein- und Ausfahrten**
Bei Zufahrten mit hohem Verkehrsaufkommen können die ein-/ausfahrenden Fahrzeuge signaltechnisch vom querenden Fuß- und Radverkehr getrennt geführt werden. Dadurch werden die Konflikte, die zu Unfällen führen, vermieden.
- **Verkehrsspiegel**
An schwach belasteten Zufahrten, insbesondere im privaten Bereich, können Verkehrsspiegel zu einer besseren Sicht auf querenden Radverkehr beitragen, wenn die Sichtverhältnisse durch keine anderen Maßnahmen verbessert werden können.

Verhalten:

- Sensibilisierung der Pkw-Fahrer, dass sich Radfahrende aus beiden Richtungen nähern können
- Sensibilisierung der Radfahrenden bezüglich des Vorhandenseins von Grundstückszufahrten und die daraus resultierende Gefahr.

Fahrzeug:

- Notbremssystem mit Querverkehrsfunktion (Front/Heck)
- Abbiegeassistent
- Rundumsicht (Kamera)
- Car-to-bike (Kamera)

7.2 Nutzenpotenzial von Notbremssystemen

Bei den fahrzeugtechnischen Systemen unterscheidet man zwischen informierenden, warnenden und aktiv eingreifenden Systemen. Für die hier betrachteten Unfälle an der Grundstückseinfahrt ist allerdings nur ein aktiv eingreifendes System sinnvoll, da die örtlichen und zeitlichen Gegebenheiten des Unfalls keine Reaktion des Fahrers ermöglichen.

Für $n=47$ ausreichend dokumentierte Fälle aus dem Datenpool 1a (siehe Abb.2) wurde eine Nutzenpotenzialabschätzung im Sinne vermeidbarer Unfälle durchgeführt. Dazu wurden zwei Notbremssysteme, nachfolgend AEB/AEB+ genannt (AEB: Automatic Emergency Braking), betrachtet:

- herkömmliches Notbremssystem mit Erkennung von Radfahrenden (AEB), wie heute bereits auf dem Markt verfügbar ist [2]
- verbessertes Notbremssystem (AEB+), welches auf AEB aufbaut und deren Sensoren nicht durch die baulichen Sichthindernisse gestört wird (generisches System, siehe Beispiel Abb. 8).

Jeder Unfall wurde nach der „Was-wäre-wenn Methode“ analysiert und dahingehend geprüft, ob beim Vorliegen eines fehlerfrei funktionierendes AEB/AEB+ Systems der Unfall weiterhin stattgefunden hätte.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass keines der beteiligten Fahrzeuge im Fallmaterial mit einem Notbremssystem ausgestattet war. Fälle, bei denen der Radfahrende erschrak bzw. durch falsche Reaktion und ohne Kollision mit dem Pkw stürzte, wurden zudem für beide Systeme als nicht vermeidbar eingestuft.

Es ergeben sich die in Tab. 3 aufgelisteten Nutzenpotenziale. Ein herkömmliches System mit Erkennung von Radfahrenden (AEB) könnte knapp ein Viertel dieser Fälle verhindern. Ein generisches System (AEB+) wäre in der Lage, über 90% der $n=47$ relevanten Fälle aus dem Datenpool 1a zu vermeiden, wenn dessen Sensorik den Radfahrende trotz Sichteinschränkung frühzeitig erkennt und das Fahrzeug an der Weiterfahrt hindert (Abb. 8).



Bild 8: Schematische Darstellung eines erweiterten Notbremsassistenten mit Erkennung von Radfahrenden (AEB+), dessen Sensoren einen sich nähernden Radfahrende auch bei Sichtbehinderung erkennen

Bezogen auf alle $n=114$ Unfälle an Grundstückszufahrten bedeutet dies ca. 10% vermeidbare Unfälle durch ein herkömmliches System (AEB) und 39 %vermeidbare Unfälle durch ein verbessertes System (AEB+).

Tabelle 3: Nutzenpotentiale von AEB und AEB+ bezogen auf die Teilmenge aus Datenpool 1a ($n=47$) und auf alle Unfälle an Grundstückszufahrten ($n=114$).

Alle Pkw (inkl Kt)	Teilpool 1 a "Pkw fährt vorwärts heraus" ($n=47$; 100%)		Alle Unfälle an Grundstückszufahrten ($n=114$; 100%)	
	n	%	n	%
vermeidbar durch AEB	11	23	11	10
zusätzlich vermeidbar durch AEB+	+ 33	+ 70	+ 33	+ 29
insgesamt vermeidbar durch AEB+	44	93	44	39

8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Studie wurden $n=114$ Unfälle zwischen Pkw und Radfahrenden an Grundstückszufahrten untersucht. Ziel war es, die Charakteristik dieser Unfälle aufzuzeigen und daraus sinnvolle Vermeidungsstrategien abzuleiten.

Unfälle an Grundstückszufahrten machen 18% aller Unfälle zwischen Pkw und Radfahrenden und 15% der dabei getöteten und schwerverletzten Radfahrenden im Unfallmaterial aus. Bezogen auf alle Radverkehrsunfälle in der UDB beträgt ihr Anteil 11%. Dabei sind die Unfallfolgen für die betroffenen Radfahrenden oft schwer (70% MAIS 2+ Verletzte).

Der Schwerpunkt der Analysen lag bei jenen Unfällen, bei denen der Pkw das Grundstück vorwärts verließ. Diese machen 54% aller Unfälle zwischen Pkw und Radfahrenden an Grundstückszufahrten aus.

Die Analysen zeigten, dass bauliche Sichteinschränkungen - meist in Form von Hecken und Buschwerk - eine nennenswerte Rolle bei der Unfallentstehung spielen; diese machen ca. die Hälfte der Fälle mit vorwärts herausfahrendem Pkw aus oder ein Viertel aller Unfälle an Grundstückszufahrten aus.

In 19% der Fälle fuhr der von rechts kommende Radfahrende nachweislich entgegen der vorgesehenen Richtung. Sowohl bauliche Sichteinschränkungen als auch falsch fahrende Radfahrende erhöhen zusätzlich die Komplexität der Situation an Grundstückszufahrten und somit die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls. Aus den Analysen ging zudem hervor, dass die Benutzung des Gehweges anstelle eines Radweges hier kaum eine Relevanz hatte. Nur zwei von 21 Radfahrenden, die von rechts kamen und bei denen die Verkehrsfläche ermittelt werden konnte, hatten den Gehweg benutzt.

Aus fahrzeugtechnischer Sicht kommen in erster Linie Notbremssysteme mit Erkennung von Radfahrenden als unfallvermeidende Maßnahme in Betracht. Mit einem heute bereits verfügbaren System lassen sich aufgrund der genannten Problematik der Sichteinschränkung nur 10% aller Unfälle an Grundstückszufahrten tatsächlich vermeiden. Erst mit einem verbesserten Notbremssystem kann ein höheres Nutzenpotenzial in Form von 29% vermeidbare Unfälle erreicht werden, vorausgesetzt, die Sensoren des Systems werden durch bauliche Sichthindernisse nicht gestört.

Darüber hinaus können vor allem infrastrukturelle und das Verhalten beeinflussende Maßnahmen wirksam sein. Deren Vorteil im Vergleich zu fahrzeugtechnischen Maßnahmen ist, dass ihre positive Wirkung schneller erfolgt, da die Maßnahme nicht über mehrere Jahre in die Fahrzeugflotte einfließen muss. Der punktuelle Einsatz an Gefahrenstellen reduziert außerdem den Aufwand einer flächendeckenden Ausstattung der Infrastruktur.

9 Literatur

- [1] DESTATIS: Fachserie 8, Reihe 7. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2020
- [2] EuroNCAP: Test Protocol - AEB VRU systems, Version 3.0.4, April 2021
- [3] Association for the Advancement of Automotive Medicine: Course Training Manual, A specialized Course on: Injury Scaling: Uses and Techniques, Introducing The Abbreviated Injury Scale - 2005 Update 2008, Version January 2011. Barrington, Ill.: 2011
- [4] Baier, Michael et al.: Interdisziplinärer Ansatz zur Analyse und Bewertung von Radverkehrsunfällen. FE 82.0658/2016 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen Kurzbericht, Aachen, Dezember 2020.
- [5] Kühn, M., Bende, J., Lang, A.: Pkw Heck- und Seitenkollisionen mit Fußgängern und Radfahrern. Unfallforschung kompakt Nr. 71, Unfallforschung der Versicherer, Berlin, 2017.

Zusammenhang von Insassen-Verletzungsschwere und -Geschlecht: Belege für ein Gender Gap?

Dr.-Ing. Axel Malczyk, M.Sc. Sophie Kröling,
Unfallforschung der Versicherer, Berlin

Zusammenfassung

Seit einiger Zeit wird in der Gesellschaft unter dem Schlagwort „Gender Gap“ verstärkt diskutiert, ob unter den Adressaten von Forschung und Entwicklung Frauen gegenüber Männern unterrepräsentiert sind und ihre geschlechtsspezifischen Besonderheiten zu wenig Berücksichtigung finden. In diesem Zusammenhang wird auch beklagt, dass bei Crashversuchen fast ausschließlich Dummies auf Grundlage von anatomischen und biomechanischen Daten durchschnittlicher erwachsener Männer eingesetzt werden. Mehrere, zumeist auf NASS-CDS-Daten basierende Studien aus den USA haben für weibliche im Vergleich zu männlichen Pkw-Insassen Odds Ratios deutlich über 1,0 berechnet, MAIS2+ und MAIS3+ Verletzungsschweren zu erleiden. Dabei unterschieden sich die Studien hinsichtlich ihrer Randbedingungen, wie der betrachteten Sitzpositionen und Anprallrichtungen am Pkw, teilweise erheblich.

Ziel der vorliegenden Studie war, auf Grundlage von Unfalldaten aus Deutschland zu ermitteln, welchen Einfluss das Geschlecht auf das Risiko für schwerere Verletzungen von Pkw-Insassen hat. Dazu wurden einerseits Daten der amtlichen Unfallstatistik für weibliche und männliche Fahrer und Mitfahrende verglichen und andererseits 1.713 Pkw-Insassen im Fallmaterial der Unfalldatenbank der Versicherer (UDB) mittels multinomialer logistischer Regression hinsichtlich ihrer Verletzungsschwere nach Geschlecht, Sitzposition und Alter sowie Leergewicht und Erstzulassungsjahr der Pkw und der Anprallrichtung untersucht.

In Kollisionen ohne Unterscheidung nach Anprallart haben Frauen ein Odds Ratio von 1,021 im Vergleich zu Männern, eine MAIS2+ Verletzungsschwere gegenüber MAIS0-1 (unverletzt oder geringfügig verletzt) zu erleiden. Bei Beschränkung auf den Frontanprall beträgt das Odds Ratio für Frauen 1,125 im Vergleich zu Männern. Damit zeigen die Regressionsmodelle zwar die Tendenz, wonach Frauen einem höheren Risiko ausgesetzt sind, allerdings bei nicht signifikantem, erheblich geringerem Odds Ratio als in amerikanischen Studien. Deutlich stärkere und signifikante Effekte werden für die Beifahrersitzposition im Vergleich zur Fahrersitzposition, das Insassenalter und das Leergewicht erkennbar. Beim Heckanprall liefert das Modell nur eine geringe Varianzaufklärung mit fast durchwegs nicht signifikanten

Effekten für die betrachteten Variablen. Einzige Ausnahme ist das Geschlecht mit einem Odds Ratio von 3,345 für Frauen gegenüber Männern, verletzt zu werden (MAIS1+) verglichen damit, unverletzt (MAIS0) zu bleiben.

Abstract

Public debate about a so-called "gender gap" in research and development has spurred, among other issues, complaints that automobile crash tests employ almost exclusively dummies that represent an average sized adult male. Several studies from the U.S. have found odds ratios much higher than 1.0 for female occupants in comparison to male occupants to sustain MAIS2+ and MAIS3+ injuries, based mostly on accident data from NASS-CDS. However, those analyses differed considerably regarding which seating positions for occupants and crash directions of their vehicles were studied.

The present study is aimed at determining how gender affects the risk for car occupants to sustain moderate and serious injuries, based on accident data from Germany. On the one hand, national statistics accident data for female and male drivers and passengers were compared and, on the other hand, 1,713 car occupants from the German Insurers Accident Database (UDB) were analysed, using multinomial logistic regression methods. Beside injury severity and gender, data included seating position and occupant age as well as curb weight, year of registration and crash direction of the vehicle.

Regarding the total of all crash directions, females had an odds ratio of 1.021 in relation to males to sustain MAIS2+ injury severity in comparison to MAIS0-1 (no or minor injury). In frontal crashes only, females had an odds ratio of 1.125 in relation to males. The models demonstrated a tendency that females are at higher injury risk, however, the odds ratios were not statistically significant and considerably lower than those found in U.S. studies. Stronger and significant effects were found for the front passenger versus the driver position, for occupant age and vehicle curb weight. In rear impacts, the model provided only little variance clarification. With an odds ratio of 3.345, female in relation to male gender to sustain injuries (MAIS1+), compared to no injury (MAIS0), showed the only significant effect.

1. Einleitung

Im Rahmen einer allgemeinen gesellschaftlichen Debatte um Diversität und Teilhabe wird auch eine unzureichende Berücksichtigung geschlechtsspezifischer Eigenschaften von Menschen – dazu können anatomische oder physiologische Besonderheiten zählen – in Wissenschaft, Entwicklung und Normung kritisiert und dabei häufig mit dem Begriff „Gender Gap“ belegt. In diesem Zusammenhang sind auch die passive Fahrzeugsicherheit und ihre Bewer-

tungsmethoden auf den Prüfstand gestellt [1], [2]. Besonders ins Blickfeld geraten sind die derzeit noch verbreiteten und in Standard-Frontalcrashversuchen eingesetzten anthropomorphen Testpuppen der Generation Hybrid III, welche in der Ausführung 50th Percentile Male einen durchschnittlich großen und schweren Mann repräsentieren soll. Wenngleich für die Fahrzeugentwicklung und für Verbrauchertests zunehmend auch andere Dummies eingesetzt werden, darunter der 5th Percentile Female Dummy, um ein breiteres Spektrum von Körpergrößen bei Erwachsenen abzubilden, wurde doch Kritik laut, dass weibliche Insassen in der Pkw-Sicherheitsentwicklung unzureichend berücksichtigt seien [1], [2].

Studien, welche sich mit der Verletzungswahrscheinlichkeit von Frauen und Männern befassen, unabhängig vom geschlechtsspezifischen Risiko, als Fahrzeugnutzer in einen Unfall verwickelt zu werden, stammen in erster Linie aus den USA, wo Erhebungen deutlich höhere Fallzahlen von Verunglückten in Pkw liefern als in Europa oder in Deutschland.

Evans analysierte Daten des FARS (Fatality Analysis Reporting System) zu Straßenverkehrsunfällen mit Todesfolge in USA für die Jahre 1975 bis 1998 [3]. Mittels „double pair comparison“ wurden Unfälle mit zwei vorderen Insassen in einem Fahrzeug, von denen eine tödlich verletzt wurde, untersucht. Für gurtgesicherte Fahrer ermittelte Evans für Frauen im Alter von etwa 20 Jahren das 1,15-fache Risiko, tödlich verletzt zu werden, verglichen mit gleich alten Männern. Für ungegurtete Frauen auf dem Fahrersitzplatz betrug das Risiko das 1,36-Fache. Ab etwa 50 Jahren war das Risiko für beide Geschlechter gleich hoch und im Seniorenalter gab es Hinweise auf ein etwas geringeres Risiko für Frauen. Für die Sitzposition auf der Beifahrerseite waren die Ergebnisse weniger eindeutig, zeigten für Frauen aber auch eine Tendenz zu höherem Risiko eines tödlichen Ausgangs.

Bose et al. werteten Daten des NASS-CDS (National Automotive Sampling System) in USA der Jahre 1998 bis 2008 für gurtgesicherte, verletzte Fahrer ab 16 Jahren in Pkw, einschließlich „Vans“ und „Light Trucks“, aus [4]. Weibliche Fahrer waren mit einem durchschnittlichen Alter von 36,7 Jahren unwesentlich älter als männliche (36,4 Jahre), mit 164,2 cm (versus 177,8 cm) und 68,0 kg (versus 83,9 kg) aber erheblich kleiner und leichter. Frauen verunglückten deutlich häufiger in konventionellen Pkw (74% versus 61%) und seltener in Light Trucks (3% versus 18%) als Männer. Eine multivariate logistische Regression ergab für Fahrerinnen ein Odds ratio („Chancenverhältnis“) von 1,71 für MAIS2+ und von 1,47 für MAIS3+ Verletzungsschwere im Vergleich zu männlichen Fahrern. Ungewöhnlich erscheint allerdings die Verteilung der Anprallarten im Datenmaterial mit knapp 3% Frontal-Crashes, aber etwa 43% Seiten-Crashes und 23% Heck-Crashes.

Forman et al. stützen sich in ihrer Studie von 2019 wiederum auf NASS-CDS, diesmal mit Daten der Jahre 1998 bis 2015 [5]. Sie betrachteten gurtgesicherte Fahrer, Beifahrer sowie

Mitfahrende in der zweiten Sitzreihe in Pkw mit frontalem Anstoß. Dabei lag der Schwerpunkt der Analyse auf AIS2+ Verletzungen in unterschiedlichen Körperregionen bei neueren (Modelljahre ab 2009) und älteren Fahrzeugen (Modelljahre bis 2008) sowie den Risiken für MAIS2+ und MAIS3+ Verletzungen bei weiblichen und männlichen Insassen. Eine multivariate logistische Regression ergab für weibliche Insassen ein Odds Ratio von 2,42 für MAIS2+ und 1,73 für MAIS3+ Verletzungsschwere in Relation zu männlichen Insassen. Auffällig war bei Frauen ein Odds Ratio von 3,05 für Verletzungen der unteren Extremitäten. Darüber hinaus zeigten sie Odds Ratios um 2,0, verglichen mit Männern, für AIS2+ Verletzungen der Halswirbelsäule und des Abdomens sowie AIS3+ Rippenfrakturen.

Ebenfalls auf Grundlage von NASS-CDS-Daten der Jahre 1998 bis 2015 analysierten Brumbelow et. al. [6] mittels logistischer Regression das Verletzungsgeschehen gurtgesicherter Fahrer beim Frontalanprall sowie stoßzugewandt sitzender Insassen der ersten Sitzreihe im Seitenanprall unter Berücksichtigung mehrerer Unfall- und Fahrzeug-bezogener Variablen wie Fahrzeugkategorie und „kompatibler“ Kollisionskonfigurationen zwischen Unfallgegnern. Während sich für weibliche Fahrer bei Analyse aller Frontanpralle Odds Ratios von 3,11 für MAIS2+ und 1,92 für MAIS3+ in Relation zu männlichen Fahrern ergaben, reduzierten sich diese, wenn nur „kompatible“ Crashes mit Airbagauslösung betrachtet wurden, darunter Alleinunfälle von Pkw, Front-Heck-Kollisionen und Front-Front-Kollisionen zwischen Pkw mit Massendifferenzen von weniger als 454 kg. Für weibliche Fahrer ergaben sich dann immer noch Odds Ratios von 2,23 für MAIS2+ Verletzungsschwere sowie von 1,95 für AIS2+ Verletzungen der oberen Extremitäten und 2,72 für AIS2+ Verletzungen der unteren Extremitäten. Hinsichtlich Verletzungen anderer Körperregionen und MAIS3+ Verletzungsschwere unterschieden sich weibliche und männliche Fahrer hingegen nicht mehr signifikant. Beim Seitenanprall waren die Ergebnisse uneindeutig und nicht signifikant mit Odds Ratios von 0,92 für MAIS2+ und 1,55 für MAIS3+ für weibliche gegenüber männlichen Insassen. In den Fahrzeugkategorien „Car“ und „Pick-up“ fuhren Männer im Median um etwa 40 kg schwerere Fahrzeuge als Frauen.

Linder et al. geben vor diesem Hintergrund in ihrer Arbeit zunächst einen Überblick über die Verwendung verschiedener anthropomorpher Testpuppen insbesondere in europäischer Gesetzgebung und Verbrauchertests [2]. Sie zeigen auf, dass Dummies, welche einen durchschnittlich großen Mann repräsentieren, in den gängigen Crashtests am häufigsten eingesetzt werden und der 5th Percentile Female Dummy in der ECE-Regelung lediglich beim Frontcrash nach ECE-R137 auf dem Beifahrersitz als Repräsentant einer kleinen erwachsenen Insassin vorgesehen ist. Die Autoren fordern die Entwicklung eines Dummys, der eine durchschnittlich große Frau darstellt, und verweisen auf Ansätze für einen 50th Percentile

Female BioRID (Biofidelic Rear Impact Dummy) zum Test von Sitzen hinsichtlich des Schutzes gegen Distorsion der Halswirbelsäule beim Heckanprall.

Aus Deutschland stammende Studien befassten sich vorrangig mit Zusammenhängen zwischen dem geschlechtsabhängigen Fahrverhalten und Risiko, als Fahrer und Fahrerin oder Mitfahrende einen Unfall zu verursachen oder darin verwickelt zu werden [7], [8], oder sind, wie die Sonderauswertungen des Statistischen Bundesamtes [9], rein deskriptiver Art. Jüngere Forschungsarbeiten, die das geschlechtsspezifische Verletzungsrisiko unabhängig vom Unfallrisiko untersuchten, sind aus dem deutschsprachigen Raum hingegen nicht bekannt. Eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus USA auf europäische Verhältnisse kann dabei nicht unmittelbar vorausgesetzt werden, weil sich nicht nur die Fahrzeugflotten und das Unfallgeschehen, sondern zum Teil auch die anthropometrischen Merkmale der Fahrzeuginsassen, beispielsweise beim Anteil von Adipositas in der Bevölkerung, unterscheiden können [10]. Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, Unfall- und Verletzungsdaten aus Deutschland dahingehend zu analysieren, inwieweit sich Verletzungswahrscheinlichkeiten bei weiblichen und männlichen Pkw-Insassen unterscheiden und Hinweise auf ein „Gender Gap“ auch in der hiesigen Fahrzeugflotte liefern.

2. Methode

Die beschriebene Aufgabe wurde mit zwei unterschiedlichen Methoden adressiert. Zum einen wurden die frei verfügbaren Daten des Statistischen Bundesamtes zur Anzahl verunglückter Pkw-Insassen, unterschieden nach Geschlecht, verarbeitet, die auch eine Betrachtung der Entwicklung über einen längeren Zeitraum gestatten. Zum anderen wurden Daten der Unfalldatenbank der Versicherer (UDB) analysiert. Diese umfassen zusätzlich zum Geschlecht der Insassen und ihren Verletzungen unter anderem auch Merkmale zur Unfallmechanik und fahrzeugbezogene Eigenschaften.

Für eine allgemeine Betrachtung der Verletzungsschwere von Pkw-Insassen und ihre zeitliche Entwicklung eignet sich die amtliche Statistik. Im Jahrbuch „Verkehrsunfälle“ [11] des Statistischen Bundesamtes, Tabelle UJ 10, werden alle verunglückten Insassen von Personenkraftwagen ausgewiesen, unterschieden nach der amtlichen Verletzungsschweredefinition in „Getötete“ (Tod nach Unfall innerhalb von 30 Tagen), „Schwerverletzte“ (unmittelbar nach Unfall für mindestens 24 Stunden stationär aufgenommene Verletzte) und „Leichtverletzte“ (alle übrigen Verletzten). Ferner erfolgt eine Unterteilung in Altersscheiben von je fünf Jahren, bei Jugendlichen und Heranwachsenden noch weiter differenziert. Verunglückte ab 75 Jahren sind in einer Gruppe zusammengefasst. In Tabelle UJ 37 erfolgt zusätzlich noch die Aufteilung zwischen Fahrern und Mitfahrenden. Letztere umfassen neben

Insassen auf dem Beifahrersitz auch Personen im Fond des Fahrzeugs. Diese Daten werden für die Statistikjahre 1999 und 2019 verglichen.

Genauere Informationen zu Unfällen, beteiligten Fahrzeugen und Verletzungen ihrer Insassen liefert die Unfalldatenbank der Versicherer (UDB). Sie enthält Informationen aus stichprobenartig erfassten Schadenakten der deutschen Kraftfahrt-Haftpflichtversicherer zu Personenschadenunfällen mit einem geschätzten Schadenaufwand von mindestens 15.000 Euro. Diese Summe schließt Anteile sowohl aus Personen- als auch Sachschaden ein. Für die vorliegende Studie beschränkte sich die Fallauswahl auf Insassen von Pkw, welche mit anderen Pkw oder Kleintransportern zusammenstießen, um von vornherein ein gewisse Kompatibilität der Kollisionskontrahenten zu gewährleisten.

Ausgewählte Merkmale wurden hinsichtlich einer Abhängigkeit vom Geschlecht geprüft. Zusätzlich wurde ein Teil der statistischen Auswertungen für verschiedene Anprallarten mittels multinomialer logistischer Regression mit dem Programm SPSS® [12] durchgeführt, um den Einfluss anderer Variablen als des Geschlechts auf die Verletzungsschwere zu betrachten.

Von der Analyse wurden Pkw mit einem Erstzulassungsjahr vor 1991 ebenso ausgeschlossen wie solche mit einem Leergewicht unter 700 kg. Für weitergehende Untersuchungen wurde der Hauptanstoß am Pkw – bei Mehrfachkollisionen der schwerere Anstoß, der somit mutmaßlich verletzungsverursachend war – in Front-, Seiten- und Heckanprall unterschieden. Andere Anprallarten, wie gegen das Dach oder den Fahrzeugboden, wurden ausgeschlossen. Ferner wurde für einen Teil der Analysen der Beschädigungsgrad derjenigen Fahrzeugseite berücksichtigt, an welcher der Hauptanstoß erfolgte. Der Beschädigungsgrad (BG) als tiefste Deformation ist in Kategorien von 1 (leichte Beulen) bis 5 (massiv oder komplett deformierte Fahrgastzelle) kodiert und spiegelt näherungsweise die in Verformung umgesetzte Energie und damit die aufprallbedingte Geschwindigkeitsänderung wider. Für die Analyse wurden zwei Gruppen, leichtere Beschädigungen (BG1 – BG2) und schwerere Beschädigungen (BG3 – BG5), gebildet. Ferner wurde die Ortslage des Unfalls – innerorts und außerorts, einschließlich Autobahn – berücksichtigt, welche ein grobes Maß für das Geschwindigkeitsniveau darstellt.

Von den Pkw-Insassen wurden Erwachsene ab 18 Jahre mit bekanntem Geschlecht und bekannter Sitzposition eingeschlossen: Fahrer und Fahrerinnen, Beifahrer und Beifahrerinnen vorne und Mitfahrende in der zweiten Sitzreihe. Die Schwere von Verletzungen wurde nach AIS 2005, Update 2008 [13] kodiert und bei der Analyse der Maximum AIS (MAIS) als Indikator für die Gesamtverletzungsschwere verwendet. Insassen mit unbekanntem MAIS (MAIS9) wurden aus der Betrachtung ausgeschlossen. Bei nicht vollständig bekanntem Ver-

letzungsmuster wegen vereinzelt fehlender AIS-Angaben in Körperregionen wurde der MAIS auf Grundlage der dokumentierten Verletzungen konservativ kodiert.

Körpergröße und Körpergewicht der Insassen wurden aufgrund eines hohen Anteils fehlender Werte bei der Analyse nicht berücksichtigt. Weil in einigen Fällen Informationen zur Gurtnutzung vollständig fehlten oder, besonders bei leichteren Unfällen, auf selbst berichteten Angaben der Betroffenen beruhten, wurde auf dieses Merkmal ebenso verzichtet. Imputationen zum Auffüllen fehlender Daten oder Wichtungen und Hochrechnungen wurden nicht vorgenommen.

Für den Test auf statistische Signifikanz der Unterschiede zwischen betrachteten Gruppen wurde für kontinuierliche Variablen der t-Test angewendet, für dichotome Variablen der Chi-Quadrat-Test. Statistische Signifikanz wurde bis zu einem p-Wert von 0,05 definiert, andernfalls wurde der Unterschied als nicht signifikant (n.s.) angesehen.

3. Ergebnisse

3.1 Analyse der amtlichen Unfallstatistik

Auffällig, wenngleich nicht überraschend, ist die von 1999 bis 2019 stark rückläufige absolute Zahl der getöteten und schwerverletzten Pkw-Insassen, welche einen großen Beitrag zur Reduktion der Anzahl aller Getöteten und Schwerletzten im Straßenverkehr in diesem Zeitraum leistete. Die Zahl getöteter Fahrer ging insgesamt um 68,6% auf 812, die der getöteten Fahrerinnen um 65,2% auf 252 zurück (Bild 1). Bei getöteten Mitfahrenden männlichen Geschlechts ging die Zahl innerhalb dieses Zeitraums um insgesamt 79,6% auf 141, bei denen weiblichen Geschlechts um 75,3% auf 158 zurück (Bild 1).

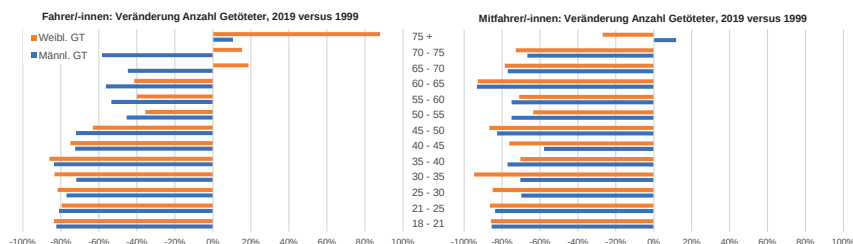


Bild 1: Prozentuale Veränderung der Anzahl Getöteter von 1999 bis 2019 als Fahrer/ Fahrerinnen (links) und Mitfahrer/Mitfahrerinnen (rechts) in Pkw nach Geschlecht und Alter

Die Diagramme geben für jede Altersgruppe die relative Veränderung der Anzahl Getöteter 2019 im Vergleich zu 1999 wieder. Die absoluten Zahlen Getöteter gehen daraus nicht hervor, unterscheiden sich aber zwischen den Altersgruppen zum Teil erheblich.

Von noch größerem Interesse ist unter der Zielsetzung dieser Studie die Entwicklung der Anzahl schwerverletzter Pkw-Insassen von 1999 bis 2019. Hier zeigen sich ebenfalls starke Rückgänge, wenn auch nicht in gleichem Maße wie für Getötete. Die Anzahl schwerverletzter Fahrer sank insgesamt um 49,2%, die der schwerverletzten Fahrerinnen um 37,5% (Bild 2). Auffallend ist dabei, dass die Veränderung bei Fahrern ab etwa 50 Jahren ein Plateau erreicht, wo die Zahl der Schwerverletzten gegenüber 1999 nur minimal reduziert ist, bevor sich ihre Zahl in der Altersgruppe ab 75 Jahren gegenüber 1999 verdoppelt. Bei schwerverletzten Fahrerinnen kehrt sich der abnehmende Trend ab etwa 50 Jahren um. In der Altersgruppe ab 75 Jahren erreicht sie die fast dreifache Zahl im Vergleich zu 1999. Bei schwerverletzten männlichen Mitfahrenden betrug der Rückgang insgesamt 60,6%, bei weiblichen mit 58,7% nur geringfügig weniger. Über einen weiten Altersbereich beträgt der Rückgang der Zahl Schwerverletzter unter Mitfahrenden beiderlei Geschlechts 40% bis 60%. Erst ab 75 Jahren erreicht die Anzahl weiblicher schwerverletzter Mitfahrender wieder das Niveau von 1999, die der männlichen steigt auf das 1,6-Fache von 1999 (Bild 2).

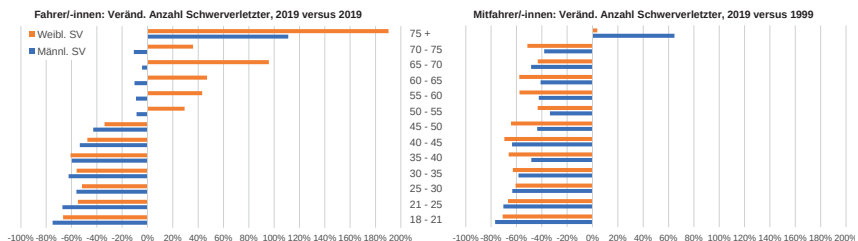


Bild 2: Prozentuale Veränderung der Anzahl Schwerverletzter von 1999 bis 2019 als Fahrer/Fahrerin (links) und Mitfahrer/Mitfahrerin (rechts) in Pkw nach Geschlecht und Alter

Bei diesen Betrachtungen lässt sich der Effekt anderer Einflüsse, die zu einer Ab- oder Zunahme der Anzahl von Verunglückten führen können, beispielsweise ein gestiegener Anteil von Frauen als Fahrerinnen, nicht identifizieren. Der Anteil Schwerverletzter an allen Verunglückten, also der Summe aller Verletzten und Getöteten, innerhalb einer Geschlechtskategorie gibt einen besseren Eindruck davon, ob weibliche Pkw-Insassen gegenüber männlichen einem höheren Risiko für schwere Verletzungen ausgesetzt sind (Bild 3). Für Daten

aus 2019 zeigt sich bei Frauen auf dem Fahrersitzplatz in allen Altersgruppen und als Mitfahrerinnen bis etwa 55 Jahren durchwegs ein etwas geringerer Anteil Schwerverletzter als bei Männern. Jenseits dieses Alters präsentiert sich der Anteil von Schwerverletzten unter mitfahrenden Frauen und Männern uneinheitlich.

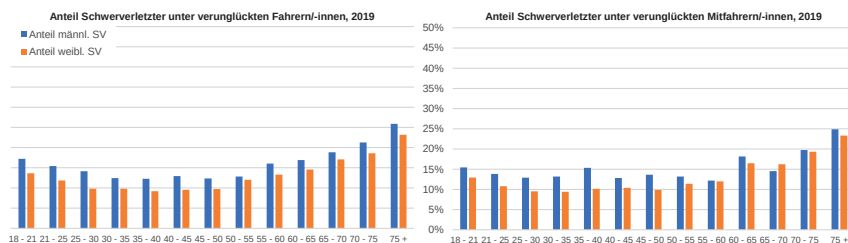


Bild 3: Prozentualer Anteil Schwerverletzter 2019 an allen verunglückten Fahrern/Fahrerinnen (links) und Mitfahrern/Mitfahrerinnen (rechts) in Pkw nach Geschlecht und Alter

3.2 Analyse der Unfalldatenbank der Versicherer (UDB)

Nach Ausschluss von Datensätzen mit fehlenden Werten für Insassengeschlecht, -alter und Verletzungsschwere verblieben 1.713 Einzeldatensätze aus den Unfalljahren 2003 bis 2015 für Personen auf den Sitzplätzen der ersten und zweiten Sitzreihe von Pkw, die mit anderen Pkw oder Kleintransportern zusammengestoßen waren. Davon waren 759 Frauen und 954 Männer. Der Anteil von Insassen auf dem Fahrersitzplatz betrug 77,5% ($n = 1.328$), auf dem Beifahrersitzplatz 18,3% ($n = 313$) und der von Mitfahrenden in der zweiten Sitzreihe lediglich 4,2% ($n = 72$). Frontanpralle als Hauptanstoß für die betrachteten Pkw beziehungsweise ihre Insassen machten die Hälfte, Seiten- und Heckanpralle je knapp ein Viertel aus (Tabelle 1). Die Anteile weiblicher Insassen differierten für die verschiedenen Anprallarten nur wenig. Bei Berücksichtigung der Sitzposition waren Frauen allerdings zu einem geringeren Anteil (37,7%, $n = 500$) auf dem Fahrersitzplatz zu finden, hingegen auf den Sitzplätzen der zweiten Reihe (54,2%, $n = 39$) und insbesondere auf dem Beifahrersitzplatz (70,3%, $n = 220$) in der Mehrzahl. Die Durchschnittsalter weiblicher und männlicher Insassen unterschieden sich für die verschiedenen Anprallarten nicht signifikant. Auffällig war allerdings, dass, während sich Fahrerinnen und Fahrer hinsichtlich des Durchschnittsalters ähnelten (für Frontanprall: 42,3 Jahre versus 44,9 Jahre; n.s.), weibliche Insassen auf dem Beifahrersitzplatz erheblich älter waren als die männlichen (für Frontanprall: 51,3 Jahre versus 38,7 Jahre; $p < 0,01$).

Tabelle 1: Relative Häufigkeiten von MAIS0 (unverletzt), MAIS1, MAIS2+ und MAIS3+ unter Pkw-Insassen, nach Anprallart und Geschlecht

Anprallrichtung	Anteil	Geschlecht	N	Anteil	Ø Alter [Jahre]	MAIS0	MAIS1	MAIS2+	MAIS3+
alle Anprallarten	100%	weibl.	759	44,3%	44,2	20,6% **	65,3% **	14,1%	4,6%
		männl.	954	55,7%	43,1	32,7%	56,3%	11,0%	4,2%
Frontanprall	50,8%	weibl.	382	43,9%	45,3	28,3% *	52,6%	19,1%	6,3%
		männl.	489	56,1%	43,9	38,7%	46,8%	14,5%	5,1%
Seitenanprall	22,7%	weibl.	168	43,2%	44,4	16,1% **	70,2% *	13,7%	3,0%
		männl.	221	56,8%	42,2	30,3%	59,7%	10,0%	4,5%
Heckanprall	24,0%	weibl.	193	47,0%	42,3	5,7% **	90,2% **	4,1%	2,1%
		männl.	218	53,0%	42,5	17,0%	78,0%	5,0%	1,8%

Signifikante Unterschiede (weiblich gegenüber männlich): * = $p < 0,05$ ** = $p < 0,01$

Der unmittelbare Vergleich der Anteilswerte von Verletzungsschweren in Abhängigkeit vom Geschlecht zeigt, dass Frauen in Kollisionen ohne Unterscheidung nach Anprallart mit 20,6% gegenüber Männern mit 32,7% signifikant seltener unverletzt (MAIS0) blieben ($p < 0,01$), umgekehrt waren sie mit 65,3% signifikant häufiger MAIS1 verletzt ($p < 0,01$). Diese Tendenz bestätigte sich auch bei Unterscheidung nach Anprallarten. MAIS2+ Verletzungsschweren waren bei Frauen beim Front- und Seitenanprall sowie für MAIS3+ beim Frontanprall etwas häufiger. Umgekehrt erlitten Männer beim Seitenanprall häufiger MAIS3+ Verletzungen und beim Heckanprall geringfügig häufiger MAIS2+ Verletzungen. Bei insgesamt geringen Fallzahlen für MAIS2+ und MAIS3+ Verletzungsschwere waren diese Unterschiede aber nicht signifikant. Die Anschnallquoten für Frauen und Männer, bestimmt aus Fällen mit nachweislich getragenen beziehungsweise nicht getragenen Gurten, unterschieden sich nur geringfügig (95,2% versus 91,7%; n.s.). Frauen hatten aber mit 60,0% signifikant häufiger Unfälle innerorts als Männer mit 51,9% ($p < 0,01$).

Die Pkw mit weiblichen Insassen waren im Durchschnitt etwas jünger als Pkw mit männlichen Insassen (Erstzulassung 2005,8 versus 2005,0; $p < 0,01$), hatten allerdings im Mittel ein um 100 kg geringeres Leergewicht (1299,4 kg versus 1399,8 kg; $p < 0,01$).

Die Ergebnisse der multinomialen logistischen Regression für alle Anprallarten gemeinsam sowie für Frontanprall und für Heckanprall gesondert geben die Tabellen 2, 3 und 4 wieder. Für „alle Anprallarten“ sowie den Frontanprall wurden die Odds Ratios berechnet, MAIS2+ verletzt zu werden, im Verhältnis zu MAIS0-1 (unverletzt oder geringfügig verletzt). Abweichend davon wurde beim Heckanprall das Odds Ratio für den Eintritt einer Verletzung ungeachtet ihrer Schwere (MAIS1+), bezogen auf Unverletzte betrachtet, weil diese Anprallart durch MAIS1 Verletzungen dominiert wird. Die Berechnung des Odds Ratios für MAIS3+ war mangels ausreichender Fallzahlen für keine der betrachteten Anprallarten möglich.

Beim Seitenanprall war die verfügbare Fallzahl zu klein für eine solche Regressionsanalyse.

Tabelle 2: Ergebnisse der multinomialen logistischen Regression für Pkw-Insassen und alle Anprallarten. Odds Ratios für MAIS2+ bezogen auf Referenz MAIS0-1

		Regress.- koeffizient B	Standard- fehler	Signifikanz	Exp(B) (Odds Ratio)	95%-Konfidenzintervall	
						Untergrenze	Obergrenze
MAIS2+	Alter Insasse	0,030	0,005	0,000	1,030	1,021	1,039
	Leergewicht Fzg.	-0,001	0,000	0,000	0,999	0,998	0,999
	Erstzulassungsjahr Fzg.	-0,054	0,016	0,001	0,947	0,917	0,978
	Geschlecht weiblich	0,020	0,188	0,914	1,021	0,706	1,475
	Geschlecht männlich (Ref.)	0					
	Sitzposition Beifahrer	0,736	0,210	0,000	2,088	1,383	3,152
	Sitzposition Mitfahrer hint.	0,581	0,358	0,105	1,788	0,886	3,610
	Sitzposition Fahrer (Ref.)	0					
	Beschäd.grad BG3-5	1,950	0,184	0,000	7,031	4,906	10,074
	Beschäd.grad BG1-2 (Ref.)	0					
	Ortslage außerorts	0,419	0,181	0,021	1,520	1,066	2,169
	Ortslage innerorts (Ref.)	0					

Die Regressionsanalyse von 1489 gültigen Datensätzen für „alle Anprallarten“ (Tabelle 2) liefert ein signifikantes Modell ($p < 0,01$) mit einer Varianzaufklärung zwischen 16 und 29% (Pseudo R^2). Das Odds Ratio, eine MAIS2+ Verletzungsschwere gegenüber MAIS0-1 zu erleiden, beträgt für weibliche Insassen 1,021 im Vergleich zu männlichen Insassen. Der Effekt ist aber nicht signifikant. Bezüglich der Sitzposition weist der Beifahrersitzplatz dagegen ein Odds Ratio von 2,088 verglichen mit dem Fahrersitzplatz auf, MAIS2+ gegenüber MAIS0-1 verletzt zu werden ($p < 0,01$); die Sitzposition in der zweiten Reihe hat immer noch ein Odds Ratio von 1,788 (n.s.). Signifikante Effekte zeigen auch das Insassenalter, das Leergewicht und das Erstzulassungsjahr des Fahrzeugs ($p < 0,01$). Die Tabelle gibt dabei das Odds Ratio an, wenn sich für diese metrischen Variablen der Wert um eine Einheit erhöht, beim Leergewicht also um ein Kilogramm, bei Insassenalter und Erstzulassung um ein Jahr.

Tabelle 3: Ergebnisse der multinomialen logistischen Regression für Pkw-Insassen und Frontanprall. Odds Ratios für MAIS2+ bezogen auf Referenz MAIS0-1

		Regress.- koeffizient B	Standard- fehler	Signifikanz	Exp(B) (Odds Ratio)	95%-Konfidenzintervall	
						Untergrenze	Obergrenze
MAIS2+	Alter Insasse	0,035	0,006	0,000	1,035	1,024	1,047
	Leergewicht Fzg.	-0,002	0,000	0,001	0,998	0,998	0,999
	Erstzulassungsjahr Fzg.	-0,045	0,022	0,042	0,956	0,916	0,998
	Geschlecht weiblich	0,117	0,244	0,630	1,125	0,698	1,813
	Geschlecht männlich (Ref.)	0					
	Sitzposition Beifahrer	0,893	0,269	0,001	2,443	1,442	4,140
	Sitzposition Mitfahrer hint.	-0,218	0,515	0,673	0,804	0,293	2,208
	Sitzposition Fahrer (Ref.)	0					
	Beschäd.grad BG3-5	2,013	0,241	0,000	7,483	4,663	12,010
	Beschäd.grad BG1-2 (Ref.)	0					
	Ortslage außerorts	0,615	0,232	0,008	1,849	1,173	2,915
	Ortslage innerorts (Ref.)	0					

Das Modell für den Frontanprall, basierend auf 747 gültigen Datensätzen (Tabelle 3), ist ebenfalls signifikant ($p < 0,01$) mit einer Varianzaufklärung zwischen 21 und 35% (Pseudo R^2). Das Odds Ratio, eine MAIS2+ Verletzungsschwere gegenüber MAIS0-1 zu erleiden, beträgt für weibliche Insassen 1,125 im Vergleich zu männlichen, ist aber wiederum nicht signifikant. Der Beifahrersitzplatz hat ein Odds Ratio von 2,443 ($p < 0,01$) im Vergleich zum Fahrersitzplatz; das Odds Ratio von 0,804 für Mitfahrende hinten ist nicht signifikant. Insassenalter und Pkw-Leergewicht ($p < 0,01$) sowie das Erstzulassungsjahr ($p < 0,05$) zeigen wiederum signifikante Effekte.

Tabelle 4: Ergebnisse der multinomialen logistischen Regression für Pkw-Insassen und Heckanprall. Odds Ratios für MAIS1+ bezogen auf Referenz MAIS0 (unverletzt)

		Regress.- koeffizient B	Standard- fehler	Signifikanz	Exp(B) (Odds Ratio)	95%-Konfidenzintervall	
						Untergrenze	Obergrenze
MAIS1+	Alter Insasse	0,007	0,011	0,521	1,007	0,986	1,028
	Leergewicht Fzg.	0,000	0,009	0,924	1,000	0,999	1,001
	Erstzulassungsjahr Fzg.	0,024	0,030	0,426	1,024	0,966	1,086
	Geschlecht weib- lich	1,207	0,378	0,001	3,345	1,595	7,014
	Geschlecht männlich (Ref.)	0					
	Sitzposition Bei- fahrer	-0,070	0,431	0,871	0,933	0,401	2,170
	Sitzposition Mitfah- rer hint.	0,416	1,087	0,702	1,516	0,180	12,754
	Sitzposition Fahrer (Ref.)	0					
	Ortslage außerorts	0,143	0,325	0,661	1,153	0,610	2,180
	Ortslage innerorts (Ref.)			0			

Das Modell für den Heckanprall basiert auf 404 gültigen Datensätzen (Tabelle 4), ist knapp nicht signifikant ($p = 0,05$) und bietet eine Varianzaufklärung von lediglich 3 bis 7% (Pseudo R^2). Der Beschädigungsgrad als Variable trägt nicht zur Varianzaufklärung bei und wurde nach Testung nicht ins Modell aufgenommen. Allein das Geschlecht zeigt mit einem Odds Ratio von 3,345 für Frauen in Relation zu Männern, verletzt zu werden (MAIS1+), verglichen damit, unverletzt zu bleiben (MAIS0), einen signifikanten Effekt ($p < 0,01$).

4. Diskussion

Mit der vorliegenden Studie wurde versucht, die Frage zu klären, ob Frauen als Insassen von Pkw bei annähernd vergleichbaren Kollisionen schwerer verletzt werden als männliche, unabhängig vom Risiko, in einen Unfall verwickelt zu werden. Untersuchungen dazu liegen in erster Linie aus den USA vor, so dass eine Analyse auf Grundlage des Unfallgeschehens in Deutschland gerechtfertigt erscheint.

Die hier vorgestellte Arbeit hat mehrere Limitationen. Die begrenzte UDB-Fallzahl ließ Berechnungen des Odds Ratios für MAIS3+ Verletzungsschwere nicht zu und schränkt so die Vergleichbarkeit mit amerikanischen Studien ein. Zudem erlaubte es die Datenlage nicht, weitere Merkmale wie Gurtnutzung oder Körpergröße zu berücksichtigen. Dagegen wurde durch Beschränkung auf Unfälle mit annähernd vergleichbaren Kollisionsgegnern eine gewisse Homogenität der Fälle sichergestellt, um die im Vordergrund stehende Forschungsfrage besser adressieren zu können. Von Vorteil scheint im Vergleich zu Studien auf Grundlage von NASS-CDS [4], [5], [6], dass hier auch unverletzte Insassen, oder zumindest solche, die keine Verletzungen oder Beschwerden berichteten, eingeschlossen wurden; außerdem Personen, bei denen Verletzungen erst nach Tagen diagnostiziert wurden. Insofern kann angenommen werden, dass das Fallmaterial der UDB das tatsächliche Verletzungsgeschehen im Bereich geringfügiger Verletzungsschwere vollständiger abbildet.

Die Ergebnisse für die Odds Ratios zeigen nur eine schwache Tendenz, dass – wenn andere in die Regression eingeschlossene Variablen berücksichtigt werden – weibliche Insassen ein höheres Risiko haben als männliche, MAIS2+ verletzt zu werden gegenüber MAIS0-1, also keinen oder geringfügigen Verletzungen. Sowohl bei „allen Anprallarten“ als auch beim Frontanprall sind für Frauen in Relation zu Männern die Odds Ratios mit etwa 1,02 beziehungsweise 1,13 deutlich geringer als in amerikanischen Studien. Insbesondere sind diese Werte für die Variable „Geschlecht“ nicht signifikant. Wesentlich stärker ist sowohl bei „allen Anprallarten“ als auch beim Frontanprall der Effekt der Sitzposition im Pkw: auf dem Beifahrersitzplatz beträgt das Odds Ratio 2,09 beziehungsweise 2,44 für MAIS2+ gegenüber MAIS0-1 im Vergleich zum Fahrersitzplatz. Von den auf NASS-CDS basierenden Studien

jüngerer Zeit betrachtete allerdings nur die Arbeit von Forman et al. [5] neben Fahrern auch Mitfahrende. Auffallend war im Material der UDB auch, dass beim Frontanprall auf dem Beifahrersitz Frauen im Mittel zwölf Jahre älter als Männer waren. Höheres Alter und damit einhergehend eine größere Vulnerabilität könnten zum Teil den bei Frauen um etwa 30% höheren Anteil MAIS2+ gegenüber Männern erklären, den die deskriptive Statistik ausweist (Tabelle 1). Höheres Alter als Faktor, welcher das Odds Ratio vergrößert, lässt sich auch in den Regressionsmodellen für „alle Anprallarten“ und den Frontanprall erkennen. Höheres Leergewicht des eigenen Pkw verringert umgekehrt das Odds Ratio. Pkw mit weiblichen Insassen hatten durchschnittlich ein um 100 kg geringeres Leergewicht als solche mit männlichen Insassen; eine Tendenz, auf die auch Brumbelow et al. [6] in ihrer Arbeit hinwiesen. Das Regressionsmodell für den Heckanprall wies von den betrachteten Variablen lediglich für das Geschlecht einen signifikanten Effekt aus. Hier hatten weibliche Insassen allerdings das höchste vorgefundene Odds Ratio mit 3,35, was weitgehend im Einklang mit Ergebnissen anderer Studien steht [2]. Die geringe Varianzaufklärung des Gesamtmodells lässt aber vermuten, dass andere, nicht inkludierte Faktoren erheblich größere Effekte auf die Verletzungsschwere oder körperliche Beschwerden nach einem Heckanprall haben.

Die Analyse der amtlichen Statistik zeigt für Schwerverletzte nach amtlicher Definition einen ab etwa 55 Jahren zunehmenden Anteil unter allen verunglückten Insassen und bestätigt damit noch einmal die größere Verletzlichkeit im höheren Alter. Der Anteil Schwerverletzter unter verunglückten weiblichen Fahrern bleibt dabei für alle Altersgruppen etwas hinter dem Anteil unter verunglückten männlichen Fahrern zurück. Unter verunglückten Mitfahrenden oberhalb von etwa 55 Jahren, also auf dem Beifahrersitzplatz und den hinteren Sitzplätzen, sind die Anteile Schwerverletzter für weibliche und männliche Insassen ähnlich groß. Im Wissen, dass die amtliche Unfallstatistik nicht zwischen Anprallarten differenziert, Unverletzte unberücksichtigt lässt und Schwerverletzte im amtlichen Sinne nicht unmittelbar mit MAIS2+ Verletzten gleichzusetzen sind, lässt sich auf Grundlage der bundesweiten Daten kein auffällig hohes Risiko für Frauen erkennen, schwere Verletzungen zu erleiden.

5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die vorliegende Studie liefert wenig Belege, dass weibliches Geschlecht generell mit einem höheren Risiko für MAIS2+ Verletzungsschwere als männliches Geschlecht assoziiert ist. Auf Basis der Fallzahlen zeigen die berechneten Effekte für Kollisionen insgesamt und für den Frontanprall gesondert keine statistische Signifikanz und sind darüber hinaus deutlich kleiner als die in amerikanischen Studien ermittelten. Ferner stellt sich die Frage, wie viel die Variable „Geschlecht“ zum Gesamtmodell für das Risiko, MAIS2+ Verletzungen zu erleiden,

beiträgt. Neben dem bekannten Faktor „Alter“ deuten die Ergebnisse der Regressionsanalyse an, dass unter anderem die Masse des Pkw und die Sitzposition erheblichen Einfluss auf die Häufigkeit schwererer Verletzungen haben. Dann könnten beispielsweise Maßnahmen zur allgemeinen Erhöhung der Sicherheit auf dem Beifahrersitz angezeigt sein.

Auf jeden Fall rechtfertigen die Ergebnisse tiefere Auswertungen von Unfalldaten aus Deutschland und Europa mit größeren Fallzahlen und weiteren Variablen, die die Verletzungsschwere erklären könnten. Ob daraus die Notwendigkeit erwächst, einen 50th Percentile Female Dummy zu entwickeln und für alle Crashtests einzusetzen, sollte zunächst mit Human Body Models eruiert werden. Es scheint folgerichtig, dass solche Bemühungen beim Heckanprall beginnen [14], wo einerseits – auch in der vorliegenden Studie – Frauen gegenüber Männern ein hohes Odds Ratio für MAIS1+ Verletzungen zeigen und andererseits mit dem BioRID II als Repräsentant eines durchschnittlichen männlichen Erwachsenen derzeit nur ein einziger für Tests zertifizierter Dummy existiert.

6. Literatur

- [1] Pressemitteilung: Norton Announces Bill to Require Gender Equality in Crash Test Dummies. Internet: [<https://norton.house.gov/media-center/press-releases/norton-announces-bill-to-require-gender-equality-in-crash-test-dummies>], Abrufdatum: 21. Juni 2021
- [2] Linder, A.; Svensson, M.: Road safety: the average male as a norm in vehicle occupant crash safety assessment. *Interdisciplinary Science Reviews*; 44:2; S. 140-153: 2019; <https://doi.org/10.1080/03080188.2019.1603870>
- [3] Evans, L.: Female Compared with Male Fatality Risk from Similar Impacts. *Journal of Trauma, Injury, Infection, and Critical Care*; 50:2; S. 281-288: 2001
- [4] Bose, D.; Segui-Gomez, M.; Crandall, J.: Vulnerability of Female Drivers Involved in Motor Vehicle Crashes: An Analysis of US Population at Risk, *American Journal of Public Health*; 101:12, S. 2368–2373: 2011
- [5] Forman, J. et al.: Automobile injury trends in the contemporary fleet: Belted occupants in frontal collisions. *Traffic Injury Prevention*; 20:6; S. 607-612: 2019; <https://doi.org/10.1080/15389588.2019.1630825>
- [6] Brumbelow, M.; Jermakian, J.: Injury risks and crashworthiness benefits for females and males: Which differences are physiological? Internet: [<https://www.iihs.org/topics/bibliography/ref/2219>], Abrufdatum: 06. Oktober 2021
- [7] Kleinert, J. et al.: Geschlechtsspezifische Interventionen in der Unfallprävention. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, Heft M 179. Bergisch Gladbach: 2006

- [8] Bittner, D.: Analyse menschlichen Risikoverhaltens bei Verkehrsunfällen in Mecklenburg-Vorpommern: Ergebnisse einer prospektiven, nicht-interventionellen Beobachtungsstudie. Dissertation, Medizinische Fakultät der Ernst-Moritz-Arndt-Universität, Greifswald: 2010
- [9] Statistisches Bundesamt: Unfälle von Frauen und Männern im Straßenverkehr 2019; Internet: [<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/unfaelle-frauen-maenner-5462407197004.html>], Abrufdatum: 07. Oktober 2021
- [10] Viano, D; Parenteau, C.; Edwards, M.: Crash Injury Risks for Obese Occupants Using a Matched-Pair Analysis. Traffic Injury Prevention; 9:1; S. 59-64: 2008; <http://dx.doi.org/10.1080/15389580701737645>
- [11] Statistisches Bundesamt: Verkehr – Verkehrsunfälle – 2019. Fachserie 8, Reihe 7. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden: 2015
- [12] IBM®: SPSS® Statistics, Version 24.0
- [13] Association for the Advancement of Automotive Medicine: Course Training Manual, A specialized Course on Injury Scaling: Uses and Techniques, Introducing The Abbreviated Injury Scale - 2005 Update 2008, Version January 2011. Barrington, Ill.: 2011
- [14] Östh, J. et al.: A female head-neck model for rear-impact simulations. Journal of Biomechanics; 51; S. 47-56: 2017; <http://dx.doi.org/10.1016/j.j.biomech.2016.11.066>

Seat rotation as restraint concept for future vehicle interiors and seating positions

Andreas Weinkopf, Stefan Olders,
IAV Fahrzeugsicherheit GmbH & Co. KG, Gifhorn

Zusammenfassung

Die zunehmende Automatisierung der Fahraufgabe und der Einsatz alternativer Fahrzeugantriebe führen zu neuen Innenraumkonzepten und veränderten Sitzpositionen. Die Rotation eines Einzelsitzes mit ausschließlich sitzintegriertem Rückhaltekomponenten bietet als Rückhaltekonzept gerade bei einer Liegeposition eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber karosseriefesten Systemen.

Abstract

The increasing automation of driving and the application of alternative drive units leads to new interior concepts and variable seating positions. The rotation of a bucked seat with exclusively seat integrated restraint components as restraint concept offers a multitude of advantages especially in a lying position compared to body mounted components.

1. Ausgangssituation

Der Automobilindustrie steht in den nächsten Jahren ein enormer Wandel bevor, bei dem eine revolutionäre Veränderung des Antriebs und der Energiespeicher mit dem Ersatz eines anwesenden menschlichen Fahrzeugführers durch Automatisierung der Fahraufgabe einhergeht. Diese Veränderungen haben neben strukturellen Einflüssen auf die Karosserie auch Auswirkungen auf die Fahrzeuginnenräume sowie die Komfortansprüche der Insassen, die sich in neuen Nutzungskonzepten mit vielen möglichen und gewünschten Sitzanordnungen und -einstellungen kanalisieren. Zudem zeigen die Entwicklungen der aktuellen Corona-Pandemie, dass es eine verstärkte Tendenz zurück zum Individualverkehr gibt und öffentliche Verkehrsmittel nur teilausgelastet sind oder genutzt werden dürfen. Auch deshalb gewinnen Mobilitätskonzepte mit räumlich getrennten Sitzen oder Sitzbereichen für die Nutzer an Akzeptanz. Zukunftsvisionen denken sogar komplett gekapselte individuelle Einzelsitz-einheiten an, die je

nach Bedarf mit oder ohne die Möglichkeit für den Insassen aktive Fahraufgaben wahrzunehmen ausgestattet sind und an verschiedene Antriebsseinheiten angekoppelt werden können.



Bild 1: IAV-Coquille 2.0 Wechselkonzept der Antriebseinheit

Vielen dieser Tendenzen ist gemein, dass die Sitze zukünftig abweichend von einer festgelegten Ausrichtung im Fahrzeug genutzt werden sollen und damit neue Herausforderungen an den Insassenschutz stellen. Neben diesen Rahmenbedingungen im Fahrzeug werden sich durch die Automatisierung und Vernetzung der Fahrzeuge auch die bisher vorherrschenden Unfallszenarios verändern.

2. Fragestellung

Bei einem Einsatz von fahrzeugfesten RückhaltekompONENTEN ist bei zunehmenden Freiheitsgraden für die Sitzausrichtung und –position aufgrund der veränderlichen Positionierung zum Insassen gerade in gedrehten oder zurückgelehnten Komfortpositionen eine reduzierte Schutzwirkung zu erwarten, so dass sich die Frage stellt:

Wie kann ein Insasse in einem autarken Einzelsitz ohne Einfluss oder Nutzung von umgebenden Strukturen nur mit sitzintegrierten Komponenten innerhalb der heute üblichen Belastungsgrenzen zurückgehalten werden, ohne im Fahrbetrieb Abstriche an den Komfort machen zu müssen und ggfs. eine Schutz- bzw. Ruhezone um den Insassen bereitzustellen?

Als strukturelle Basis für das auf diese Frage angedachte Sitz- und RückhaltekONZEPT dienen die vorhandenen Konstruktionszeichnungen und Simulationsmodelle des für die Nutzung in einem Fahrzeuginnenraum im Rahmen des CES 2019 vorgestellten Schalensitzes Coquille.

Dieser kann über einen Schwenkmechanismus von einer aufgestellten Einstiegsposition bis in eine Liegeposition abgesenkt werden und verfügt über eine integrierte Entertainmenteinheit mit ausfahrbarem Monitor. Eine Verwendung des Rückhaltekonzep^t ist aber auch in der erweiterten Ausbaustufe des Sitzes als geschlossene Kapsel mit einer autarken Belüftungs-/Klimatisierungseinheit sowie Filterelementen und Noise-Canceling mit dem Antriebswechselkonzept denkbar.

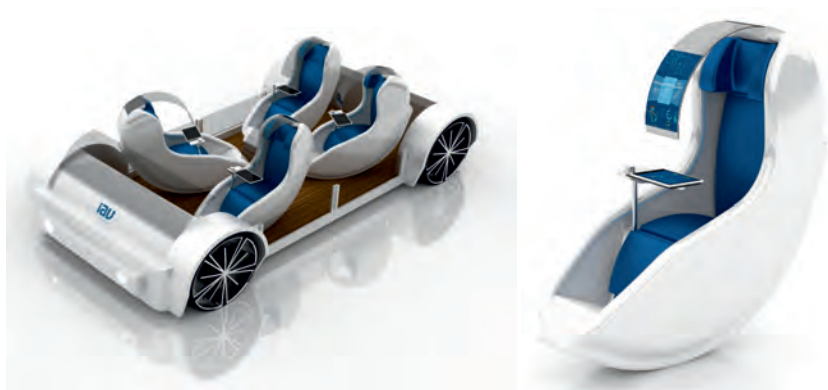


Bild 2: Innenraumkonzept und Einzelsitz Coquille

Da der Schutz vor seitlichen Aufprallvorgängen auch heute schon durch sitzintegrierte Airbag-Komponenten gewährleistet werden kann und mit einer Schalenstruktur des Sitzes sogar effektiver vor eindringenden Fahrzeugstrukturen geschützt werden kann, wird der Schwerpunkt bei den folgenden Überlegungen zu einem Rückhaltekonzep^t auf Front- und Heckaufprallvorgänge inklusive geringen Winkelabweichung und den dabei heute üblichen auftretenden Verzögerungspulsen gelegt. Die Schutzwirkung soll dabei aber sowohl in der Normalsitzposition als auch in der Liegeposition gewährleistet sein. Bei der Auslegung des Rückhaltesystems wird davon ausgegangen, dass auf einen bei autonom fahrenden Fahrzeugen üblichen Sensorcluster zurückgegriffen werden kann, der neben dem Fahrzeuginnenraum auch die Position und Einstellung des Sitzes, Informationen zum Insassen sowie über Umfeld-, PreCrash- und Crashesensorik- Informationen zu Aufprallkonstellation und -zeitpunkt zur Verfügung stellt.

Als Rückhaltekomponenten werden neben dem üblichen Dreipunktgurt auch ein Beckengurt in Kombination mit zusätzlichen Airbag-Komponenten betrachtet.

Bei einem Insassen in Liegeposition sind bei der Verwendung von Gurten trotz Gurtstraffung Submarining-Effekte, also ein Durchrutschen des Körpers unter dem Becken-Gurt durch fehlende Kraftübertragung am Becken zu erwarten (Bild 3, mitte). Dieser Effekt könnte durch eine rechtzeitige Rotation des Sitzes zurück in die Normalsitzposition verringert werden. Bei geschickter Anordnung des Sitzgesamtschwerpunktes zum Drehpunkt des vorhandenen Schwenkmechanismus um die Sitz-y-Achse ist neben einer aktiven motorischen auch eine passive verzögerungsinduzierte Aufstellung während eines PreCrash-Bremsvorgangs oder während des Aufpralls realisierbar (Bild 3, rechts). Hierzu muss eine Freigabe des Schwenkvorgangs sensorgetriggert durch einen ansteuerbaren Aktor erfolgen.



Bild 3: Verzögerungsinduziertes Sitzaufstellen

Alternativ zur herkömmlichen Rückhaltestrategie in Normalsitzposition kann bei entsprechender Lagerung der Sitzschale aber bei einem Frontalaufprall auch eine entgegengesetzte ebenfalls verzögerungsinduzierte Rotation des Sitzes aus der Normal- oder Liegeposition in eine Auf-Kopf-Position des Sitzes eingeleitet werden. Hierdurch setzt sich der Verzögerungsweg des Insassen nicht nur aus einer translatorischen, sondern zusätzlich aus einer rotatorischen Komponente zusammen. Im Gegensatz zu einer Rückhaltung ausschließlich per Gurt ist nach dieser Rotation eine großflächige Abstützung des Insassen auf der kompletten Fläche der belastungszugewandten Sitzstruktur gewährleistet und Relativbewegungen des Insassen zum Sitz werden reduziert. Über eine zusätzliche Nachgiebigkeit und Verschiebbarkeit der Sitzkomponenten in der Schalenstruktur sind weitere Optimierungen möglich. Dieses Konzept kann auch bei einem Heckaufprall aus der Liegeposition umgesetzt werden, nur rotiert der Sitz hier in eine stehende Position.

Zur Abschätzung einer Umsetzbarkeit eines solchen rotatorischen Rückhaltekonzepts wird eine Sitzkinematik erarbeitet sowie Einflussfaktoren und die auftretenden Belastungen für den Insassen bei der Rotation in unterschiedlichen Crashlastfällen mit und ohne vorangehende

PreCrash-Bremmung mittels FEM-Simulation abgeschätzt. Hierbei ist zu beachten, dass die gängigen Dummy-Simulationsmodelle nicht auf diese Art und Richtung der Belastung ausgelegt und validiert sind und somit zum jetzigen Zeitpunkt nur eine erste Abschätzung möglich ist. Auf eine Berechnung mit einem Human-Model ist aufgrund von Inkompatibilitäten mit dem verwendeten Simulationstool in dieser Studie zunächst verzichtet worden.

3. Aufbau Einzelsitz

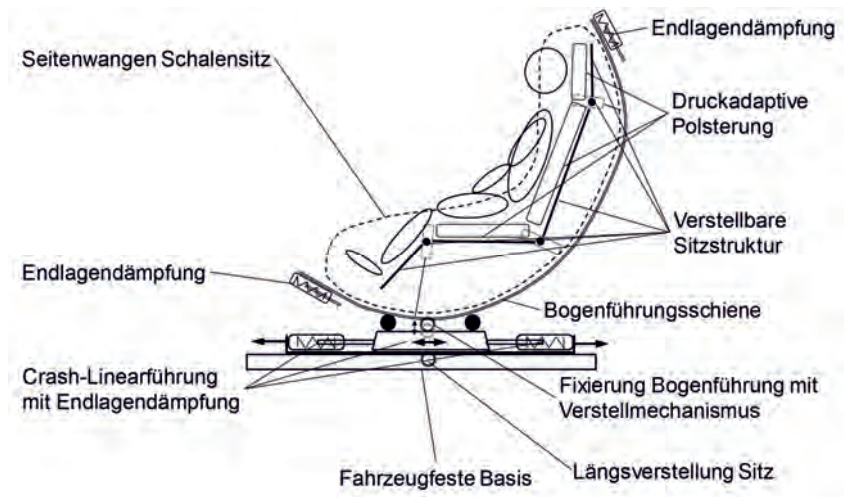


Bild 3: Schematische Darstellung Aufbau Einzelsitz

Der Sitz verfügt an der Außenseite von der Fußauflage bis zur integrierten Kopfstütze über eine gekrümmte Führungsschiene, entlang derer er durch die fahrzeugfeste Lagereinheit bewegen kann. Bei einer Verschiebung der Schiene in der Lagereinheit ergibt sich eine Rotation des Sitzes um seine y-Achse. Diese Bewegung wird vor einem Anschlagen an den konstruktiven Endpositionen der Schiene durch Dämpfungselemente definiert abgebremst. Über eine sich ändernde Krümmung der Bogenführung entlang des Sitzes, einen einstellbaren Verschleißwiderstand innerhalb der Lagereinheit sowie die Verschiebung der Schwerpunktlagen und Trägheiten des Sitzes und des Insassen kann die Rotationsantwort des Gesamtsystems auf die Fahrzeugverzögerung generell (z.B. für unterschiedliche Fahrzeuge) und lastfallspezifisch optimiert werden.

Die untere Lagereinheit ermöglicht eine zusätzliche (verzögerungs-/kraftinitiierte oder geregelte akuatorische) Verschiebmöglichkeit in Fzg-Längsrichtung. Auch hier wird eine Verschiebung vor den konstruktiven Endlagen durch Dämpfungselemente definiert abgebremst.

Auch eine zusätzlich beschleunigungsinduzierte Drehung des Sitzes um die z-Achse zur optimalen Ausrichtung zur Crashrichtung kann bei geeigneter Positionierung der Drehachse und einer ansteuerbaren Freigabe dieser Rotationsachse umgesetzt werden.

Alle beschleunigungsinduzierten Bewegungen des Sitzes können bei ausreichender Vorwarnzeit alternativ auch schon von den integrierten Verstelleinrichtungen eingeleitet oder über zusätzliche PreCrash-Aktuatorik unterstützt werden.

Die Position der Sitzstruktur innerhalb der Sitzschale kann im Fahrbetrieb über die Verschiebung der Gelenkpunkte von Sitzfläche, Rückenlehne, Kopflehne und Beinauflage an die Insassengröße und die angestrebte Sitzposition angepasst werden.

In Crashrichtung nicht genutzte Einstellwege im Sitzes können darüber hinaus im Unfall zusammen mit Verformungen der Außenstrukturen und ergänzt um eine belastungsabhängige Polsterung auf der Sitzstruktur (z.B. durch integrierte Luft-, Flüssigkeits- oder Gelpolster mit steuerbarem Auslass oder belastungsadaptive Schäume) zur Belastungsreduzierung genutzt werden.

Je nach Platzverhältnissen und der Art des Trägerfahrzeugs kann die Höhe der Seitenwangen des Sitzes mit lastabsorbierenden und kraftverteilenden Strukturen angepasst werden und Seitenairbags zum Schutz für Oberkörper, Kopf und Beine bei seitlichen Anprallvorgängen integriert werden.

Mit dem Gesamtsystem kann rein über die auftretende Brems- oder Crash-Verzögerungen (ohne Aktivierung zusätzliche Aktuatoren) eine eigenständige Rotation des Sitzes in PreCrash- oder Crashlastfall hervorgerufen werden. Durch die gemeinsame Rotation von Sitz und Insasse können Differenzbewegungen zwischen beiden begrenzt werden, so dass im idealen Fall keine zusätzliche Sicherung des Insassen benötigt würde. Zudem kann die Gefahr einer Stauchungsbelastung von Hals und Wirbelsäule sowie unter dem Gurt durchzurutschen (Submarining), die bei einer Verzögerung in unveränderter Liegeposition auftreten kann, reduziert werden.

4. Beschreibung zeitlicher Ablauf Rückhalteprozess mit Umfeld-Sensorik

Der Ablauf des Rückhalteprozess in einem autonom fahrenden Fahrzeug mit einem annähernd in Fahrtrichtung und einem annähernd entgegen der Fahrtrichtung ausgerichteten Sitz mit Insassen würde dann wie folgt ablaufen.

Die Umfeld-Sensorik ggfs. auch die C2C-Kommunikation erkennt im Fahrbetrieb, dass sich die Kritikalität der aktuellen Fahrsituation erhöht. Die sitzinterne Sensorik bewertet daraufhin die Belegung des Sitzes, die Ausrichtung des Sitzes zur Fahrt- und zur möglichen Kollisionsrichtung, die Sitzstellung (Normalposition, Liegeposition, etc.), die Sitzposition des Insassen im Sitz und den Zustand der Rückhalteeinrichtungen. Bei in alle Richtungen elektrisch verstellbaren Schalensitzen und kann bereits zu diesem Zeitpunkt eine PreCrash-Verstellung des Sitzes um die y-Achse in die Normalsitzposition und eine Drehung um die z-Achse komplett in oder entgegen der zu erwartenden Aufprallrichtung gestartet werden, um die seitliche Komponente des möglichen Aufprallvorgangs zu verringern. Eine solche Verstellung sollte allerdings aus Komfortgründen nur in erkennbar kritischen Situationen und nicht im normalen Fahrbetrieb vorkommen.

Nach Überschreiten einer festgelegten Startschwelle berechnet dann ein (derzeit noch fiktiver) Rückhaltealgorithmus aus den vorher ermittelten Daten der Sitz- und Insassensensorik in Kombination mit dem zu erwartenden Crashszenario und der sich daraus ergebenden Unfallsschwere eine Warn-, Brems- und Rückhaltestrategie.

Überschreitet die Kritikalität einer Fahrsituation schlagartig eine vorgegebene Bremsschwelle ohne vorhergehenden Anstieg, wird ein PreCrash-Bremsvorgang oder direkt eine Notbremsvorgang ausgelöst.

Zeitgleich mit dem Start des Bremsvorgangs wird der Verstellantrieb zum Kippen an den Sitz abgekoppelt, die aufgrund von Belegung (Gurtschlossschalter, Sitzbelegungserkennung, etc.), Ausrichtung (z.B. $\pm 15^\circ$ zur oder entgegen der Fahrtrichtung) und Sitzstellung (z.B. Liegeposition) für die Schutzmaßnahme „Sitzrotation“ in Frage kommen. Hierdurch kann sich der Sitz frei auf der Bogenführungsschiene verschieben.

Aufgrund der Verzögerungskräfte am fahrzeugfesten unteren Lager wird der Sitz durch den Abstand seines Schwerpunktes zum Drehpunkt in eine Rotation gezwungen. Abhängig von den Massenträgheiten der Komponenten und der Reibung an der Bogenführung stellt sich in Fahrtrichtung ein Abtauchen bzw. entgegen der Fahrtrichtung ein Aufstellen des Sitzes ein.

Idealerweise wird die Sitzschale ohne Differenzbewegungen eines (z.B. mit Beckengurt gesicherten) Insassen so ausgelenkt, dass sich bis zum Aufprall ein Vorrotationswinkel ergibt, bei dem sich der Insasse gut über Becken und Beine am Sitzpolster abstützen kann.

Kann der Aufprall durch den Bremsvorgang vermieden werden, wird der Verstellantrieb des Sitzes bei dem sich in diesem Szenario einstellenden maximalen Auslenkwinkel wieder angekoppelt und der Insasse langsam in seine Ausgangsposition zurückbewegt.

Im Falle eines Aufpralls verstärkt sich die Rotationsgeschwindigkeit durch den Verzögerungsanstieg und die Einheit rotiert mit dem Insassen bis in ihre konstruktive Endlage durch.

Kurz vor Erreichen dieser Endlage wird die Rotation durch die sich ändernden Hebelverhältnisse der Massenschwerpunkte und eine Dämpfereinheit am Schienenende abgebremst.

Zusätzlich kann über eine kraftabhängige x-Verschiebbarkeit im Bereich der fahrzeugmontierten Lagereinheit zusätzlicher Weg zum Abbremsen freigegeben werden. Auch diese sich überlagernde Längsbewegung wird durch eine Dämpfereinheit vor Erreichen des maximalen Weges abgebremst.

Die Sitzpolster/Kopflehne können als einzelne schaumgefüllte Kammern aufgebaut sein, deren eingeschlossene Luft/Flüssigkeit beim Aufprall über Ventile definiert entweichen kann und den Aufprall gegen die Sitzstrukturen abmildert.

Nach Beendigung des Crashpulses koppelt der Verstellantrieb in der oberen Endlage wieder ein, fixiert den Sitz in dieser Position und verfährt ihn nach einer an den Crashpuls angepassten Wartezeit (evtl. Sekundäraufprall) wieder langsam in die Normalsitz-/Liegeposition zurück, um eine Bergung durch Rettungskräfte zu erleichtern.

5. Strategien in Abhängigkeit zur Ausrichtung der Einheit

Ähnlich wie beim heute üblichen Rückhaltesystem haben viele Randbedingungen Einfluss auf eine optimale Abstimmung der Einzelkomponenten. Das Gesamtsystem muss bis zu einer Grenzggeschwindigkeit bei typischen Front-/Seite-/Heck-Aufprallvorgängen auch ohne Rotation oder Längsverschiebung eine Grundsicherheit gewährleisten. Eine weitere Anpassung kann über die lastfallabhängige Freigabe zusätzlicher Rückhaltekomponenten erfolgen. Hierdurch können unter festgelegten Rahmenbedingungen (z.B. Verfügbarkeit Umfeldsensorik oder Einschränkung von Straßenklassen, wie Autobahn/Schnellstraßen ohne Gegen- oder Querverkehr) auch verletzungskritischere Insassenpositionen (Liegeposition/ Sitzen quer zur

Fahrtrichtung) zugelassen werden. Mit den zusätzlichen Informationen einer PreCrash-Sensorik wird bei frühzeitiger Erkennung der Kollisionsgefahr eine PreCrash-Bremung eingeleitet, bestenfalls ein Aufprall verhindert oder zumindest die Aufprallgeschwindigkeit reduziert. Darüber hinaus kann die Verzögerung für die Vorrotation des Sitzes genutzt werden.

Durch ein PreCrash-System und/oder C2C-Kommunikation mit Unfallschwereschätzer (Infos zu Unfallgegner und Abschätzung Aufprallrichtung und Verzögerungen) wäre eine frühzeitige Abstimmung des Gesamtsystems auf den jeweiligen Lastfall denkbar. Neben einer Beibehaltung der ursprünglichen Sitzposition sind auch unterschiedliche Freigabezeitpunkte für die Rotation und eine Beeinflussung der rotatorischen und translatorischen Bewegungen umsetzbar.

Im Folgenden werden mögliche Rückhaltestrategien des Systems aus unterschiedlichen Start-szenarien dargestellt, die aber bisher nur mittels Simulationen betrachtet worden sind.

Szenario Normalfahrt

Winkelverstellung des Sitzes über angekoppelten Aktuator möglich (Aufstellung als Einstiegs-hilfe vor Fahrtbeginn, Abkippen in Liegeposition auch während der Fahrt)

Szenario Frontalcrash mit vorwärts gerichteter Einheit in Normalposition harter Crashpuls

Bei Kollisionen mit einem zu erwartenden kurzem harten Verzögerungspuls (kurze InCrash-Rotationsphase) oder Unfallszenarien ohne Vorwarnzeit über die Umfeldsensorik (keine Pre-Crash-Rotationsphase) kann eine ausreichende Rotation des Sitzes über die rückhaltekritische Liegeposition hinaus ggfs. nicht sichergestellt werden. Deshalb ist in diesen Szenarios die Beibehaltung der Normalposition durch einen fixierten Verstellaktuator in Kombination mit der Freigabe der x-Verschiebung des Sitzes und die Rückhaltung des Insassen über ein konventionelles, aber sitzintegrierte Gurtsystem denkbar. Reicht die so erzielte Rückhalteleistung nicht aus, werden zusätzliche Komponenten benötigt, die aber zu diesem Zeitpunkt nicht weiter betrachtet werden.

Szenario Frontalcrash mit vorwärts gerichteter Einheit in Normalposition weicher Crashpuls

Bei Kollisionen mit einen prädierten weichen Verzögerungspuls oder ausreichend langer Pre-Crash-Phase erfolgt die Abkoppelung des Verstellaktuator und damit die Verschiebbarkeit der Bogenführung auf fahrzeugfester Lagereinheit zu einem abgestimmten Zeitpunkt innerhalb der PreCrash-Bremung. Die verzögerungsbedingte Rotation verschiebt den Sitz über Liegeposition hinaus in die Auf-Kopfstellung. Eine Zündung zusätzlicher Rückhalte-komponenten ist

nach Erreichen dieser Position durch die großflächige Abstützung des Insassen in der Sitzstruktur nicht notwendig. Eine x-Verschiebung des unteren Sitzlagers kann zusätzlich freigegeben werden.

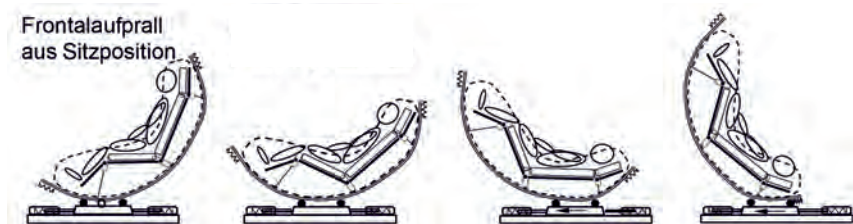


Bild 4: Rückhaltung im Frontalaufprall durch Sitzrotation

Szenario Frontalcrash mit vorwärts gerichteter Einheit in Normalposition und sich verändernden Crashpuls

Ändern sich die Randbedingungen innerhalb einer Frontalkollision derartig, dass eine bereits eingeleitete Rotation beim Aufprall nicht weit genug fortgeschritten ist, kann ein Abheben des Insassenoberkörpers von der Rückenlehne auftreten. Da eine Abstützung auf einen Airbag aus dem Fahrzeugarmaturenbrett fehlt, könnte ein prismenförmiger Airbag, der sich aus einer Seitenwange des Schalensitzes oder fixiert auf einem Beckengurt entfaltet, eine großflächige Abstützung von Oberkörper und Kopf auf den eigenen Oberschenkeln ermöglichen. Zusätzlich wird die x-Verschiebung der unteren Lagereinheit freigegeben.



Bild 5: Rückhaltung bei unvollständiger Sitzrotation und abhebendem Oberkörper

Frontalcrash mit vorwärts gerichteter Einheit in Liegeposition

Da aus einer Liegeposition durch eine Sitz-Rotation nach jetzigem Simulationsstand eine Verbesserung der Insassenkinematik erzielt werden kann, erfolgt eine Abkoppelung des Verstellaktuator mit Verschiebbarkeit der Bogenführung auf der fahrzeugfesten Lagereinheit an einem vorzugebenden Zeitpunkt in der PreCrash-Bremung. Es stellt sich die bereits beschriebene verzögerungsbedingte Rotation in die Auf-Kopfstellung ein. Die zusätzliche x-Verschiebung der unteren Lagereinheit kann ebenfalls freigegeben werden.

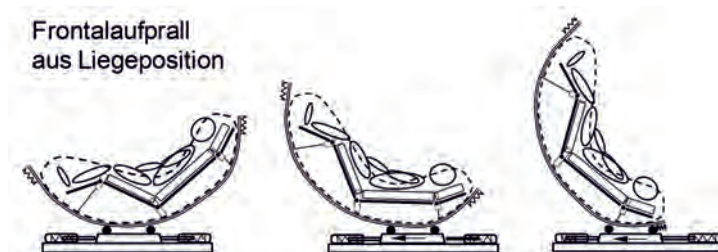


Bild 6: Rückhaltung aus der Liegeposition

Frontalcrash mit rückwärts gerichteter Einheit in Normalposition

Auch bei dieser Ausgangssituation ist eine Abkoppelung des Verstellaktuator und die Freigabe der Verschiebbarkeit der Bogenführung auf fahrzeugfester Lagereinheit sowohl schon vor als auch noch nach Aufprall sinnvoll. Es ist nur eine geringe verzögerungsbedingte Rotation notwendig, um aus der rückwärtsgerichteten Normalposition in die senkrechte Endlage zu gelangen. Deshalb ist lastfallabhängig eine zeitverzögerte Abkoppelung des Verstellaktuator denkbar. Die x-Verschiebung der unteren Lagereinheit kann ebenfalls freigegeben werden.



Bild 7: Rückhaltung aus rückwärtsgerichteter Normalsitzposition

Frontalcrash mit rückwärts gerichteter Einheit in Liegeposition

Um ein Hochrutschen des Insassen im Sitz beim Aufprall zu vermeiden, ist auch in diesem Fall eine zeitabhängige Abkoppelung des Verstellaktuator und die Freigabe der Verschiebbarkeit der Bogenführung auf fahrzeugfester Lagereinheit sinnvoll. So ist schon während einer PreCrash-Bremmung eine Rotation in die senkrechte Endlage möglich. Die x-Verschiebung der unteren Lagereinheit kann ebenfalls freigegeben werden.



Bild 8: Rückhaltung bei rückwärtsgerichteter Liegeposition

Frontalcrash mit Ladung

Das Konzept einer rotatorischen Rückhaltung könnte außerdem beim Transport von empfindlicher Ladung in Form einer schwenkbaren gepolsterten Wanne umgesetzt werden.

Aufprall mit Ladung

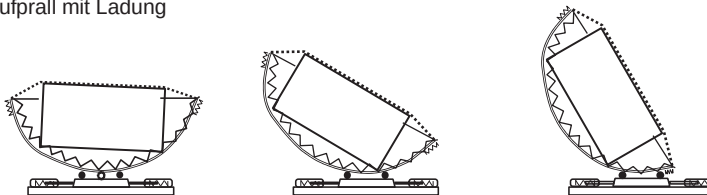


Bild 9: Rückhaltung von Ladung

6. Simulationsergebnisse

Für die Bewertung einer Sitzrotation als Rückhaltekonzep sind Simulationsrechnungen mit unterschiedlichen Startbedingungen durchgeführt worden. Hierbei wurde unter anderem der Zeitpunkt des Aufpralls in Abhängigkeit des bereits überstrichenen Rotationswinkels des Sitzes innerhalb der PreCrash-Bremssphase variiert. Zudem wurden reine InCrash-Rotationen mit unterschiedlichen Gurtsystemen aus der Liegeposition ausgewertet

Bei der simulatorischen Betrachtung variierender Rotationswinkel zum Zeitpunkt des Aufpralls zeigen sich die niedrigsten Dummybelastungen im Kopf- und Nackenbereich in den Fällen, wo der Sitz bereits vor dem eigentlichen Aufprall seine konstruktive Endlage erreicht hat. Allerdings dient hier als Grundlage des Simulationsmodells noch eine heute übliche Sitzkonstruktion mit separater verstellbarer Kopfstütze, so dass sich der Kopf in den noch nicht durchrotierten Simulationen teilweise zwischen Rückenlehne und Kopfstütze eingraben kann, was zu den erhöhten Kopfbeschleunigungen und Nackenmomenten führen könnte. Hier sind noch weitere Untersuchungen notwendig.

Die Nutzung eines Dreipunktgurtes in der Liegeposition behindert bei unvollständiger InCrash-Rotation des Sitzes ein Abheben des Oberkörpers von der Rückenlehne. Dieses führt zu einer starken Stauchungsbelastung entlang der Wirbelsäule und einem großen Nickwinkel des Kopfes relativ zum Oberkörper. Dieser tritt zwar auch bei der Nutzung eines Beckengurtes auf, kann aber durch die Nutzung eines Oberschenkelairbags besser reduziert werden, als mit Dreipunktgurt. Falls der Dreipunktgurt als Basis-Rückhaltesystem für die unveränderte Normalsitzposition vorgesehen wird, sollte in obigem Lastfall eine separate Freigabe des Schultergurtes unabhängig vom Beckengurt möglich sein.

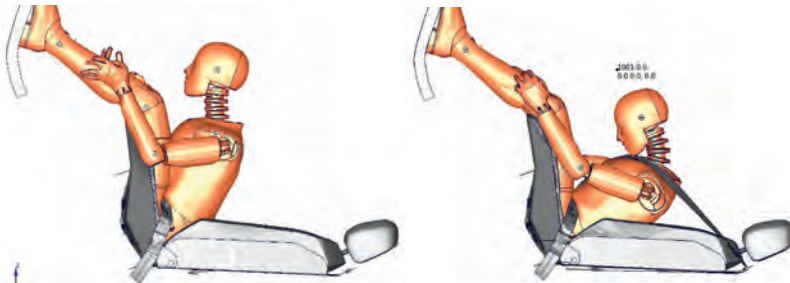


Bild 10: Vergleich unvollständige InCrash-Rotation mit 2- und 3-Punkt-Gurt

7. Ausblick

Ein derart voluminöser Sitz ist in einer heute üblichen Pkw-Karosserie nicht ohne weiteres verwendbar, geschweige denn schwenkbar, denn die notwendige Innenraumhöhe kann derzeit höchstens in Kleinbussen zur Verfügung gestellt werden. Dennoch kann nach Beendigung und positiver Bewertung des rotatorischen Rückhaltekonzepthes darauf aufbauend die Umsetzung einer vereinfachten Variante geprüft werden.

Wie im patentierten Coquille 2.0 für die entferntere Zukunft angedacht, könnte ein mit einer Kuppel verschließbarer Sitz mit allseitiger Ummantelung des Insassen eine zusätzliche fahrzeugseitige Karosseriestruktur überflüssig machen. Hierdurch würde sich das höhere Gewicht des Sitzes innerhalb des zu bewegenden Gesamtsystem relativieren. Das eigentliche Fahrzeug würde nur noch aus der Plattform zur Adaption des/der Sitz/e, der Antriebs- und Energiespeichereinheit und eventuell notwendigen Deformationszonen an Front, Heck und Seite bestehen. Bei einem angetriebenen kleinen leichten Fahrgestell für den innerstädtischen Betrieb mit nur einem Einzelsitz könnten die Deformationszonen ähnlich einem Formel 1-Monocoque auch direkt im Sitz (deformierbare Schnauze, etc.) integriert werden.

Ein Wechselsystem für die Sitze oder Sitzkapseln ermögliche eine variable Aufteilung der Sitzplätze und des Laderaums. Zudem ließe sich der Sitz bei der Mitnahmemöglichkeit auf unterschiedliche Trägerfahrzeuge sowohl durch den Zukauf von Komfort- und Sicherheitsfeatures personalisieren, als auch konstruktiv an die biometrischen Daten des Insassen anpassen und müsste nicht wie bisher einen Bereich von 5%-Frau bis zum 95%-Mann in allen Komfort und Sicherheitsanforderungen abdecken.

Durch die geschlossene Kapsel um den Insassen wird zudem das Luftvolumen des Innenraums, der gekühlt oder beheizt werden muss, reduziert, was die Energiebilanz gerade bei einem elektrischen Antrieb positiv beeinflusst. Zudem kann eine Filterung der Innenluft erfolgen, um den Insassen auch in größeren Transporteinheiten vor Umweltbelastungen und Krankheitskeimen zu schützen.

Weibliche Dummies und Insassen-Dummies für das Autonome Fahren

Dr. Thomas Kinsky, Christian Kleeßen,
Humanetics Europe GmbH, Heidelberg

Zusammenfassung

Die Weiterentwicklung der Sicherheit von Fahrzeuginsassen hängt auch mit der Weiterentwicklung der Dummytechnologie zusammen: Dummies stellen in Crashtests die Insassen dar und erlauben so eine Bewertung der Verletzungsrisiken. Im vorliegenden Beitrag werden die beiden neuesten Dummies aus der THOR-Familie vorgestellt: Der THOR-5F, der kleine „weibliche“ Dummy, sowie der THOR-AV, ein Dummy, der auch zukünftige Sitz-positionen in automatisierten bzw. autonomen Fahrzeugen darstellen kann.

1. Hintergrund

In den letzten Jahrzehnten hat die Sicherheit von Fahrzeuginsassen und anderen Verkehrsteilnehmern große Fortschritte gemacht, auch wenn die ehrgeizigen Ziele der Politik und des Verbraucherschutzes zur weiteren Senkung der Getöteten- und Verletztenzahlen in den letzten Jahren nicht ganz erfüllt werden konnten. Einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der Opferzahlen im Straßenverkehr leisteten Crashtests, die inzwischen weltweit im Rahmen von Verbraucherschutztests bzw. der Fahrzeugzertifizierung eingesetzt werden, und mit diesen die Crashtest-Dummies, lebensgroße Puppen (oder auch Körperteile), die bei den Crashtests die Insassen bzw. andere Verkehrsteilnehmer darstellen und eine Risikobewertung für diese erlauben.

Die heute noch überwiegend eingesetzten Crashtest-Dummies, die so genannte Hybrid-III-Familie, sind seit mehr als 40 Jahren im Einsatz. Inzwischen gibt es eine neuere Generation, den so genannten THOR (abgekürzt vom englischen „Test Device for Human Occupant Restraint“, also etwa „Testinstrument für den Rückhalt menschlicher Insassen“), der den Hybrid III in der Zukunft höchstwahrscheinlich beim Frontalaufprall ersetzen wird. Zwei ganz neue Modelle aus der THOR-Familie werden in diesem Beitrag vorgestellt: der THOR-5F, der weibliche Dummy aus der THOR-Familie, sowie der THOR-AV, ein Dummy, der für den zukünftigen Einsatz in automatisierten und autonomen Fahrzeugen optimiert ist.

Der THOR-5F

Der THOR-5F entspricht mit einer Größe von ca. 1,51 m und einem Gewicht von ca. 47,5 kg etwa dem fünften Perzentil der weiblichen Bevölkerung. Das bedeutet, dass nur fünf Prozent der weiblichen Bevölkerung kleiner und leichter sind als dieser Dummy. Dieser Dummy folgt damit der in der Fahrzeugsicherheit üblichen Herangehensweise, für die Auslegung von Rückhaltesystemen die 5-Perzentil-Frau, den 50-Perzentil-Mann sowie den 95-Perzentil-Mann zu verwenden.

Bereits seit einiger Zeit wird diskutiert, ob diese Herangehensweise noch zeitgemäß ist. Für den Bereich der Fahrzeugsicherheit wird dabei vor allem die Tatsache umfangreich kritisiert, dass überwiegend der 50-Perzentil-Mann sowohl im Verbraucherschutz als auch in der Gesetzgebung für den Nachweis der Erfüllung der Anforderungen eingesetzt wird. Besonders seit dem Erscheinen des Buches "Invisible Women: Exposing Data Bias in a World Designed for Men" der britischen Autorin Caroline Criado-Perez im Jahr 2019, in dem kritisiert wird, dass in allen Lebensbereichen – auch bei der Auslegung von Fahrzeugen – vor allem Männer den Maßstab darstellen, wird immer mehr hinterfragt, ob und wie Frauen besser repräsentiert werden können. [1]

Diese Argumente greifen auch Carlsson und Bremer als Vertreterinnen Schwedens in der Arbeitsgruppe für Passive Sicherheit (GRSP) beim Weltforum für die Harmonisierung von Fahrzeugvorschriften der Vereinten Nationen (UN WP.29) auf. In der 68. Sitzungsperiode im Dezember 2020 zitieren Carlsson und Bremer verschiedene Statistiken, die von einem deutlichen höheren Risiko für Frauen ausgehen, bei Fahrzeugunfällen verletzt oder getötet zu werden [2]. Carlsson und Bremer schlagen zu diesem Zweck auch vor, in Zukunft einen Dummy zu verwenden, der biomechanisch in etwa eine 50-Perzentil-Frau darstellt (Bild 1).

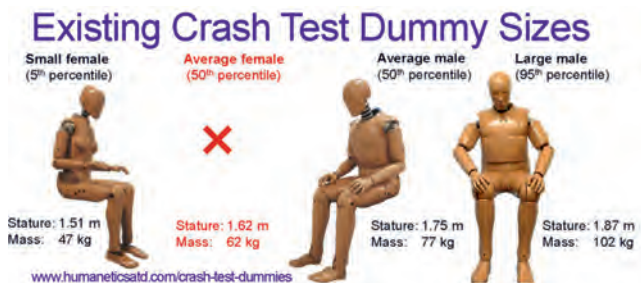


Bild 1: Existierende Größen von Crashtest-Dummies sowie die möglichen biomechanischen Daten einer 50-Perzentil-Frau [2]

Wie von Carlsson und Bremer dargestellt, gibt es einen entsprechenden Dummy zurzeit nicht. Am nächsten kommt der gesuchten Statur der so genannte Elderly-Dummy (Bild 2). Dieser wurde konzipiert, um die zukünftigen Herausforderungen der alternden Gesellschaft zu adressieren. Deshalb wurde dieser Dummy der Anthropometrie einer etwa 70-jährigen Frau angepasst. Mit einem Body-Mass-Index (BMI) von 29, einem Gewicht von ca. 73 kg und einer einer 70-Jährigen entsprechenden Masseverteilung sowie Fragilität erfüllt er jedoch nicht die Anforderungen an eine 50-Perzentil-Frau. Außerdem ist dieser Dummy ein Technologieträger, an dem neben den Einflüssen der alternden Gesellschaft auf die Fahrzeugsicherheit auch neue Dummy-Herstellungsverfahren untersucht werden. Daher ist ein kurzfristiger regelmäßiger Einsatz dieses Dummys eher unwahrscheinlich.



Bild 2: So genannter Elderly-Dummy, der der Anthropometrie einer etwa 70-jährigen Frau angepasst ist (Quelle: Humanetics)

Die Entwicklung eines neuartigen Dummys für eine 50-Perzentil-Frau würde einige Jahre dauern. Berücksichtigt man den notwendigen Abgleich der dann gemessenen Daten mit Real-daten aus Unfällen, die notwendige Entwicklung von Verletzungsrisikofunktionen sowie die Festlegung von Erfüllungskriterien, dürfte allein die Fertigstellung des Dummys eher ein Jahrzehnt dauern – und erst dann könnte man neue Fahrzeuge entsprechend auslegen. Allerdings gibt es schon heute fünf verschiedene Dummys, die zumindest die kleine 5-Perzentil-Frau in Crashtests darstellen können (Bild 3).



Bild 3: Existierende Dummies, die etwa der Anthropometrie einer 5-Perzentil-Frau entsprechen (Quelle: Humanetics)

Der wichtigste Dummy für die nähere Zukunft ist dabei der THOR-5F. Besonders im Vergleich zum heute gebräuchlichen Hybrid III 5th Female stellt dieser eine deutliche Weiterentwicklung der Crashtest-Dummies dar. Neben den bereits beim THOR-50M – dem 50-Perzentil-Mann – umgesetzten Verbesserungen gibt es einige weitere Details, die besonders hervorgehoben werden sollen:

- Durch den Einsatz von so genannten Abdominal Pressure Twin Sensors (APTS, etwa Unterleibsdruck-Doppelsensoren) ist eine bessere Bewertung der Belastung des Bauchraumes – des Abdomens – bei einem Unfall möglich. Speziell in diesem Bereich sind Frauen empfindlicher und verletzlicher als Männer.
- Die Beckenwirbelsäule entspricht besser der dreidimensionalen Geometrie der menschlichen Wirbelsäule in diesem Bereich und ist damit deutlich biofideler, also menschenähnlicher.
- Die Arme mit Ellenbogen- und Handgelenken sind besser der weiblichen Anatomie angepasst.
- Im Bereich des Thorax sind das Brustbein und die weibliche Brust in einem Bauteil zusammengefasst und entsprechen so ebenfalls besser der weiblichen Anatomie.

Die Crashsimulation des THOR-5F im Vergleich zum Hybrid III 5th zeigt, dass das neue Dummymodell sich im Test deutlich biofideler verhält (Bild 4).

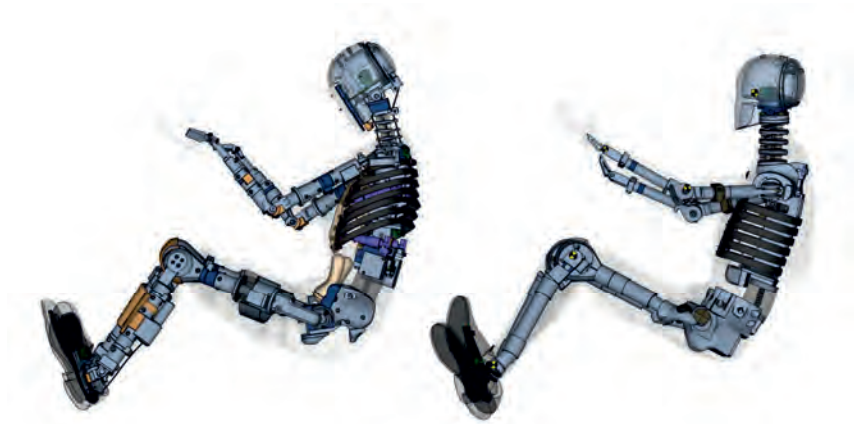


Bild 4: Vergleich des THOR-5F (links) zum Hybrid III 5th Female in der Crashesimulation (Quelle: Humanetics)

2. Der THOR-AV

Neben den „weiblichen“ Dummies sind Dummies für den zukünftigen Einsatz in automatisierten und autonomen Fahrzeugen ein weiteres Schlüsselthema in der Dummyentwicklung. Vermutlich bei allen Fahrzeugherstellern und ihren Systemlieferanten gibt es aktuell Projekte zur Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen bzw. autonomen Fahrzeugen: Zum einen soll der Fahrzeugführer entlastet und es ihm ermöglicht werden, im Fahrzeug auch anderen Tätigkeiten nachzugehen, zum anderen soll aber auch der Mensch als wesentlicher Unsicherheitsfaktor bei der Fahrzeugbedienung ersetzt werden. Verkehrsexperten sehen die Entwicklung autonomer Fahrzeuge als einen weiteren Schritt in Richtung der „Vision Zero“, bei der zukünftig kein Verkehrsteilnehmer mehr im Straßenverkehr getötet werden soll. Zusätzliche Spannung wird bei den entsprechenden Entwicklungsaktivitäten auch dadurch erzeugt, dass immer mehr Technologieunternehmen, die zwar über umfangreiche Erfahrungen im Bereich der Elektronik oder der Informationstechnik verfügen, die aber nicht selbst „klassische“ Autobauer waren bzw. sind, in diese Entwicklungsbereiche vorstoßen.

Aus verschiedenen Gründen sind die meisten Fahrzeugsicherheitsexperten allerdings auch einig, dass es Unfälle – zumindest in der Anfangszeit des autonomen Fahrzeugverkehrs – auch weiterhin geben wird.

Die Gesetzgebung scheint für ein so dynamisches Entwicklungsumfeld wie das autonome Fahren nicht „gemacht“ zu sein. Es ist einerseits einfach schwer Entscheidungen zu treffen,

wenn man die Details und die Ergebnisse der zukünftigen Entwicklungen noch nicht abschätzen kann, andererseits soll der technische Fortschritt nicht blockiert werden. So gibt es zwar durchaus Ansätze für zukünftige Regelungen rund um das automatisierte bzw. autonome Fahren, diese zielen jedoch eher darauf ab, dieses überhaupt zu gestatten. Die Insassensicherheit spielt dabei – noch – keine vordergründige Rolle.

Vor diesem Hintergrund hat Humanetics im Jahr 2018 gemeinsam mit anderen, interessierten Partnerfirmen begonnen, die Sicherheit von Fahrzeuginsassen zu untersuchen, die nicht mehr in der klassischen, vorwärts gerichteten und aufrechten Position im Fahrzeug sitzen. Dabei sollte es vor allem darum gehen, schnellstmöglich „Werkzeuge“ zur Verfügung zu haben, mit denen sich die Insassensicherheit in anderen Sitzpositionen bewerten lässt und mit denen man Erfahrungen sammeln kann, beispielsweise bei der Auslegung von Rückhaltesystemen und ähnlichem. Die heute gebräuchlichen Dummies scheinen zu diesem Zweck nur begrenzt geeignet.

In Zusammenarbeit mit den anderen Projektpartnern wurden wesentliche Punkte erarbeitet, die für den Einsatz eines Dummies als Insasse in einem autonomen Fahrzeug berücksichtigt werden müssen. Besonders hervorzuheben sind dabei folgende Aspekte:

- Die neuen Sitzpositionen müssen überhaupt erreicht werden können. Heutige Dummies sind „Sitzpuppen“, die für andere als die aufrechte Sitzposition wenig geeignet sind.
- Mit „entspannteren“ Sitzpositionen, also Sitzpositionen mit stärkerem Neigungswinkel der Rückenlehne, wie man sie etwa im Flugzeug bei einem Langstreckenflug einnimmt, steigt das Risiko, bei einem Unfall unter dem Beckengurt hindurchzurutschen. Ein solches Verhalten wird in der Fahrzeugsicherheit üblicherweise als „Submarining“ bezeichnet und soll in jedem Fall vermieden werden, da ein Rückhalten des Insassen so nicht mehr zuverlässig erfolgt.
- Die Kopfhaltung der Insassen muss besser berücksichtigt werden können: Dadurch, dass Insassen einer Tätigkeit nachgehen, dadurch, dass sie vielleicht rückwärts-gerichtet sitzen oder anderen Insassen zugewandt sind, oder aus verschiedenen anderen Gründen besteht die Gefahr, dass bei einem Unfall die Halswirbelsäule eines Fahrzeuginsassen nicht mehr in der heute typischen Vorwärts-Nickbewegung belastet wird.

Reed und Ebert haben denkbare Sitzpositionen 2018 untersucht und dabei auch diese Aspekte herausgearbeitet [3]. Basierend auf diesen Untersuchungen wurden für die Sitze Rückenlehnenwinkel von 25, 45 und 60 Grad für die weitere Entwicklung eines adäquaten Dummies sowie für seine Validierung vorgeschlagen.

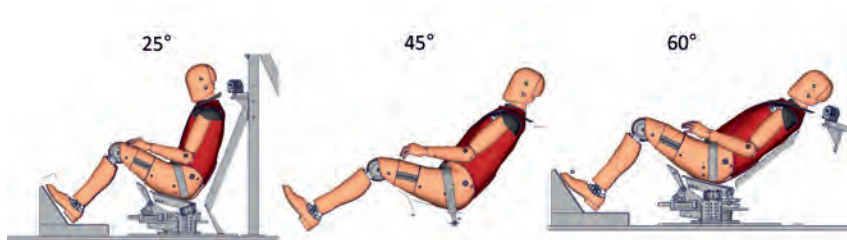


Bild 5: Dummy-Sitzpositionen für automatisierte und autonome Fahrzeuge
(Quelle: Humanetics), basierend auf den Untersuchungen von Reed und Ebert 2018 [3]

Als Basis für die Entwicklung von Dummys für automatisierte bzw. autonome Fahrzeuge dienten der THOR-50M sowie der THOR-5F aus der aktuellen THOR-Familie. Beide Dummys wurden so modifiziert, dass Winkel für die Neigung der Sitzrückenlehne bis mindestens 60 Grad untersucht werden können. In beiden Fällen wurden vor allem das Becken, das Abdomen, die Wirbelsäule sowie der Nacken modifiziert. Dabei waren die notwendigen Modifikationen am 50-Perzentil-Mann deutlich umfangreicher (siehe Bild 6), da dieser einem früheren Basis-Bau-stand entspricht als die 5-Perzentil-Frau. Im Bereich der Sensortechnik sticht vor allem hervor, dass bei beiden Dummys die Abdominal Pressure Twin Sensors im unteren Bauchraum eingesetzt werden, die eine bessere Bewertung der Belastungen durch den Beckengurt sowie beim Submarining erlauben.

Bild 6: Explosionsdarstellung der geänderten Teile des THOR-AV-50M im Vergleich zum THOR-50M
(Quelle: Humanetics)



Die Bewertung der Biofidelität, also der Menschenähnlichkeit, ist für beide Dummys nahezu abgeschlossen. Dabei wurden umfangreiche Tests durchgeführt, die einen Vergleich mit dem

Verhalten der Basisdummys aber auch mit den neuesten biomechanischen Daten aus der Forschung erlauben. Angestrebt wird als Ergebnis der Validierungstests eine möglichst hohe Bewertung der Biofidelität der Dummys, vor allem in überwiegend vorwärts bzw. rückwärts gerichteten Sitzpositionen. Dieses Ziel wird erreicht werden.

3. Neuartige CAE-Dummy-Modelle

Alle zuvor erwähnten Dummys – wie auch alle anderen von Humanetics angebotenen Dummys abgesehen vom Elderly-Dummy – stehen frühzeitig immer auch als CAE-Model zur Verfügung. Diese CAE-Modelle werden sowohl für die Entwicklung als auch für die Optimierung der Hardware eingesetzt. Des Weiteren stehen die CAE-Modelle den Kunden zur Verfügung, um ihre Fahrzeuge bezüglich der Insassensicherheit entsprechend auszulegen. Die aktuellen Entwicklungsprozesse für die CAE-Modelle sowie der Einsatz der Modelle zur Hardwareentwicklung wird im Folgenden erläutert.

Die Entwicklung der CAE-Modelle durchläuft einen bestimmten Prozess, um ein valides Modell zu bekommen: Auf der Basis validierter Materialdaten wird eine geometrische Abbildung der Dummy-Bauteile erzeugt, die Bauteile werden miteinander verbunden, danach erfolgt die Validierung auf Komponentenebene und zuletzt die Validierung in Schlittenversuchen.

- Der erste Prozessschritt befasst sich mit den Materialien. Abhängig vom jeweiligen Materialtyp (Gummi, Schaum oder ähnliches) werden entsprechende Materialversuche im quasistatischen und dynamischen Bereich durchgeführt und dann eine passende CAE-Materialkarte entwickelt.
- Im zweiten Prozessschritt werden geometrische Abbildungen der einzelnen Dummy-Bauteile mit entsprechender Netzgröße erzeugt. Diese geometrischen Abbildungen basieren beispielsweise auf CAD-Daten, gescannten Geometrien und teilweise auch auf Röntgenaufnahmen oder computertomografischen Scans. Letztere werden vor allem benötigt, um Wandstärken, Materialverteilungen etc. zu verifizieren.
- Im dritte Prozessschritt werden die Bauteile zusammengefügt. Abhängig von der Art der Bauteilverbindung in der Hardware erfolgt eine entsprechende CAE-Modellierung. Vor allem Reibeffekte spielen dabei eine große Rolle, da sie das spätere Verhalten des CAE-Modells wesentlich beeinflussen. Um mit entsprechend realistischen Reibwerten zu arbeiten, werden Reibversuche zwischen verschiedenen Materialpaarungen durchgeführt.
- Danach erfolgt die Validierung des CAE-Modells auf Komponentenebene. Versuche werden durchgeführt, die die Belastungen im späteren Einsatz widerspiegeln. Dabei werden vor allem hinsichtlich der Geschwindigkeit, der Dehnung bzw. Stauchung sowie

der Belastungsrichtung ähnliche Belastungsmodi erzeugt, wie sie später in einem realen Einsatz des Dummys auftreten.

- Als fünfter und letzter Prozessschritt erfolgt die Validierung in Schlittenversuchen. Dabei wird wieder versucht, Belastungen zu erzeugen, die denen im realen Einsatz entsprechen, jedoch mit reduzierten Randbedingungen. Ziel der Versuche ist es schließlich, den Dummy – und nicht die Umgebungsvariablen – zu validieren.

Beispielhaft werden im Anschluss die Validierung auf Komponentenebene sowie die Validierung im Schlittenversuch am Beispiel des THOR-AV-50M beschrieben.

3.1. Validierung auf Komponentenebene: Beispiel APTS

Wie bereits beschrieben, werden sowohl bei der 5-Perzentil-Frau als auch beim 50-Perzentil-Mann des THOR-AV so genannte Abdominal Pressure Twin Sensors (APTS) verwendet. Diese Drucksensoren decken den gesamten Unterbauchbereich ab und ermöglichen eine bessere Erkennung des so genannten Submarinings, das durch das Abrutschen des Gurtbandes über den Beckenknochen gekennzeichnet wird. Bild 7 zeigt den Aufbau eines solchen Drucksensors.

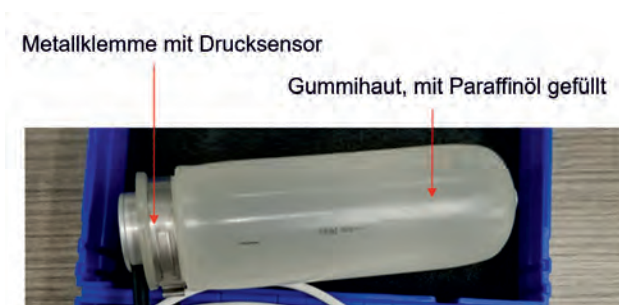


Bild 7: Aufbau eines der Abdominal Pressure Twin Sensoren (Foto: Humanetics)

Der Drucksensor besteht aus einer mit Paraffinöl gefüllten Gummihaut. Diese Gummihaut ist am unteren Ende in einen Abschlussdeckel geklemmt und mit einem Drucksensor verbunden. Die Gummihaut wurde mit Hilfe verschiedener Materialversuche im quasistatischen und dynamischen Bereich für das CAE-Modell validiert. Der gesamte Drucksensor wurde anschließend über Pendelversuche mit verschiedenen Geschwindigkeiten bewertet. Ein Beispiel des Aufbaus und der Korrelation zwischen dem Pendeltest und der Finite-Elemente-Analyse mit dem CAE-Modell ist in Bild 8 gezeigt, als Validierungsgrößen wurden der gemessene Druckverlauf im Sensor sowie die Verzögerung des Pendels herangezogen.

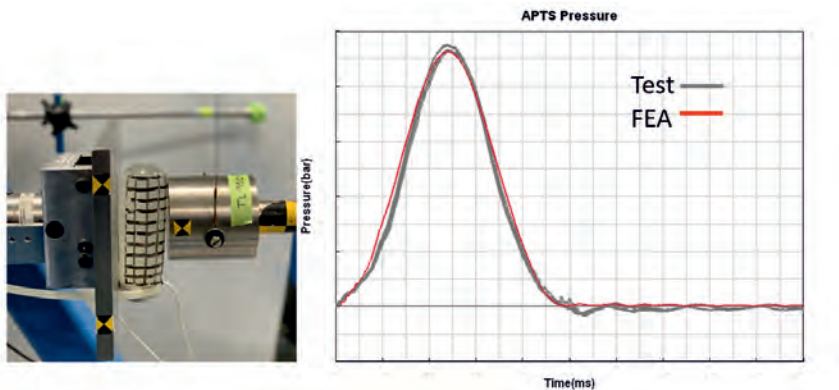


Bild 8: Versuchsaufbau für die Validierung der APTS sowie Vergleich der Ergebnisse aus dem realen Test sowie aus der Finite-Elemente-Analyse (Quelle: Humanetics)

Für die Validierung des gesamten Abdomens wurden zwei verschiedene Pendelversuche auf dem vollständigen Dummy im Bauchbereich durchgeführt. Beide Pendelversuche wurden mit verschiedenen Frontaufsätzen durchgeführt, um unterschiedliche Abdomenbelastungen darzustellen. Der Aufbau beider Versuche ist in Abbildung 9 gezeigt.

Mit den gezeigten Schritten wurden die APTS sowie das Abdomen für die Verwendung im THOR-AV hinreichend validiert.

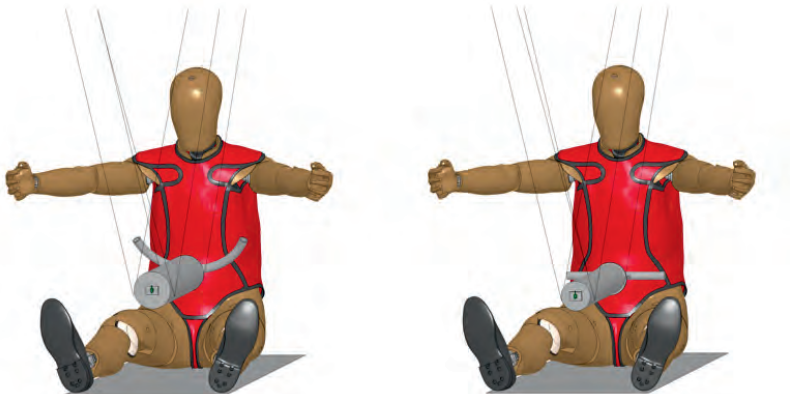


Bild 9: Pendelversuch mit einem halben Lenkrad (links)
bzw. mit einem Balken (rechts) (Quelle: Humanetics)

3.2. Validierung in Schlittenversuchen

Für die Validierung des Dummy-CAE-Modells wurden auch Schlittenversuche durchgeführt. Diese wurden verglichen mit Simulationen und Tests mit dem Basisdummy – hier dem THOR-50M – sowie mit existierenden Videos von Versuchen mit Post-Mortem-Testobjekten (PMTO, englisch auch „Post Mortem Human Subjects“ (PMHS)), die von Uriot u.a. durchgeführt worden waren [4].

Um in den Schlittentests einen Einfluss des Sitzes möglichst auszuschließen, wurde eine vereinfachte Sitzkonstruktion verwendet, der so genannte LAB-Sitz (Bild 10) nach Uriot u.a. [4]. Mit dem LAB-Sitz lassen sich ein ähnliches Rückhalte-Verhalten für den Insassen sowie eine ähnliche Kinematik des Insassen erzeugen wie mit einem richtigen Fahrzeugsitz, ohne jedoch die durchaus variierenden Materialeigenschaften von Sitzschäumen und anderen Komponenten berücksichtigen zu müssen. Um trotzdem verschiedene Sitzkonfigurationen untersuchen zu können, besteht die Möglichkeit, beim LAB-Sitz über verschiedene Federn verschiedene Sitzsteifigkeiten einzustellen.

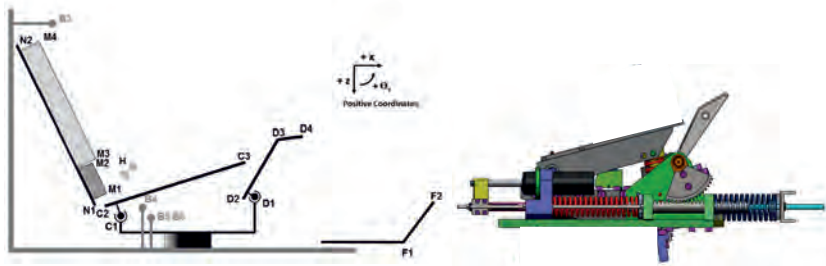


Bild 11: LAB-Sitz nach Uriot u.a. [4]: links prinzipieller Aufbau, rechts Sitzfläche mit den verschiedenen Verstellmöglichkeiten

Bei den Schlittenversuchen konnte eine gute Korrelation des THOR-AV-CAE-Modells mit den PMTO-Versuchen gezeigt werden. In dem gezeigten Beispiel in Bild 11 ist dieses unter anderem an der Oberkörperrotation zu erkennen, die durch die neue Lendenwirbelsäule des THOR-AV unterstützt wird.

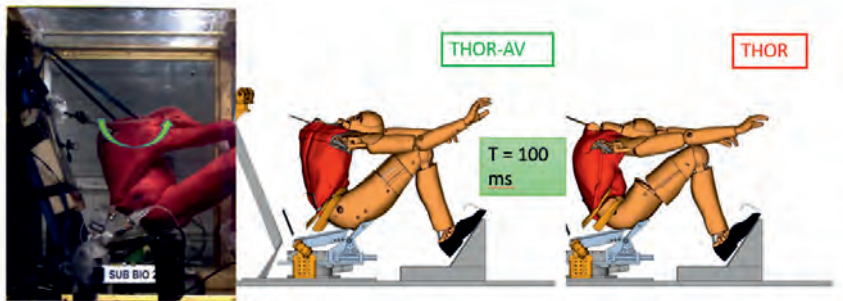


Bild 11: Korrelation der Oberkörperrotation des THOR-AV (Mitte) mit einem PMTO-Test (links) sowie mit dem Basisdummy (Quelle: Humanetics)

Danksagung

Die Autoren bedanken sich vor allem bei ihrem Kollegen Jerry Wang, der die Ausarbeitung dieser Veröffentlichung aktiv unterstützt hat.

Quellen

- [1] C. Criado-Perez: Invisible Women: Exposing Data Bias in a World Designed for Men. Verlag Chatto & Windus 2019
- [2] A. Carlsson, P. Bremer: Does female occupants have the same protection level as male occupants? Are Crash test Dummies Representative of the Population? Präsentation bei der 68. GRSP, Genf, 7. – 11.12.2020, <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2020/wp29grsp/GRSP-68-07e.pdf> (16.10.2021)
- [3] M. P. Reed, S. M. Ebert: Effects of Recline on Passenger Posture and Belt Fit. Final Report UMTRI-2018-2, University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor, September 2018
- [4] J. Uriot u.a.: Reference PMHS Tests to Assess Submarining. Stapp Car Crash Journal Vol. 59, November 2015

Submariningverhalten unterschiedlicher FE-Menschenmodelle in Sitzpositionen für automatisiertes Fahren

Submarining behaviour of different FE Human Body Models in seating positions for autonomous driving

M.Sc. **Ambrish Srivats**, M.Sc. **Alexander Sporbert**,
Dr.-Ing. **Martin Unger**,
IAT Ingenieurgesellschaft für Fahrzeugtechnik, Berlin

Zusammenfassung

Zukünftige Fahrzeuge werden eine Vielfalt an unterschiedlichen Sitzpositionen für die Insassen ermöglichen, dies zeigen diverse Konzepte.

Aktuelle Rückhaltesysteme sind auf diese entspannten, teils liegenden, Sitzpositionen nicht ausgelegt. Neue Herausforderungen werden somit an die Fahrzeugsicherheitsentwicklung gestellt. Bekannte und beherrschbare Zusammenhänge müssen neu bewertet und mit neuen Lösungsansätzen muss das erforderliche Sicherheitsniveau realisiert werden.

Basierend auf den Untersuchungen zu den VDI-Vorträgen von 2017 und 2019 [7,8], wird der aktuelle Stand bezüglich des Submariningverhaltens und der Belastung der Lendenwirbelsäule des THUMS v6 vergleichend dargestellt. Die Auswirkungen der gegenüber THUMS v4 veränderten Beckengeometrie werden detailliert untersucht und verglichen. Dies soll die Wahl der eingesetzten Insassenmodelle für entspannte Sitzpositionen transparenter darstellen, um die Auslegung der Rückhaltesysteme sicherer und zugleich effizienter gestalten zu können.

Abstract

Futuristic vehicles will offer a variety of seating positions for the occupants, as shown by various concept designs.

The current restraint systems are not adapted to suit these relaxed, and partly lying, seating positions. New challenges are hence posed on the vehicle safety developments. Familiar and controllable coherences must therefore be reassessed, and the required level of safety must be achieved with new approaches.

Based on the investigations in the VDI-Presentations of 2017 and 2019 [7,8], the current status of submarining tendencies and loads on the lumbar spine of the THUMS v6 is presented comparatively. The effects of the modified pelvis geometry compared to that of the THUMS v4 are investigated in detail and compared. This study is intended to provide transparency in the choice of occupant models used to analyze relaxed seating positions. The restraint systems can thereby be designed more safely and efficiently.

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage
2. Submariningverhalten THUMS v6 gegenüber THUMS v4, v5 und THOR
3. Einfluss unterschiedlicher Wirbelsäulenkrümmungen auf die Lendenwirbelsäulenbelastung bei THUMS v4 vs THUMS v6
4. Fazit und Ausblick

1. Ausgangslage

Die Automobilindustrie befindet sich im Umbruch, und die zunehmenden Zulassungszahlen von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen in Deutschland sind im vergangenen Jahr stärker gestiegen als zuvor. Gleichmaßen werden die Fahrzeugführer immer mehr bei ihren Fahraufgaben unterstützt. Das Ziel der vollständig automatisiert fahrenden Fahrzeuge rückt immer näher, bringt jedoch auch neue Anforderungen an die passive Fahrzeugsicherheit mit sich. Bild 1 zeigt eine mögliche Sitzposition, in welcher der Insasse entspannt reisen kann oder sich anderen Tätigkeiten als dem Führen des Kraftfahrzeugs widmen kann.

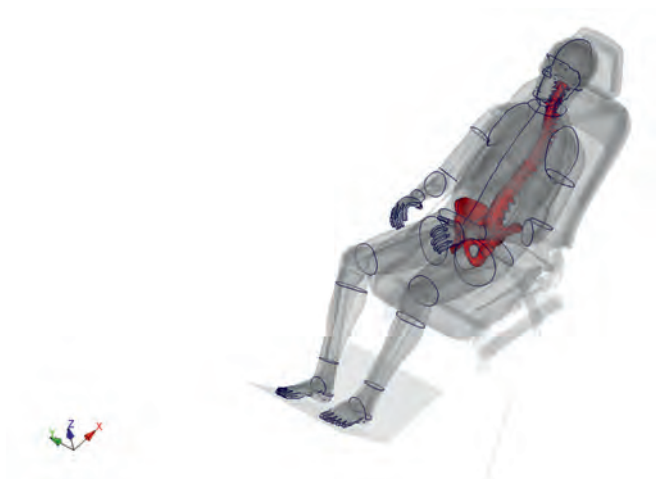


Bild 1: Entspannte Sitzposition eines Menschmodells [6].

Wie in [7] und [8] dargestellt, ist die Insassenkinematik während eines Crashes nicht mit einer herkömmlichen Sitzposition vergleichbar. Die Submariningneigung steigt und wenn diese erfolgreich vermieden wird, erhöht sich die Lendenwirbelbelastung auf ein kritisches Maß, da die hauptsächliche Lastenleitung in die Wirbelsäulenrichtung verlagert wird.

Mit einer Thoraxmasse von $m_{Thorax} \approx 43\text{kg}$ für einen erwachsenen Mann, mit durchschnittlicher Anthropometrie, werden die Lendenwirbelkörper durch Axialkraft und eingeleitete Momente teils überkritisch beaufschlagt (siehe Bild 2). Aktuell müssen Grenzwerte aus der Luftfahrtindustrie übernommen werden, da für den Kraftfahrzeugbereich bisher keine Lastfälle definiert sind [vgl. 1]. Zu hohe Belastungen in der Wirbelsäule können zu Frakturen der Wirbelkörper oder Verletzungen der Bandscheiben und Bändern führen.

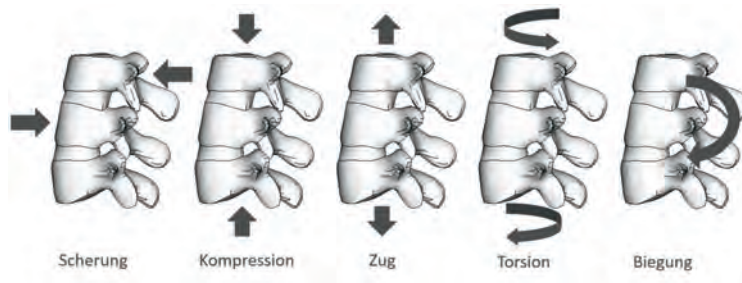


Bild 2: Belastungen der Wirbelsäule

Dynamische Stauchversuche [3] zeigen, dass Kompressionsfrakturen schon bei ca. $F_z = 2\text{ kN}$ bis $F_z = 6\text{ kN}$ auftreten. Für die maximale Kompression der Lendenwirbelsäule ist in der Luftfahrt ein Wert von $F_z = 6.672\text{ kN}$ definiert. Die auftretende Beschleunigung von $a_{100\text{ms}} = 40g$ darf nicht überschritten werden, da sich die inneren Organe in Körperlängsrichtung nicht am Skelett abstützen können, wodurch es zu Rupturen der inneren Organe kommen kann. Neben den Kräften und Beschleunigungen sollte der Momenteintrag an der Lendenwirbelsäule minimiert werden, da mit steigendem Biegemoment die kritische Axialkraft sinkt. Bei einer axialen Kompression von $F_{z1} = 5.009\text{ kN}$ und einem Biegemoment von $M_{y1} = 237\text{ Nm}$ kann eine Fraktur auftreten. Steigt die Kraft auf $F_{z2} = 5.911\text{ kN}$, so sinkt das erträgliche Biegemoment auf $M_{y2} = 165\text{ Nm}$ [4]. Darüber hinaus ist die Haltung der Wirbelsäule zum Zeitpunkt der Belastung über die Verletzungsschwere der Wirbelsäule entscheidend [2]. Für diese Untersuchung wird eine kritische Axialkraft von $F_{z\text{krit}} = 6.0\text{ kN}$ festgelegt.

Im Folgenden werden die Einflüsse der Crashbelastungen auf den Insassen mit Hilfe von Menschmodellen dargestellt. Bereits aus den vorhergehenden Untersuchungen bekannte Ergebnisse werden vergleichend dem THUMS in der Version 6 mit und ohne Muskeltonus gegenübergestellt. Hauptaugenmerk wird dabei auf das Submariningverhalten in aufrechter Sitzposition gelegt. Darüber hinaus wird der Einfluss der Muskelaktivitäten in entspannter Oberkörperlage auf die Lendenwirbelsäulenbelastungen dargestellt.

Die aufgeführten Simulationen werden mit einem THUMS v4.02, v5.0 und v6.1 mit dem Solver LS-Dyna durchgeführt.

2. Submariningverhalten THUMS v6 gegenüber THUMS v4, v5 und THOR

In [6] wurde bereits das Submariningverhalten des THOR-Dummys und des THUMS v5 Menschmodell untersucht und gegenübergestellt.



Bild 3: Submarininguntersuchung– aufrechter Sitzposition (Designraum THUMS links/ THOR rechts, jeweils x-z-Ebene)

Bild 3 zeigt das FE-Modell eines Insassen mit einem Dreipunktgurt. Auf der rechten Seite sind die Designräume (150mmx70mmx170mm) des THUMS (links) und des THOR (rechts) in der x-z-Ebene dargestellt, in welchem der Effektivpunkt der Gurtschlossanbindung variiert wurde. Insgesamt werden so 60 unterschiedliche Anbindungspunkte pro Modell simuliert und das Submariningverhalten der drei oben genannten THUMS-Modelle mit dem THOR FE-Modell verglichen. Die Bewertung des Submarinings erfolgt durch die Berechnung der Iliac Kraft. Der Iliac Force Drop ist ein robuster Indikator für auftretendes Submarining [Vgl. 1]. Beim Fahrzeugsitz handelt es sich um einen modifizierten Toyota Yaris Sitz. Dieser wurde entsprechend der Fahrzeugherstellervorgaben angepasst, da das FE-Strukturverhalten nicht den heutigen Vorgaben entspricht. Dadurch wird eine robuste Submarininganalyse ermöglicht. Weiterhin wird ein generischer Schlittenpuls in x-Richtung und ein Dreipunktgurt Rückhaltesystem mit Gurtstraffer und Kraftbegrenzung bei $F_{Loadlimit} = 6.5kN$ verwendet.

Werden die Ergebnisse des THOR mit denen des THUMS v5 (Bild 4) verglichen, so fällt auf, dass der THUMS v5 eine deutlich geringere Submariningneigung aufweist. Nur mit effektiven Gurtschlossanbindungspunkten in der untersten Lage und in Fahrtrichtung weit vorne zeigt der THOR kein Submarining, wohingegen der THUMS v5 in den meisten Fällen ohne Submarining bewertet wird.

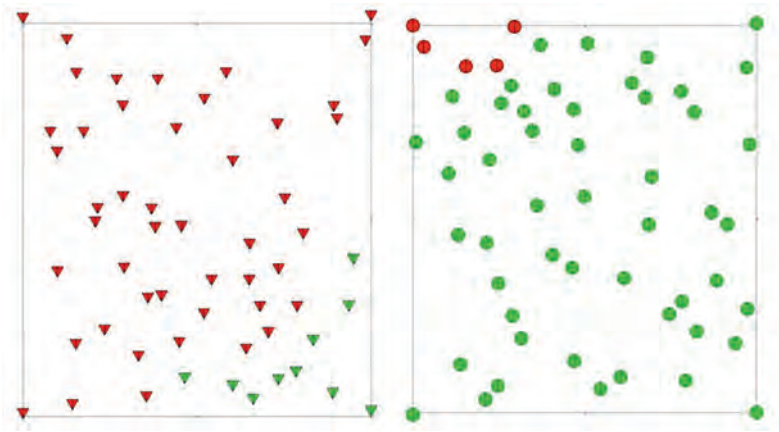


Bild 4: Ergebnisübersicht Submarining (rot) THOR links vs. THUMS v5 rechts

Erklärt werden kann dies einerseits durch unterschiedliche Beckengeometrien – der THOR hat im Vergleich zum THUMS v5 ein schmaleres Becken – und darüber hinaus einen in z-Richtung kürzeren Beckenkamm (Bild 5). Andererseits ist zu erkennen, dass der Beckenschaum des THOR (rechte Seite) den Beckenkamm fast komplett abdeckt. Dadurch wird die initiale Beckengurtlage weiter im Bereich des Abdomens positioniert und führt so während der Vorverlagerung verstärkt zu Submarining.

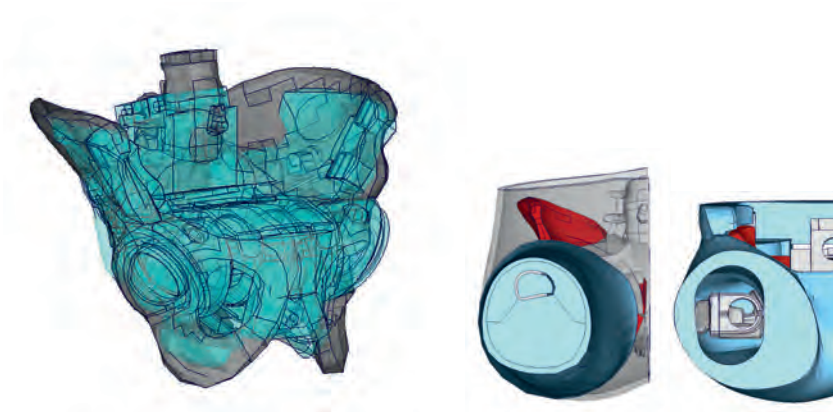


Bild 5: Geometrievergleich Becken THUMS (grau bzw. links) vs. THOR (cyan bzw. rechts)

Ein ähnliches Bild zeigt der Vergleich zwischen THUMS v4 und THUMS v6. Auch der THUMS v4 hat ein schmales Becken, was in der Sumarininguntersuchung zu einer größeren Anzahl an Submariningfällen führt (Bild 6: Ergebnisübersicht Submarining (rot) THUMS v4 oberes Dreieck vs.

THUMS v6 unteres Dreieck

). Der THUMS v6 hat im Vergleich zum THUMS v4 eine leicht veränderte Beckengeometrie (Bild 7). Dies führt dazu, dass der Ergebnisraum des THUMS v6 eine größere Anzahl an positiven Ergebnissen aufweist. Der Bereich der effektiven Gurtschlossanbindungspunkte ist nach oben und entgegen der Fahrtrichtung deutlich erweitert und nähert sich so dem THUMS v5 leicht an.

Da der THUMS v6 mit einem Muskeltonus wie der THUMS v5 gerechnet werden kann, ist ein zusätzlicher Vergleich der Stichproben im Grenzbereich zwischen Submarining/kein-Submarining sinnvoll. Der Einfluss des aktiven Muskeltonus auf das Submarining kann so signifikant überprüft werden.

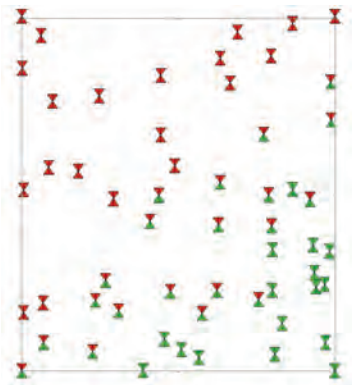


Bild 6: Ergebnisübersicht Submarining (rot) THUMS v4 oberes Dreieck vs. THUMS v6 unteres Dreieck

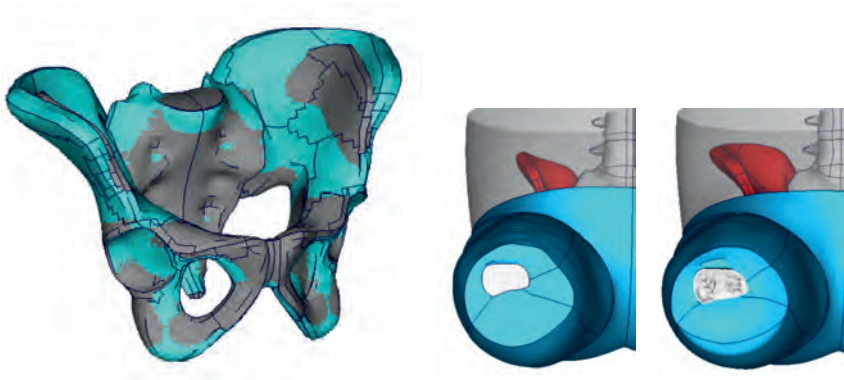


Bild 7: Beckengeometrie THUMS v4 (grau bzw. links) vs. THUMS v6 (cyan bzw. rechts)

Bild 8 zeigt den Einfluss des aktiven Muskeltonus beim THUMS v6 auf das Submariningverhalten im überprüften Designraum. Zu erkennen ist, dass die Grenze zwischen positiven und negativen Ergebnissen weiter verschoben werden kann und so weniger Submariningfälle zu beobachten sind.

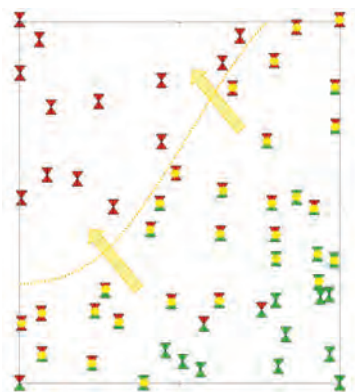


Bild 8: Ergebnisse THUMS v6 mit aktivem Muskeltonus (gelb- ohne Submarining)

Dieses Verhalten ist beim THUMS v5 mit aktiviertem Muskeltonus nicht zu beobachten. Dort ist kein Unterschied im Submariningverhalten festzustellen.

Damit lassen sie die betrachteten FE-Insassenmodelle bezüglich ihres Submariningverhaltens einordnen. Das Modell des THOR ist sehr empfindlich und neigt stark zum Submarining. Vergleichbar damit ist der THUMS v4. Beide haben ein schmales Becken und ausgeprägtes Becken- und Femurgewebe. Demgegenüber steht der sehr robuste THUMS v5 gegen Submarining. Dazwischen liegt der THUMS v6 mit einem recht ausgewogenen Verhalten. Diese Tendenz kann mit der Verwendung des aktiven Muskeltonus positiv verschoben werden und stellt so einen Kompromiss bei der Auslegung von Rückhaltesystemen dar. Für eine Worst-Case-Betrachtung ist der THUMS v4 vorzuziehen.

3. Einfluss unterschiedlicher Wirbelsäulenkrümmungen auf die Lendenwirbelsäulenbelastung bei THUMS v4 vs THUMS v6

In [8] wurde gezeigt, dass für den zurückgelehnten Insassen erhöhte Anforderungen an die Positionierung beim Einsitzen eines FE-Menschmodells bestehen. Die Erkenntnisse aus den Insassenschutzsimulationen decken sich mit den Beobachtungen aus der Luftfahrt [2]. So führen schon kleinere Abweichungen des Wirbelsäulenverlaufs in vergleichbarer Sitzposition zu stark abweichenden Lendenwirbelbelastungen. Bild 9 zeigt die Lendenwirbelkrümmung eines vermessenen Probanden (grau) und der Standard THUMS v4 Krümmung (schwarz).



Bild 9: Vergleich der Wirbelsäulenkrümmung: vermessener Proband (grau) und THUMS v4 (schwarz)

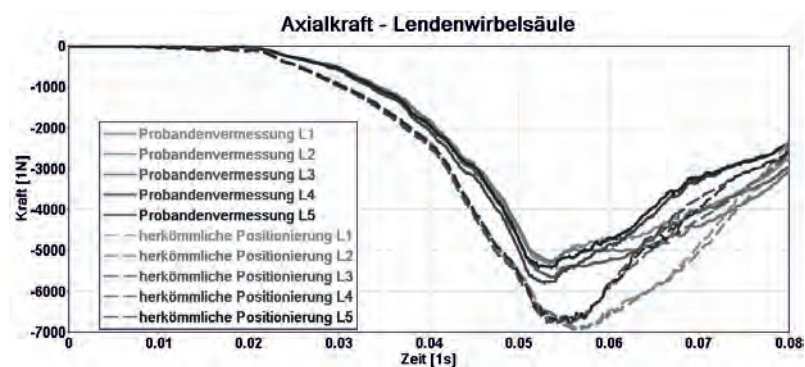


Bild 10: Lendenwirbelbelastung– Axialkraft

Die resultierenden Axialkräfte an den einzelnen Lendenwirbelkörpern des THUMS v4 (Bild 10) liegen bei nicht justierten Wirbelkörperwinkeln oberhalb der kritischen Belastung von hier festgelegten $F_{z,krit} = 6.0\text{ kN}$. Mit entsprechender Probandenvermessung liegen die Werte bis zu $F_z = 1.7\text{ kN}$ darunter.

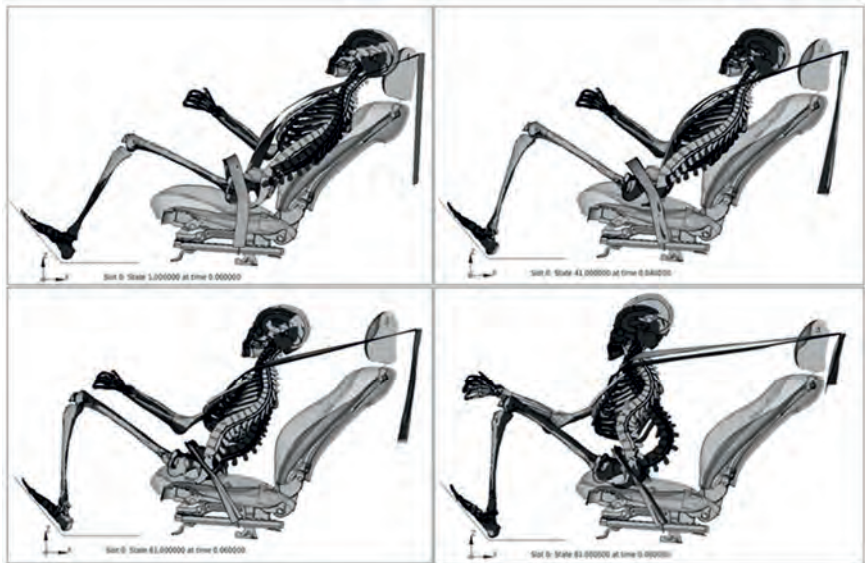


Bild 11: Vergleich der Wirbelsäulenkrümmung in identischer Sitzhaltung

Bild 11 zeigt anschaulich die unterschiedliche Kinematik eines THUMS v4 mit kyphotischer und lordotischer Wirbelsäulenkrümmung während der Vorverlagerung bei einem Frontalaufprall mit vergleichbarer initialer Sitzposition. Aufgrund der Axialbelastung biegt sich die Lendenwirbelsäule demnach in unterschiedliche Richtungen.

Die Gegenüberstellung der Lendenwirbelbelastungen des THUMS v4 und des THUMS v6 ohne Muskeltonus zeigt, dass auch hier das Update des FE-Modells zu veränderten Ergebnissen führt. Bild 12 und Bild 13 zeigen exemplarisch die Wirbelbelastungen für L5 und L1. Am unteren Wirbelkörper L5 liegt die Axialkraft beim THUMS v4 oberhalb des kritischen Wertes. Die Momentenverläufe sind ähnlich und unterkritisch. Am Wirbelkörper L1 sind

hingegen die Kräfte vergleichbar, wenn auch überkritisch für den betrachteten Lastfall, das Moment liegt jedoch beim THUMS v6 um etwa ein Drittel höher als beim THUMS v4.

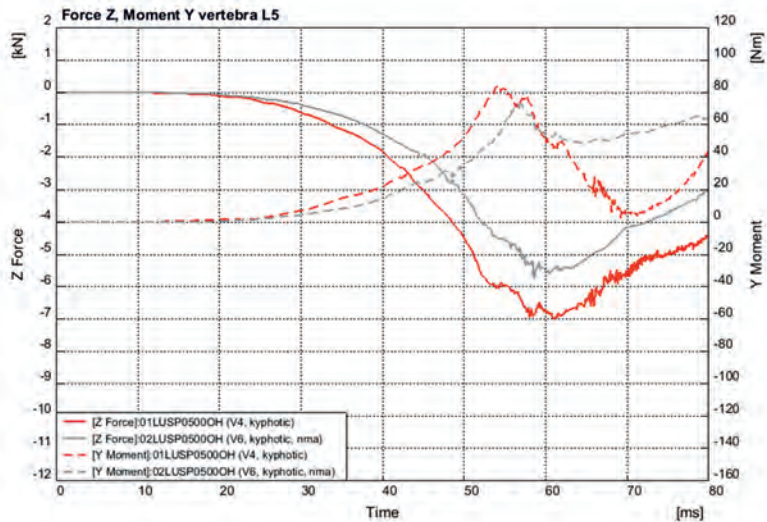


Bild 12: Vergleich Wirbelsäulenbelastung L5

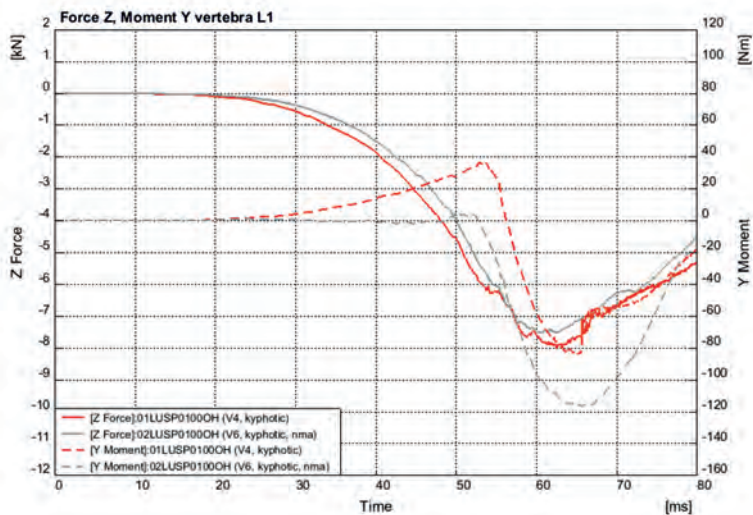


Bild 13: Vergleich Wirbelsäulenbelastung L1

Der Vergleich des THUMS v6 mit und ohne Muskeltonus (Bild 14) zeigt am Wirbelkörper L5 exemplarisch, dass der normale Muskeltonus keinen Unterschied zur Einstellung „braced“ aufweist. Jedoch ist eine Veränderung der Axialkräfte und ein veränderter Momentenverlauf zu der Rechnung ohne Muskeltonus zu erkennen. Die Axialkraft liegt etwas höher mit Muskeltonus und führt im betrachteten Lastfall zu einem leicht überkritischen Wert.

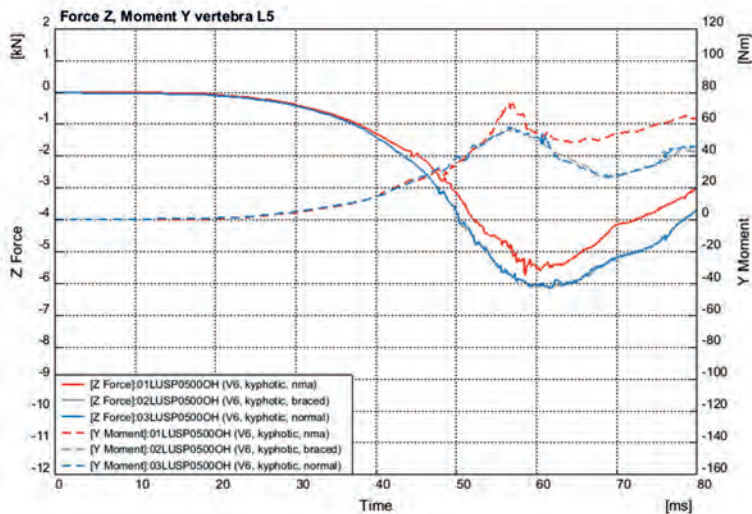


Bild 14: Vergleich der Wirbelsäulenkrümmung in identischer Sitzhaltung

Die Bewertung der Lendenwirbelbelastung mit Muskeltonus ist schwierig auf das Feld übertragbar, da nicht vorhergesagt werden kann, wie sich eine Person im Fahrzeug verhält. Auch wenn sie aktiv am Verkehrsgeschehen teilnimmt, kann nicht davon ausgegangen werden, dass ein stärkerer Muskeltonus im Crashfall vorliegt.

4. Fazit und Ausblick

Die Untersuchung zeigt, dass die verschiedenen Versionen des THUMS unterschiedliche Ergebnisse bezüglich ihres Submariningverhaltens aufweisen. Auch sind die Ergebnisse der Lendenwirbelbelastung zwischen THUMS v4 und THUMS v6 verschieden voneinander.

Ein Vergleich des Submariningverhaltens des THUMS v6 mit den Versionen v4 und v5 zeigt, dass die zwei sehr unterschiedlich reagierenden THUMS Modelle durch die neuere Version eine geeignete Ergänzung finden. Für Worst-Case-Betrachtungen ist der THUMS v4 weiterhin am geeignetsten anzusehen, allerdings ist anzumerken, dass seine schmale Beckengeometrie und das hohe Femurgewebe wohl weniger repräsentativ sind. Jedoch ist seine Submariningneigung mit dem THOR vergleichbar.

Die Robustheit des THUMS v5 gegenüber Submarining scheint für Auslegung von Rückhaltesystemen und Fahrzeugsitzen weniger geeignet. Daher bietet der THUMS v6 einen guten Kompromiss und hilft so eine sinnvolle Abstimmung im Fahrzeug zu finden. Der Muskeltonus kann zusätzlich zur Abstimmung hinzugezogen werden, um die Robustheit des Systems zu überprüfen.

In der Liegeposition zeigt der Vergleich von THUMS v4 zu THUMS v6 auch Unterschiede in Bezug auf die Lendenwirbelbelastung. Diese fallen allerdings geringer aus als bei der Bewertung des Submarinings. Hier wäre für eine kritische Betrachtung der THUMS v4 geeigneter, jedoch kann mit stark zurückgeneigtem Becken das Submarining bei ihm kaum unterbunden werden. Mit Submarining ist eine Bewertung der Lendenwirbelbelastungen nicht durchführbar. Daher stellt der THUMS v6 auch hierfür das geeignete Menschmodell dar.

Da hier ausschließlich 50-Perzentil-Menschmodelle verwendet wurden, sollten in weiterführenden Studien andere Körpergrößen betrachtet werden. Generell ist ein 5-Perzentil-Menschmodell für die Bewertung von Submarining aufgrund seiner Größe besser geeignet. Auch bieten unterschiedliche Körperproportionen das Potential auf individuelle Bedürfnisse der Insassen Rücksicht zu nehmen, um so den Insassenschutz in der Fahrzeugsicherheit in Zukunft zu erhöhen.

Literaturverzeichnis

- [1] EuroNCAP. Assessment Protocol – Adult Occupant Protection. 2015.
- [2] Pipping, T., Verletzungen der Wirbelsäule bei nicht tödlichen Rettungsausstiegen mit dem Schleudersitz, Flug- und Reisemedizin 2015, 20-25.
- [3] Schmitt, Kai-Uwe, et al. Trauma-Biomechanik. Zürich: Springer Vieweg, 2014. Bd. 2. Auflage.
- [4] BIOMECHANICAL RESPONSE OF THE LUMBAR SPINE IN DYNAMIC COMPRESSION. Duma, Stefan M., et al. s.l.: Virginia Tech – Wake Forest, Center for Injury Biomechanics, Toyota Motor Corporation, 2018.
- [6] Unger, M., Cebeci, Ö.: An approach to compare the submarining behavior of THUMS vs. THOR, 6. Internationales Symposium "Human Modeling and Simulation in Automotive Engineering", Heidelberg, 2016.
- [7] Unger, M., Cebeci, Ö.: Neue Sitzpositionen im automatischen Fahrmodus – Eine Herausforderung für die Bewertung von Submarining, 11. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit VDI-Berichte 2312, VDI Verlags GmbH, Düsseldorf 2017.
- [8] Unger, M., Hintze, D.: Entspannte Sitzpositionen im automatisierten Fahrmodus – Gefahr für die Lendenwirbelsäule bei einem Crash?, 12. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit VDI-Berichte 2364, VDI Verlags GmbH, Berlin 2019.

Sicherheit ist keine Frage des Antriebs

Safety is Not a Question of the Drivetrain

Rainer Justen, Dr. Markus Hermle, Prof. Dr. Rodolfo Schöneburg,
Mercedes-Benz AG, Sindelfingen

Kurzfassung

Mit der Electric Vehicle Architecture (EVA) hat Mercedes-Benz erstmals eine reine Plattform für Elektrofahrzeuge entwickelt. Mit dem EQS ist im Sommer 2021 das erste Fahrzeug, das auf dieser neuen, konsequent auf Elektroantriebe ausgelegten Plattform entwickelt wurde, vorgestellt und im Markt eingeführt worden. Weitere Fahrzeugmodelle auf dieser Plattform werden in Kürze folgen. Mit dem EQC und EQA befinden sich bereits Elektrofahrzeuge von Mercedes-Benz im Markt, die als sogenannte Convertible-Konzepte, noch auf konventionellen Karosserieplattformen für Verbrennungskraftfahrzeuge basieren. Für die Fahrzeugsicherheit ist es in beiden Fällen möglich, die auf jahrzehntelanger Erfahrung basierende Sicherheitsperformance aus der Welt der Verbrennungskraftfahrzeuge, auf die zusätzlichen Herausforderungen der Hochvolt-Sicherheit (HV) von Elektrofahrzeugen in idealer Weise zu transformieren.

In diesem Beitrag werden die Sicherheitseigenschaften der Elektrofahrzeuge von Mercedes-Benz an den Beispielen des EQC und des neuen EQS detailliert beschrieben. Neben der Struktur- und Insassensicherheit, wird dabei auch insbesondere auf die herausfordernden, neuen Fragestellungen der HV- und Batteriesicherheit eingegangen. Es wird gezeigt, dass bei der Crashesicherheit von Elektrofahrzeugen keine Einbußen im Vergleich zur anerkannt hohen Sicherheit von konventionellen Fahrzeugen eingegangen werden müssen.

Abstract

The Electric Vehicle Architecture (EVA) marks the first time that Mercedes-Benz has developed a platform solely for electric vehicles. The EQS model that was presented and launched in summer 2021 is the first vehicle developed on this new platform designed consistently for electric drives. Further vehicle models are to follow on this platform shortly. In the EQC and the EQA, Mercedes-Benz already has two electric vehicles on the market that are known as "convertible concepts." This means that they are still based on conventional body

platforms for combustion power vehicles. In terms of vehicle safety, in both cases it has been possible to transfer the safety performance that comes from decades of experience in the world of combustion power vehicles to the additional challenges of high-voltage safety (HV) in electric vehicles in an ideal way.

This article describes the safety features of Mercedes-Benz electric vehicles in detail using the EQC and the new EQS as examples. In addition to structural and occupant safety, the new and challenging issues of high-voltage (HV) safety and battery safety in particular are elaborated on in detail. The article shows that there is no reduction in the crash safety of electric vehicles when compared with the acknowledged high safety levels in conventional vehicles.

1. Einleitung

Im Jahr 2020 scheint die Elektromobilität ihren endgültigen Durchbruch erreicht zu haben. Die im Jahr 2011 ausgesprochene Zielsetzung der Bundesregierung, 1 Million Elektrofahrzeuge bis zum Jahr 2020 auf Deutschlands Straßen zu haben, wurde lange Zeit als zu ambitioniert und nicht für erreichbar angesehen. Im Jahr 2017 wurde die Zielsetzung sogar offiziell bis in die Jahre 2022/23 verschoben. Während bis Ende 2019 der Fahrzeugbestand auch tatsächlich nur bei ca. 240.000 Fahrzeugen lag, davon ca. 135.000 reine Elektrofahrzeuge und 105.000 Plug-In Hybride kamen alleine im Jahr 2020 jeweils ca. 200.000 Elektrofahrzeuge und Plug-In Hybride dazu. Der Marktanteil ist damit sprunghaft auf 10-15% aller Neuzulassungen gestiegen. Auch im ersten Halbjahr 2021 liegt die Zulassungssteigerung im deutlich dreistelligen Prozentbereich, so dass das vor 10 Jahren anvisierte Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen in 2020 letztlich dann doch nur um ein halbes Jahr verfehlt wurde. Im Juli 2021 wurde das Erreichen der Millionenmarke offiziell verkündet.

Neben Gründen, wie einem zu geringes Angebot an Fahrzeugen, zur geringer Reichweite, fehlender Ladeinfrastruktur, wurde auch die Unfallsicherheit bisher medial sehr kritisch diskutiert und hat zu einer starken Verunsicherung bei den Kunden und auch den Rettungsorganisationen geführt. Über nahezu jeden Einzelfall, bei dem ein Elektrofahrzeug in einen Unfall involviert war, wurde sehr ausführlich berichtet und dabei über die Gefahr von Stromschlägen für Insassen und Rettungskräfte spekuliert. Ebenso wurde mit jedem einzelnen Fahrzeug-, bzw. Batteriebrand ein deutlich erhöhtes Brandrisiko von Elektrofahrzeugen vermutet.

Noch ist der Anteil von Elektrofahrzeugen im Straßenverkehr zu gering, um wirklich repräsentative Aussagen über diese Fragestellungen geben zu können. Es sind aber andererseits auch schon genügend Unfälle bekannt und ausgewertet, um bisher zumindest festzustellen, dass es dabei keine besonderen, atypischen Auffälligkeiten gab. Stromschläge infolge eines Unfalls sind z.B. bisher noch in keinem Einzelfall aufgetreten. Konstruktionsbedingt sind diese auch grundsätzlich äußerst unwahrscheinlich.

Auch die intensive Aufklärungsarbeit zu Batteriebränden trägt bei den Rettungskräften, insbesondere den Feuerwehren langsam Früchte. Die zu Anfangs starke Verunsicherung, ist mittlerweile der Erkenntnis gewichen, dass Elektrofahrzeuge bei einem Rettungseinsatz grundsätzlich nicht anders zu behandeln sind, als konventionell angetriebene Fahrzeuge. Bei einem Brand ist Wasser das am besten geeignete Löschmittel und bei einer notwendigen Fahrzeugöffnung mit Schneidwerkzeug ist kein Stromschlag zu befürchten.

Vertrauen in die Sicherheit schaffen auch die Ergebnisse von Ratingtests. Bei EuroNCAP wurden mittlerweile eine Vielzahl von Elektrofahrzeugen, Hybridfahrzeugen und sogar Brennstoffzellenfahrzeugen getestet. Die Ergebnisse liegen alle auf einem vergleichbaren Niveau wie bei den konventionellen Antrieben. Hier sind keine wirklichen Unterschiede auszumachen.

Von der Mercedes-Benz Unfallforschung wurden seit 2008, mit Einführung der ersten Hybridfahrzeuge bei Mercedes-Benz, über 900 Unfälle untersucht. Darunter waren ca. 70 Unfälle mit elektrifizierten Antriebssystemen und davon wiederum 17 reine Elektrofahrzeuge. In keinem Fall wurden besondere Auffälligkeiten in der Unfallcharakteristik festgestellt.

Das Insurance Institute for Highway Safety (IIHS) in USA kommt sogar zu dem Ergebnis „With more electric vehicles comes more proof of safety“. „It's fantastic to see more proof that these vehicles are as safe as or safer than gasoline- and diesel-powered cars,“ sagt IIHS President David Harkey [1]. „We can now say with confidence that making the U.S. fleet more environmentally friendly doesn't require any compromises in terms of safety.“

Unterstützt wird dies durch eine Analyse von Versicherungsdaten des Highway Loss Data Institute HLDI, die eine schon im Jahr 2012 durchgeführte Analyse bestätigen, dass das Verletzungsrisiko und die Unfallfolgekosten in Hybridfahrzeugen verglichen mit einem Benzinfahrzeug sogar um 25% geringer sind. In der Analyse wurde Fahrzeuge, die auf der

gleichen Plattform sowohl als Hybridfahrzeug als auch mit reinem Verbrennungsmotor gebaut werden, miteinander verglichen. Der Hauptgrund für das bessere Abschneiden der Hybridfahrzeuge wird in der Untersuchung im höheren Fahrzeuggewicht gesehen [2]. Im Folgenden soll gezeigt werden, dass dies aber nicht alleine dafür ausschlaggebend ist, dass Elektrofahrzeuge ein mindestens vergleichbar gutes Sicherheitsniveau wie konventionelle Fahrzeuge haben.

2. Struktursicherheit

Hybridfahrzeuge basieren heute i.d.R. auf Fahrzeugplattformen für Verbrennungskraftfahrzeuge, die hinsichtlich des Fahrzeugmehrgewichts dann ggf. punktuell verstärkt werden. Auch für viele bisherige Elektrofahrzeuge wird bisher noch ein rein elektrischer Antriebsstrang in konventionelle Fahrzeugstrukturen implementiert. Ein Beispiel von Mercedes-Benz für ein derartiges Convertible Konzept ist der 2019 vorgestellte EQC, der auf der Plattform des GLC-Modells aufgebaut wurde. Bezüglich der Rohbaustuktur ist es dabei gelungen, ca. 90% als Gleichteile zu verwenden und nur punktuelle Verstärkungsmaßnahmen einzusetzen. Dabei wurden u.a. sogar die Aufnahmepunkte des konventionellen Antriebsaggregats incl. Getriebes, das bei einem Elektrofahrzeug nicht mehr benötigt wird, mit genutzt. Dafür wurde ein spezieller Rohrrahmen konstruiert, der sowohl den Elektromotor des Frontantriebs, als auch die weitere HV-Komponenten aufnimmt und für diese als Schutzstruktur bei einem Aufprall dient. Mit dieser Konstruktion kann die Crashkinematik eines konventionellen Antriebsaggregats, incl. einer Rückverschiebung und Abstützung im Fahrzeugtunnel, bei einem Frontalaufprall weitestgehend simuliert werden. Die im Grundfahrzeug vorhandenen Lastpfade können somit auch bei der Elektrovariante wirkungsvoll genutzt werden [3].

Da der elektrische Antriebsmotor deutlich kleiner baut, ergibt sich trotzdem ein höherer Freiraum vor dem Motor, die sich bei einem Frontalaufprall in einer harmonischeren Kennlinie, mit einem kontrolliert ansteigenden Beschleunigungsniveau und einer um ca. 25% höheren Gesamtdeformation ausdrückt.

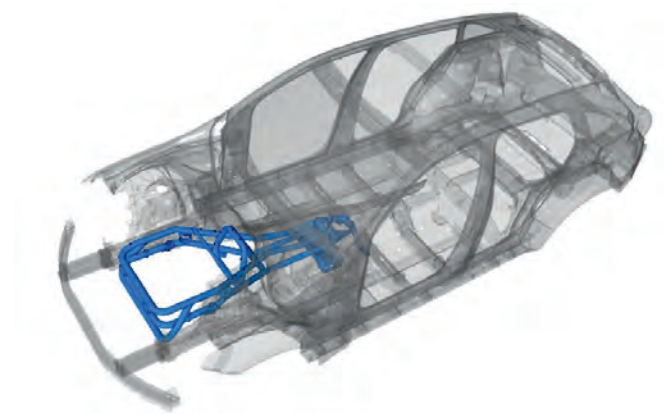


Bild 1: Fahrzeugstruktur EQC mit Hilfsrahmen

Beim Seitenaufprall stellt vor allem der seitliche Pfahlanprall die wesentliche Herausforderung für die Unfallsicherheit von Elektrofahrzeugen dar, da bei einer Batterieanordnung im Unterboden eine direkte Beaufschlagung der Batterie fast nicht zu vermeiden ist. Hohe Batteriebeschädigungen können zu unkontrollierten chemischen oder elektrischen Reaktionen in der Batterie führen. Beim EQC wird diese Herausforderung durch eine in das Batteriegehäuse integrierte Crashstruktur gelöst, die die Aufprallenergie absorbiert und das Innere der Batterie vor Beschädigungen schützt.

Grundsätzlich sieht die Crashcharakteristik bei einem seitlichen Pfahlanprall genau gegenteilig aus als bei einem Frontalaufprall. Durch die steife und fest mit dem Unterboden verbundene Unterbodenbatterie reduziert sich der Deformationsweg auf nahezu die Hälfte, im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug. Bei der Fahrzeugbeschleunigung zeigt sich im Gegensatz dazu, in einer frühen Crashphase aber ein höherer Beschleunigungspeak. In den Insassenbelastungen wirkt sich diese höhere Beschleunigung allerdings nicht nachteilig aus. Es überwiegt sogar der positive Effekt, dass mehr Freiraum zwischen Insassen und Tür vorhanden bleibt, der eine ungestörtere Entfaltung der Seitenairbags ermöglichen kann.

In der Batterie selbst, sind nochmals weitere Energieabsorber integriert, die über die Laborlastfälle hinaus, eine zusätzliche Reserve für eventuell höhere Unfallschweren im Realunfallgeschehen darstellen sollen.

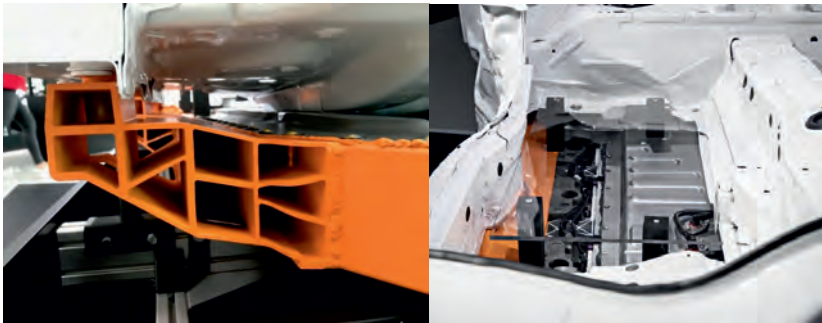


Bild 2: Crashstruktur HV-Batterie EQC und Fahrzeugdeformation beim seitl. Pfahlanprall

Neuere Modelle von Elektrofahrzeugen werden zukünftig hingegen auf eigenständigen Elektroplattformen wie der EVA-Plattform (Electric Vehicle Architecture) von Mercedes-Benz basieren. Mit dem EQS wurde in 2021 das erste derartige Fahrzeug von Mercedes-Benz vorgestellt. Dieses sogenannte „Purpose“-Konzept hat den Vorteil, dass die Rohbaustruktur konsequent auf die Integration eines vollelektrischen Antriebstrangs ausgelegt werden kann. Bei der EVA-Architektur wurde insbesondere ein Flat-Floor-Konzept berücksichtigt, dass in optimaler Weise für die Aufnahme einer Unterbodenbatterie konzipiert wurde. Auf einen Mitteltunnel zur Aufnahme eines Getriebes und einer Gelenkwelle kann bei Elektrofahrzeugen komplett verzichtet werden. Ein Zweirad- und Vierradantrieb wird durch die Integration von ein oder zwei Elektromotoren direkt in Vorder- bzw. Hinterachse dargestellt. Die große, flächige Unterbodenbatterie kann somit stabil und hochintegrativ mit der Fahrzeugstruktur verbunden werden. Sowohl bzgl. Betriebsfestigkeit und Steifigkeit als auch bezüglich der Unfallsicherheit ergeben sich damit wesentliche Vorteile. Der Fahrzeugschwerpunkt liegt deutlich tiefer, womit z.B. das Überschlagrisiko bei einem Unfall reduziert wird.

Durch den stabilen Verbund von Batterie mit dem Unterboden werden die Intrusionen bei einem Seitenaufprall, insbesondere bei einem seitlichen Pfahlanprall nochmals reduziert. Neben dem schon beim EQC bekannten Vorteilen des höheren Insassenüberlebensraums und besserer Airbagentfaltung, kann hierdurch auf eine aufwändige, zusätzliche Crashstruktur in der Batterie verzichtet werden. Der im Batteriegehäuse integrierte Aufnahmerahmen zur Befestigung der Batterie ist als energieabsorbierende Crashstruktur ausgebildet. Hierdurch kann im Batteriegehäuse mehr Bauraum für die Unterbringung von Batteriezellen zur Verfügung gestellt werden. Mit dem hochstabilen Batteriegehäuse können beim Pfahlanprall Intrusionen in das Gehäuse auf ein Minimum begrenzt werden.

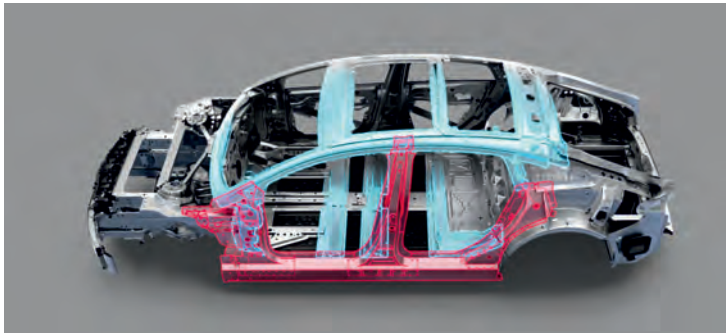


Bild 3: Crashstruktur des EQS mit Lastpfaden Seitenaufprall

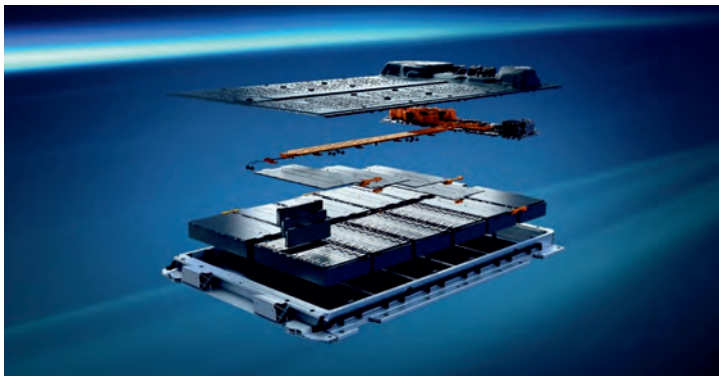


Bild 4: EQS-Batterie mit seitlicher Crashstruktur und vorderen Deformationselementen

Beim im Realunfallgeschehen sehr häufigen Frontalaufprall, entsteht durch den Entfall des konventionellen Antriebsaggregats mehr Deformationslänge, mit einem gleichmäßigeren Anstieg der Verzögerungskennlinie. Durch die entsprechend optimierte Gestaltung der Trägerstrukturen, können somit bestmögliche Aufprallcharakteristiken modelliert werden, die sich auch durch eine verbesserte Homogenität der energieaufnehmenden Frontstruktur hinsichtlich Kompatibilitätsanforderungen auszeichnet. Dies ist z.B. auch im neuen EuroNCAP-Test mit einer mobilen deformierbaren Barriere bei einer Aufprallgeschwindigkeit von jeweils 50 km/h gut zu erkennen. Die Maximalverzögerung wird bei vergleichbarer Gesamtdeformation um fast 50% reduziert. Insassenschutz und Kompatibilitätsverhalten werden positiv beeinflusst.

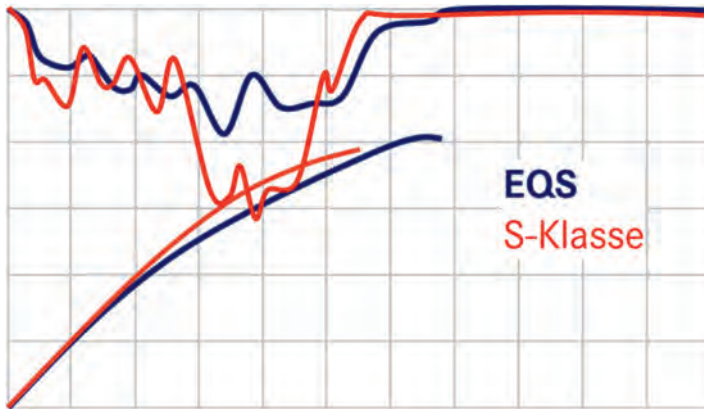


Bild 5: Verzögerungskennlinie in neuem EuroNCAP MPDB-Frontalcrash mit 50/50 km/h

Ein weiterer Vorteil beim Elektrofahrzeug ist, dass die Motorisierung einen deutlich geringeren Einfluss auf die Deformationscharakteristik aufweist als Verbrennungsmotoren.

Im Vergleich zur Langversion der Mercedes-Benz S-Klasse hat der EQS ein vergleichbares Maßkonzept mit einer 73 mm geringeren Fahrzeuglänge, einem 6 mm geringeren Radstand und 38 mm größeren Übergang vorne. Das für den Insassenschutz relevante Maß vom Fußpunkt zum Biegeträger vorne ist um 29 mm geringer.

Aufgrund des kleiner bauenden Frontmotors ist die im Frontalaufprall frei nutzbare Deformationslänge beim EQS deutlich größer, z.B. beim EQS vs S-Klasse um + 140 mm. Dies führt dazu, dass trotz einer vergleichbaren Gesamtdeformation beim EQS diese vor dem E-Motor stattfindet. Der E-Motor wird nur sehr geringfügig angestoßen und in die Stirnwand zurückverschoben. Im Gegensatz dazu führt bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor die Rückverschiebung des Antriebsaggregats in den Fahrzeugtunnel in einer deutlich höheren Stirnwandintrusion. Beim EQS kann die Stirnwandintrusion ggü. der S-Klasse im Frontalaufprall mit 56 km/h um mehr als 80% reduziert werden.

3. Insassenschutz

Die deutlich kleineren Antriebsaggregate bei einem Elektrofahrzeug führen beim Frontalaufprall sowohl bei einer Convertible-Plattform (EQC) als bei einer Purpose-Plattform (EQS) zu harmonischeren Deformationsverläufen ggü. einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Die Verzögerungskennlinien sind nicht mehr von den Blocklängen des Antriebsaggregats abhängig und können so noch besser für einen optimalen Insassenschutz modelliert werden. Die mit modernen Rückhaltesystemen schon bei Verbrennungskraftfahrzeugen niedrigen Insassenbelastungen können damit bei einem Elektrofahrzeug sogar noch weiter reduziert werden, bzw. nicht mehr benötigte Deformationslängen können anderen Funktionen, z.B. einem größeren Innenraum zur Verfügung gestellt werden.

Ein direkter Vergleich der Ratingergebnisse im EuroNCAP zeigt für den EQC nochmals bessere Ergebnisse im Vergleich zum GLC. Lediglich im seitlichen Pfahlanprall führt die dort härtere Kennlinie, bedingt durch die steife Batterie im Unterboden zu weiterhin unkritischen aber leicht höheren Insassenbelastungen mit geringen Abzügen bei der Punktwertung.



Bild 6: EuroNCAP-Vergleich Insassenbelastungen GLC mit EQC

Beim Vergleich EQS mit S-Klasse zeigt sich ein prinzipiell ähnliches Bild. Die bezogen auf die biomechanischen Grenzwerte bei der S-Klasse schon geringen Insassenbelastungen werden beim EQS ebenfalls erreicht. Beim seitl Pfahlanprall können hier trotz der härteren Kennlinie sogar geringere Belastungen erzielt werden.



Bild 7: Vergleich Insassenbelastungen im Frontalanprall mit 56 km/h (links) und im seitl. Pfahlanprall mit 32 km/h

Für die Fondinsassen verfügt er EQS ebenfalls über den schon aus der S-Klasse bekannten Beltbag als Sonderausstattung.

4. Hochvoltsicherheit

Die zusätzliche Herausforderung bei der Sicherheit von Elektrofahrzeugen, liegt in der HV-Sicherheit, zur Vermeidung von Stromschlägen und hochenergetischen Kurzschlüssen. Mercedes-Benz hat hierzu ein 7-stufiges Sicherheitskonzept entwickelt, bei dem die einzelnen Stufen überlappend ineinander übergreifen und das sowohl in einer Preocrash- als auch Postcrash-Phase ein hohes Maß an Sicherheit bietet.

1. Isolation

Das HV-System ist vollständig zur Fahrzeugstruktur hin isoliert, d.h. alle HV-Komponenten sind sowohl mit einer Plus- als auch einer Minusleitung miteinander verbunden. Im Gegensatz zu herkömmlichen 12V-Bordnetzsystemen besteht damit keine Verbindung zur Fahrzeugkarosserie. HV-Leitungen sind an ihrer orangen Ummantelung zu erkennen. Selbst für den Fall, dass es zu einer Beschädigung in der Plus- oder Minusleitung kommen sollte, besteht keine Stromschlag- oder Kurzschlussgefahr, da auch in diesem Fall kein geschlossener Stromkreis vorhanden ist.

2. Überwachung

Das komplette HV-System, insbesondere die Batterie überwachen sich permanent selbst. Durch eine kontinuierliche Temperaturüberwachung, Isolations- und Kurzschlussmessung werden Fehlerströme frühzeitig erkannt und angezeigt. Alle HV-Komponenten sind über einen sogenannten Interlockschaltkreis miteinander verbunden, mit dem überwacht wird, ob alle Bauteile des HV-Systems eine korrekte Verbindung aufweisen. Je nach festgestelltem Fehler

im HV-System, wird dieser entweder angezeigt, ein Wiedereinschalten verhindert, oder das HV-System sogar abgeschaltet.

3. Packagekonzept

Auf der Basis der über 50-jährigen Realunfallanalyse von Mercedes-Benz mit tausenden von untersuchten Unfällen wurde speziell für Elektrofahrzeuge ein sogenanntes Schutzzonenkonzept entwickelt. Dabei wird das Fahrzeug in drei Bereiche eingeteilt:

- Außenzone: Fahrzeugbeschädigungen mit geringer Unfallschwere bei sogenannten Bagatellschäden, die noch nicht zu einer Crasherkenntnis, und damit zu keinem automatischen Abschalten des HV-Systems führen. Hier muss die volle Funktionsfähigkeit des HV-Systems bei Beschädigungen erhalten bleiben.
- Crashzone: Ab einer gewissen Unfallschwere, bei der eine Auslösung eines Insassenschutzsystems erfolgt, wird auch gleichzeitig das HV-System abgeschaltet. Hierbei kann je nach Unfallschwere und Beschädigungsgrad zwischen einer reversiblen Abschaltung (Wiedereinschaltung des HV-Systems durch den Kunden ist möglich) und einer irreversiblen Abschaltung (Wiedereinschaltung des HV-Systems ist nicht mehr möglich) unterschieden werden.
- Kernzone: Fahrzeugbereiche in dem eine Beschädigung eher unwahrscheinlich ist. In Crashversuchen treten hier üblicherweise keine oder nur sehr geringen Deformationen auf. Dieser Bereich bietet sich für die Unterbringung der HV-Batterie und besonders sensibler Komponenten an.

4. Eigenstabilität

Sollten im Einzelfall HV-Komponenten in den äußeren Deformationsbereichen untergebracht sein, bei der noch keine zuverlässige HV-Abschaltung gewährleistet ist, wird deren Sicherheit durch eine Mindestanforderung an mechanischer Stabilität der Gehäuse erhöht. Aus den Crashesimulationen und Crashversuchen wird dazu ein Beschädigungsmuster und eine Belastungshöhe abgeleitet. Bei den entsprechenden HV-Bauteilen muss hierfür mindestens das Vorhandensein eines Berührungsschutzes gewährleistet sein. Besonders hoch sind Anforderungen an eine mechanische Eigensicherheit für die HV-Batterien. Hier werden neben den standardmäßigen Crashversuchen auch weitere Lastfälle herangezogen um das Realunfallgeschehen noch weiter abzudecken.

5. HV-Leitungsschutz

Alle HV-Komponenten sind mit HV-Leitungen miteinander verbunden. HV-Kabel sind flexible Leitungen, die teilweise auch innerhalb von Strukturbereichen verlegt sein können. Obwohl es sich dabei i.d.R. um zwei getrennte Leitungen handelt, werden diese deshalb an besonders sensiblen Stellen nochmals zusätzlich zur Isolierung ummantelt, um bei Quetschungen einen Isolationsverlust zu verhindern. Auch bei anderen HV-Bauteilen kann neben der Eigenstabilität das Schutzniveau durch konstruktive Abgleitflächen, Schutzbleche, o.ä. weiter erhöht werden.

6. Crashabschaltung

Sobald bei einem Aufprall eine gewisse Unfallschwere erkannt wird, wird das HV-System automatisch abgeschaltet. Dabei werden in der HV-Batterie Relais geöffnet, die eine weitere Stromzufuhr in das HV-System unterbinden. Um die Restspannung im HV-Zwischenkreis möglichst schnell (< 5 Sekunden) auf ein Maß von $< 60\text{V dc}$ abzusinken werden HV-Komponenten mit großen Energieinhalten, z.B. der Elektromotor oder die Leistungselektronik zeitgleich aktiv kurzgeschlossen. Dabei wird ein Widerstand zugeschaltet, über den der Strom schnell abfließen kann und dabei in Wärmeenergie umgewandelt wird. Bei der Verwendung von mehrstufigen Insassenschutzsystemen kann in eine reversible oder irreversible HV-Abschaltung differenziert werden. Falls bei leichteren Unfällen das Fahrzeug noch fahrbereit sein sollte, kann mit einer reversiblen Abschaltung eine Wiederschaltung des HV-Systems ermöglicht werden. Bei einer reversiblen Abschaltung findet diese prophylaktisch nur durch eine einfache Abschaltsignalisierung statt. Vor dem Wiederschalten findet eine Isolationsprüfung statt. Wird dabei kein Isolationsfehler erkannt wird ein Wiederschalten erlaubt. Bei schweren Unfällen, bei denen eine Weiterfahrt ohnehin nicht möglich sein wird, wird das HV-System durch das Zünden einer Pyrofuse irreversibel abgeschaltet.

Neben der Crashabschaltung über das Airbagsteuergerät, kann auch durch eine sogenannte Standcrasherkennung, z.B. durch einen zusätzlichen Aufprallsensor im Ladesystem, bei einem stehenden Fahrzeug ein Aufprall erkannt werden und ein aktiver Ladevorgang zügig unterbrochen werden.

7. Rettungstrennstellen

Neben der automatischen Crashabschaltung verfügen die Fahrzeuge über zusätzliche manuelle Abschaltmöglichkeiten, die sogenannten Rettungstrennstellen. Hierfür stehen redundante Möglichkeiten über einen 12V-Schalter und eine zusätzliche 12V-Kabelschleife, die einfach durchtrennt werden kann zur Verfügung. Die Einbauorte sind in den Rettungsdatenblättern vermerkt. Diese Möglichkeiten werden auch beim Abschleppen nach

einem Unfall benutzt, wenn das Fahrzeug nur gering beschädigt ist und nicht eindeutig feststellbar ist, ob eine automatische Crashabschaltung stattgefunden hat.

5. Unfallrettung

Sehr viele Fragen beziehen sich auf die Unfallrettung und den weiteren Umgang mit verunfallten Elektrofahrzeugen. Hier ist eine hohe Unsicherheit bei Kunden und Rettungskräften, durch die anfangs sehr kritische Berichterstattung von Unfällen und sich teilweise widersprechende Empfehlungen, wie z.B. dass verunfallte Elektrofahrzeuge in einem Container geflutet werden sollen oder Batteriebrände nur durch das Zuschütten mit Sand zu löschen sind, vorhanden.

Durch eine intensive Aufklärungsarbeit setzt sich jetzt aber immer mehr die Erkenntnis durch, dass auch Elektrofahrzeuge im Rettungsfall grundsätzlich nicht anders zu behandeln sind wie konventionelle Verbrennungskraftfahrzeuge. Die Gefahr eines Stromschlags ist grundsätzlich nicht gegeben und im Falle eines Fahrzeugbrandes kann auch hier Wasser als Löschmittel verwendet werden. Für den Sonderfall, dass auch die Batterie selbst brennt, ist nur zu beachten, dass sich diese über einen längeren Zeitraum hinweg wieder von selbst entzünden kann und deshalb eine längere Beobachtungszeit erforderlich ist. Dieser Thermal Runaway-Effekt kann auch durch die Verwendung anderer Löschmittel nicht verhindert werden. Wasser dient neben dem Löschen von offenen Flammen hierbei auch dem Kühlen der Batterie, damit diese Selbstentzündungstemperatur möglichst nicht erreicht wird. Diverse Hilfsmittel, die angeboten werden, wie z.B. Löschlanzen, Löschcontainer, Löschdecken erfüllen prinzipiell den gleichen Zweck. Ihre Anwendung setzt aber oftmals eine hohe Erfahrung und besondere Schulung voraus.

Nicht zuletzt im Hinblick auf diese neuen Fragestellungen bzgl. dem Umgang mit Fahrzeugen mit alternativen Antrieben werden sowohl Rettungsleitfäden und Rettungsdatenblätter der Fahrzeughersteller aktualisiert und an den neuen ISO-Standard ISO 17840-3 angepasst. In Erweiterung zu den etablierten Rettungsleitfäden werden neben den zusätzlichen technischen Informationen zu HV-Systemen und HV-Batterien damit unter anderem auch strukturierte Informationen zur Fahrzeugidentifizierung, direkte Gefahrenbeseitigung, Empfehlungen zur Brandbekämpfung, Umgang beim Eintauchen in Wasser und nicht zuletzt Abschleppen, Transport und Aufbewahrung von verunfallten Fahrzeugen adressiert.

Insbesondere für eine schnelle Fahrzeugidentifizierung für Rettungskräfte, wurde von einer VDA-Arbeitsgruppe die Möglichkeit geschaffen, durch eine Kennzeichenabfrage beim

Kraftfahrtbundesamt KBA, in kürzester Zeit per Typklassifizierung das richtige Rettungsdatenblatt zu erhalten. Umfangreiche Erkundungsarbeiten vor Ort, können damit weitestgehend entfallen. Die Rettungskräfte haben damit schon bei der Anfahrt zum Unfallort die passenden Informationen zur Verfügung.

Von Mercedes-Benz wurde dazu noch eine ergänzende Möglichkeit bereitgestellt, das passende Rettungsdatenblatt über einen QR-Code direkt am Fahrzeug abzurufen.

Des Weiteren wurde zu allen speziellen Fragen rund um den Umgang mit verunfallten Hybrid- und Elektrofahrzeugen vom VDA-Arbeitskreis Retten ein umfangreiches Q&A erarbeitet und auf der VDA-Homepage zum Download zu Verfügung gestellt [4].

Grundsätzlich wird bei einem Fahrzeug mit Hochvoltssystem, dieses bei einem erkannten Unfall automatisch abgeschaltet. Damit ist die HV-Spannung im Fahrzeug in wenigen Sekunden unter die relevante Berührungsschutzspannung von 60 V DC. abgesunken. Die Abschaltung geht bei einer Crasherkenntnis i.d.R. mit der Auslösung von Rückhaltesystemen einher und kann in den meisten Fällen damit sehr einfach durch einen ausgelösten Airbag erkannt werden. Im Zweifelsfall bestehen für die Rettungskräfte aber auch noch mehrere redundante Möglichkeiten, die HV-Spannung manuell über einen Trennschalter oder das Durchtrennen von Kabelschlaufen abzuschalten.

Darüber hinaus können Mercedes-Benz Fahrzeuge mit einem DC-Schnellladesystem auch im Stand einen Aufprall beim Fahrzeug erkennen und so den Ladevorgang abbrechen, da beim DC-Laden eine Fehlerfallerkennung seitens der Ladeinfrastruktur nicht zuverlässig möglich ist.

6. Zusammenfassung

In diesem Beitrag konnte gezeigt werden, dass die Unfallsicherheit moderner Fahrzeuge keine Frage des Antriebs ist. Elektrofahrzeuge bieten bezüglich Struktursicherheit und Insassenschutz sogar konzeptionelle Vorteile aufgrund ihrer kompakteren Antriebsaggregate. Bei auf den Elektroantrieb abgestimmten eigenständigen Plattformen ist es damit sogar möglich, nicht mehr benötigte Deformationszonen einem größeren Innenraum zugutekommen zu lassen.

Die bereits in einer Vielzahl von Ratinginstituten getesteten Hybrid- und Elektrofahrzeugen zeigen mindestens vergleichbar gute Ergebnisse. Auch erste Analysen aus dem

Realunfallgeschehen kommen zu ähnlichen Ergebnissen und bestätigen Elektrofahrzeugen mittlerweile sogar eine höhere Sicherheitsperformance.

Was verbleibt, ist das in der Öffentlichkeit nach wie vor stark thematisierte Brandrisiko von Elektrofahrzeugen. Diese Wahrnehmung resultiert vor allen daraus, dass bisher nahezu jeder bekannte Einzelfall medienwirksam dokumentiert wird. In der Unfallstatistik kann ein erhöhtes Brandrisiko allerdings nicht bestätigt werden. Sowohl Elektro- als auch Verbrennerfahrzeuge sind grundsätzlich in gleichem Maße brennbar. Ein Unterschied besteht allerdings in der Brandbekämpfung, wenn bei einem Elektrofahrzeug auch die Batterie selbst in den Brand involviert ist. In diesem Fall muss für das Löschen von Lithium-Ionen-Batterien mehr Zeit berücksichtigt werden und es wird ggf. mehr Löschwasser benötigt wird, um einen kontrollierten Abbrand der Batterie zu begleiten. Ein berechtigter Informationsbedarf der Rettungskräfte wird mit der Bereitstellung entsprechender Informationen und Schulungen unterstützt. Die Situation erinnert an die Einführung von Airbags und pyrotechnischen Gurtstraffern, die in der Anfangsphase ebenfalls zu einer erheblichen Besorgnis bei Rettungskräften geführt hat.

7. Referenzen

- [1] <https://www.iihs.org/news/detail/with-more-electric-vehicles-comes-more-proof-of-safety>
- [2] https://www.iihs.org/media/ca2618fc-c875-4246-8a9f-5977f3b702f6/Ewxm_A/HLDI%20Research/Bulletins/hldi_bulletin_37-25.pdf
- [3] Justen R., Dr. Hermle M., Prof. Dr. Schöneburg, R., Dr. Hellmuth T., Das Crashkonzept des neuen Mercedes-Benz EQC; Aachener Karosserietage 2019
- [4] VDA FAQ Unfallhilfe & Bergen bei Fahrzeugen mit Hochvolt-Systemen
<https://www.vda.de/de/themen/sicherheit-und-standards/retten-und-bergen/unfallhilfe-und-bergen-bei-fahrzeugen-mit-hochvolt-systemen.html>

Fahrzeugsicherheit 2030 zu Ende gedacht: Anprallerkennung auch für die Hochvolt-Batterie

Andreas Forster, Annette Hebling, Udo Geißler, Johannes Vetter,
Continental, Passive Safety and Sensorics Business Unit,
Regensburg/Alzenau

Kurzfassung

Da die Batterie von Elektrofahrzeugen (BEV) in der Regel im Unterboden platziert ist, besteht bei Aufsetzern und durch Anprall schwerer Gegenstände auf der Fahrbahn, die bei höherer Geschwindigkeit hochgewirbelt werden, die Gefahr von Beschädigungen der Batterieunterseite. Aktuell dienen schwere metallische Schutzplatten dazu, um solche Schäden zu verhindern. Continental testet eine Sensierung, die den Übergang zu weniger als halb so schweren Kunststoffschutzkonstruktionen erlaubt. Bewährte Drucksensor-Satelliten und ein Druckschlauch dienen dazu, einen Aufsetzer oder Anprall zu erkennen und zu bewerten. Bei Aufsetzern ist es zudem möglich, den Schadensmechanismus durch schnelle Fahrwerksanhebung abzumildern. Der Fahrer kann auf eine mögliche Beschädigung und die eventuell drohende Brandgefahr aufmerksam gemacht werden. Im Bereich des Schadens lassen sich die Batteriezellen außerdem vorsorglich entladen. Mit diesem Battery Impact Detection (BID) System lässt sich das Gewicht eines BEV deutlich senken, weil die Sensierung weiterhin die Sicherheit gewährleistet und sie durch zusätzliche Maßnahmen wie das Cell Balancing im Schadensbereich der Batterie sogar erhöhen kann.

Abstract

As the battery of an electric vehicle (BEV) is typically integrated at the bottom of the chassis there is a risk that its underside will be damaged if the vehicle hits the ground or if heavy objects will be swirled up from the road surface at higher speeds. Currently, a heavy metal plate serves to protect the battery. Continental is testing a sensor solution which facilitates the shift to plastic underbody protection elements weighing less than half of a metal design. Proven pressure sensor satellites and a pressure tube serve to detect and analyze underbody ground contact or object impact. In the case of ground contact, it is possible to mitigate the damage mechanism by quickly increasing ground clearance when the sensor signal triggers this. The driver can be informed about the potential damage and a possible subsequent risk of fire. As

a precaution, the battery cells in the area of potential damage can be discharged. Integrating this Battery Impact Detection (BID) system makes it possible to reduce the weight of a BEV because the sensor solution ensures safety and can actually even increase it through additional measures, e.g., via precautionary cell charge distribution out of a damaged battery zone.

1. Elektrifizierung und Fahrzeugsicherheit – eine neue Dimension

Die meisten Elektrofahrzeuge (Battery Electric Vehicle, BEV) verfügen über eine Chassis-Architektur, bei der das Hochvolt-Batteriepaket unten am Fahrzeugboden installiert ist. Diese Platzierung ergibt sich einerseits aus der Masse der Batterie, die unter der Maßgabe einer großen Reichweite mehrere hundert Kilo beträgt und deshalb, im Interesse der Schwerpunktlage, möglichst tief platziert werden muss, um Aufbauschwankungen zu vermeiden. Gleichzeitig gilt es, die Batterie in Crash-Situationen gut zu schützen, vergleichbar dem Fahrzeuginnenraum und damit hinter den Knautschzonen in dem Bereich mit der größten Steifigkeit des Chassis.

Während diese Konstruktion die Schwerpunktlage und damit die Fahreigenschaften eines BEV attraktiv machen, erhöht sie andererseits das Risiko von Batteriebeschädigungen von der Unterseite her. Eine Kollision z.B. durch Aufsetzen bei Bordsteinüberfahrten oder durch anprallende Gegenstände, die während der Fahrt gegen das Batteriepaket geschleudert werden, könnten zu Schäden an der Batterie führen. Gefährlich sind hier vor allem eindringende Objekte (Schadbild der Intrusion), weil sie zu unerwünschten und evtl. sogar unkontrollierbaren Stromflüssen in der Batterie bis hin zum Brand durch einen Thermal Run-Away führen können. Bisherige Erfahrungen zeigen, dass die Hysterese zwischen einer Beschädigung der Hochvolt-Batterie und dem Ausbruch eines Brandes in einer kaum zu kalkulierenden Zeitspanne zwischen wenigen Minuten und mehreren Monaten liegen kann.

Eine Beschädigung jeglicher Art der Hochvolt-Batterie muss daher unumgänglich erkannt werden, damit bei eventuellen Kurzschlüssen die Brandgefahr vermieden werden kann. Daraus ergibt sich der Bedarf nach besonderen Schutzmaßnahmen, um eine Intrusion zu vermeiden und/oder zu erkennen. Die hier vorgestellte Battery Impact Detection (BID) Lösung mit einem Druckschlauch und zwei Drucksensor-Satelliten wurde auf der Grundlage eines Technologietransfers aus Sensor-Serienanwendungen konzipiert und befindet sich in der Entwicklung und Erprobung.

2. Aktuelle Form des mechanischen Batterieschutzes

Natürlich sind entsprechende Schutzmaßnahmen bei BEV heute schon Standard. Typischerweise wird die Batterie zur Fahrbahnoberfläche hin mit einer Metallplatte abgesichert, die als Anprall- und Aufsetzschutz dient. Auch wenn dabei der Leichtbauwerkstoff Aluminium zum Einsatz kommt, kann eine solche Batterieschutzplatte eine Masse von beispielsweise über 25 kg aufweisen. Da BEV durch die große Batteriemasse ohnehin ein höheres Fahrzeuggewicht aufweisen als konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, sollte diesem Gewichtsnachteil wo immer möglich entgegengewirkt werden. Dieses Vorgehen unterstützt Reichweitenfortschritte ohne Gewichtszuwachs bei der Batterie.

Hinzu kommt, dass heutige Schutzmaßnahmen gegen Beschädigung von der Unterseite her rein passiv sind – ohne Sensierung. Nach einem Aufsetzer oder einem Anprall bleibt es der Aufmerksamkeit des Fahrers überlassen, wie er die sichtbaren Schäden an der Metallplatte subjektiv einschätzt und ob er einen Werkstattbesuch als notwendige Konsequenz ansieht. Als wirklich befriedigend kann man diese Situation schwerlich empfinden, denn es erfordert im Zweifelsfall doch ein gewisses Maß an technischer Expertise, um Schadbilder korrekt zu interpretieren. Zumal der Fahrzeugunterboden unter Normalbedingungen für einen Autofahrer visuell schlecht zugänglich ist. Eine Sensierung kann diese Lücke im Fahrzeugschutzkonzept schließen. Das BID zur Erkennung von äußeren Einwirkungen auf die Traktionsbatterie ist eine solche neue Lösung, die sowohl auf Gewichtsparsnis abzielt als auch auf einen Zugewinn an Sicherheit durch Sensierung.

3. BID – der Grundgedanke

Battery Impact Detection verfolgt das Ziel, die schwere Metallplatte als Anprallschutz durch eine wesentlich leichtere Konstruktion aus Kunststoff zu ersetzen, und die Sicherheit durch eine Sensierung zu gewährleisten. Nach ersten Abschätzungen dürfte die erzielbare Gewichtsparsnis durch einen Übergang zur BID Technologie mit Kunststoffbatterieschutz in der Größenordnung um ≥ 50 % gegenüber Metallplatten liegen. Mit dem Einsatz von Kunststoff anstelle von Aluminium ändert sich das mechanische Verhalten der Schutzkonstruktion. Während Aluminium zähelastisch ist und eine Kombination aus elastischer und plastischer Verformung zeigt, hängt die Reaktion bei Kunststoff von der Art des gewählten Materials ab. Für erste Tests wurde ein schlagzäher Thermoplast gewählt, der attraktive Materialeigenschaften für diese Anwendung zeigt.

Um trotz einer leichteren Schutzkonstruktion zusätzlich einen Sicherheitsgewinn zu erzielen, misst das BID System die Höhe der Anprallenergie (Impact Severity) und meldet den voraussichtlichen Schaden an den Fahrer bzw. Werkstatt. Hinterlegt man im System die Materialeigenschaften der Schutzkonstruktion, so lässt sich aus den Sensordaten errechnen, ob eine Intrusion stattgefunden haben kann und mit welcher Energie. Dafür nutzt das BID eine Drucksensortechnologie, die seit Jahren in der Serie ist, um einen Anprall/Crash zu erkennen.

3.1 Technologietransfer aus der Serie

Konkret dienen im BID sogenannte Drucksensor-Satelliten als Messwertgeber. Diese Sensoren gingen vor 25 Jahren in Produktion und dienen zur Erkennung eines Unfalls – beispielsweise eines Seiten-Crashes mit Detektion durch einen in der Tür verbauten Drucksensor. Zusätzlich sind Drucksensoren seit zehn Jahren in einem Fußgängerschutzsystem in Serie: Das bereits mehrfach prämierte Pedestrian Protection System pressure SATellite (PPS pSAT) arbeitet mit einem luftgefüllten Druckschlauch. Dieser Silikonschlauch ist beim PPS pSAT in der Stoßstange integriert und dort in einem Schaumstoffträger eingebettet, **BILD 1**. An den beiden äußeren Enden des Schlauches sind zwei standardisierte Drucksensoren angeschlossen. Schlauch und Sensoren bilden ein über die Fahrzeuglebensdauer hinweg dichtes, geschlossenes System.



Bild 1: Druckschlauch mit angeschlossenen Drucksensor-Satelliten (links) und Prinzip der Integration in die Frontschürze beim PPS pSAT von der Seite gesehen (rechts)

Bei einem Anprall wird der Schlauch in dem Bereich des Kontaktes deformiert. Dabei wird eine Druckwelle ausgelöst, die vom Ort des Anpralls in die beiden entgegengesetzten Richtungen zu den Drucksensor-Satelliten an den Schlauchenden läuft. An der Signalfrequenz (nicht an der Signalthöhe) wird der Anprall erkannt, **BILD 2**. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle (= nahezu Schallgeschwindigkeit) bekannt ist, kann durch Bezug auf eine gemeinsame Normalzeit für beide Sensoren der Laufzeitunterschied zwischen dem Signal-

eingang am linken und am rechten Drucksensor festgestellt, und damit der Bereich des Anpralls errechnet werden. Dieses druckschlauchbasierte Messprinzip ging 2015 zusätzlich zum Fußgängerschutz auch in einer ersten Batterieschutzanwendung in Serie: Im BMW i8 dient das vom PPS pSAT bei einem Frontalaufprall ermittelte Signal zur Abtrennung der Hochvoltbatterie und somit vor allem dem Schutz der Insassen und Rettungskräfte am Unfallort.

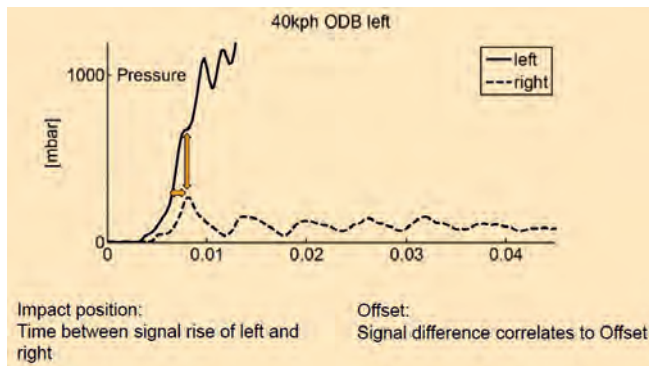


Bild 2: Laufzeitunterschiede zwischen den beiden Sensoreingängen dienen dazu, den Bereich des Impacts zu errechnen, hier gezeigt am Signalbild eines Frontalaufpralls mit Teilüberlappung auf der Fahrerseite

3.2 Aufbau einer BID Lösung

Konzipiert ist das BID so, dass ein Druckschlauch in Schleifen (Mäanderanordnung) in einem flachen Zwischenraum zwischen der Unterseite des Batteriepakets und der zur Fahrbahn hinzeigenden Schutzkonstruktion platziert wird. Die beiden Drucksensor-Satelliten an den Schlauchenden können außerhalb der Anprallzone oberhalb der Schutzkonstruktion am Batteriepaket platziert werden, **BILD 3**. Da der Druckschlauch mit 8 mm nur einen geringen Durchmesser hat, lässt er sich in vielen Fällen bereits in dem vorhandenen Bauraum unterhalb der Batterie unterbringen. Ein Höhenzuwachs des Batteriepakets durch BID wird daher oft gar nicht gegeben sein.

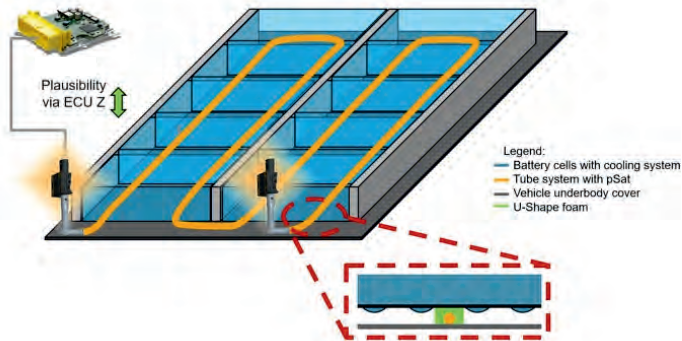


Bild 3: Integration des BID Druckschlauches und der Sensoren als Teil der Batterieschutzkonstruktion

Die Auswertung der Sensordaten erfolgt in einem separaten Steuergerät (Electronic Control Unit, ECU). Im Hinblick auf die Funktion (Anprallerkennung und Insassenschutz) arbeitet diese ECU eng mit der Airbag Control Unit (ACU) zusammen, weil die ACU zur Auslösung von Rückhaltemitteln über eigene Beschleunigungssensoren verfügt, (z.B. Hochachse z als Plausibilisierungselement) und zudem die Speicherung von Anprall-Events in dem Electronic Data Recorder (EDR) des Fahrzeugs koordiniert. Damit können die Daten über Anprallereignisse oder Aufsetzer langfristig gesichert, und im Zuge der Diagnose später ausgelesen werden.

Analog zum Einsatz im PPS pSAT, lässt sich anhand der Laufzeitunterschiede der Druckwelle zu beiden Drucksensoren errechnen, in welchem Bereich der Batterieschutzplatte der Kontakt stattgefunden hat. Bedingt durch die Größe der Schutzkonstruktion ist der Schlauch zwar erheblich länger (in einem Testfall beispielsweise kamen bis zu 9 m Schlauch zum Einbau), aber erste Laborversuche mit adaptierten Algorithmen haben bestätigt, dass ein Anprall unverändert eine korrekte Signalförmigkeit im Druckschlauch bewirkt und damit erkannt wird: Schon bei 5...10 mm Intrusion in die Schutzstruktur liefert der Druckschlauch auswertbare Signale. So besteht mit BID eine Datengrundlage, um die Folgeschwere eines Anpralls einschätzen zu können. Weil die Eingrenzung des Anprallortes ebenfalls möglich ist, hat das BID System das Potenzial, im Laufe des Fahrzeuglebens auch eine erneute Beschädigung derselben Zone zu erkennen und vor dem Hintergrund der „Vorgeschichte“ korrekt zu bewerten. Da

Thermoplaste wegen ihrer elastischen Eigenschaften nach einer Deformation ohne Intrusion unter Umständen ein optisch schwer einzuschätzendes Schadbild zeigen, ist die gespeicherte Information über die Schwere eines Anpralls ein Sicherheitsgewinn.

3.3 Nutzung der Sensordaten für zwei Schadensfälle

Zwei typische Schadensfälle können die Batterie von der Unterseite her beschädigen: Zum einen sind Aufsetzer im niedrigen Geschwindigkeitsbereich möglich, die beispielsweise beim Überfahren von Bordsteinkanten oder Hindernissen passieren können. Zum anderen besteht bei höheren Fahrgeschwindigkeiten das Risiko, dass Objekte von der Fahrbahn mitgerissen und gegen den Unterboden geschleudert werden, **BILD 4**. Wenn es sich dabei beispielsweise um einen Gegenstand wie das Schloss eines schweren Spanngurtes handelt, kann die Aufprallenergie ausreichen, um die Schutzvorrichtung unter dem Batteriepaket zu durchschlagen. Entsprechende Warnmeldungen wegen Gegenständen auf der Fahrbahn sind im Verkehrsfunk keineswegs eine Seltenheit. Oft werden dabei Spanngurte explizit genannt. Für beide beschriebenen Schadensfälle eignet sich BID als Analyse-Tool und Beginn einer Informations- und Handlungskette, die dem Fahrer eine fundierte Entscheidung über möglichen Reparaturbedarf an die Hand gibt. Das ist auch im Hinblick auf gebraucht erworbene Fahrzeuge attraktiv. Die Auslöseschwelle für Reaktionen auf beide Situationen wird im Algorithmus hinterlegt.

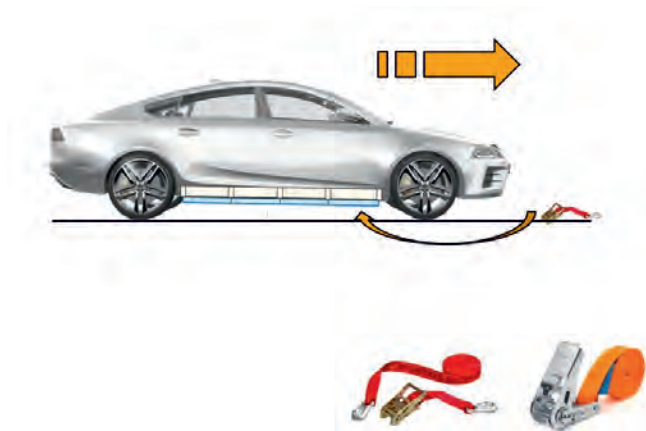


Bild 4: Schwere Gegenstände, die bei höheren Geschwindigkeiten von der Fahrbahnoberfläche hochgerissen werden, können die Batterie unter Umständen trotz Schutzkonstruktion beschädigen

3.3.1 Aufsetzer und begleitende Schutzmaßnahmen

BILD 5 zeigt, warum bei einem Aufsetzer ein Batterieschaden drohen kann. Bedingt durch die hohe Masse des Fahrzeugs besteht hier die Möglichkeit, dass sowohl die Kunststoff-Schutzkonstruktion als auch die Batterie selbst durch Kantenpressung beschädigt werden können.

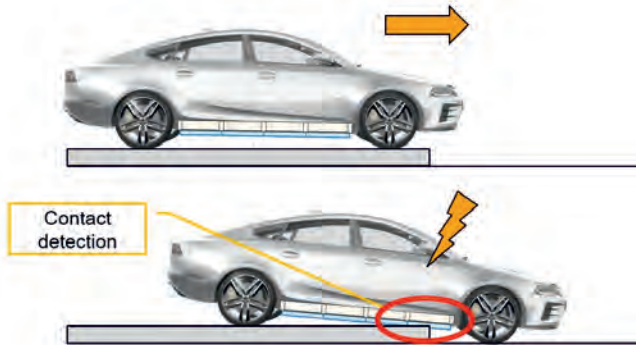


Bild 5: Drohende Batteriebeschädigung durch Aufsetzen des Unterbodens beim Überfahren einer Bordsteinkante

Bei diesem Schadensfall zeigt sich gleichzeitig der große Vorteil einer Sensierung: Da solche Aufsetzer typischerweise bei sehr langsamer Rangierfahrt passieren (0...10 km/h), kann es das Schadbild verhindern oder abmildern, wenn die Information von der BID über eine drohende Batteriebeschädigung genutzt wird, um in einem Fahrzeug mit aktivem Fahrwerk die Bodenfreiheit kurzzeitig um einige Zentimeter anzuheben, **BILD 6**. Technische Voraussetzungen dafür ließen sich beispielsweise durch Vorhalten einer Druckreserve im Fahrwerks-Aktorsystem für diesen Fall schaffen. Durch Abgleich der BID Daten mit der erfassten Beschleunigung in Richtung der z-Achse lässt sich dieser Schadensfall zusätzlich plausibilisieren. Ziel ist es, das System am Anfang des eigentlichen Schadensmechanismus aktiv werden zu lassen, um so das Schadbild abzumildern. Gleichzeitig ist es durch die Plausibilisierung so robust, dass Fehlalarme vermieden werden. Auch die Erkennung des Fahrzustands durch z.B. Rad-Federwege, Geschwindigkeit etc. lässt sich zur Plausibilisierung heranziehen.

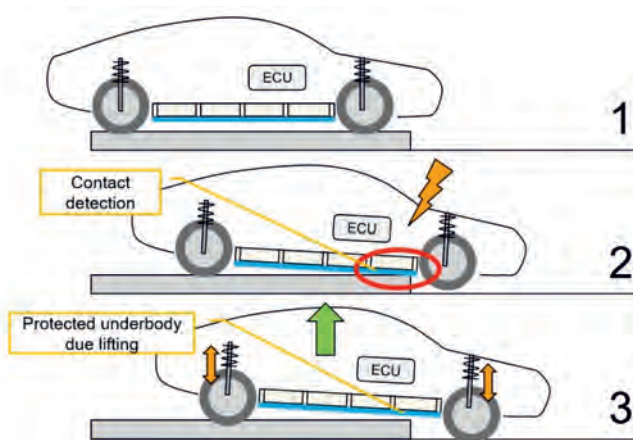


Bild 6: Das BID Signal kann dazu dienen, um bei einem aktiven Fahrwerk situativ im niedrigen Geschwindigkeitsbereich die Bodenfreiheit zu erhöhen, um so das drohende Schadbild abzumildern

Sollte ein Schadensfall dennoch nicht vermeidbar sein, besteht jederzeit die Möglichkeit, in der betroffenen Zone durch Datenübermittlung an das Batteriemanagementsystem (BMS) einen vorsorglichen Eingriff auszulösen, da ein BID System die Zone der Beschädigung errechnen kann. Ergibt die Bewertung des Impacts ein Risiko, so kann direkt darauf reagiert werden: Durch gezieltes Cell-Balancing beispielsweise wäre es möglich, die Akkuzellen in der betroffenen Region nach dem Impact zu entladen. Dazu kann ihre Ladung auf Akkuzellen in umliegenden Regionen umverteilt werden. Dieser Prozess ist im BMS ohnehin vorhanden und dient ansonsten dem Ausgleich des Ladezustands der Zellen in einem Segment, da sich das Ladeverhalten der einzelnen Akkuzellen leicht unterscheiden kann. Zusätzlich ließe sich der Unterboden ab dem Impact vor weiterem möglichen Aufsetzen schützen, indem das Fahrwerk bei Langsamfahrten höhergestellt wird. Natürlich ist auch die Information des Fahrers über eine mögliche Gefahr wichtig.

3.3.2 Anprallsituationen

Bei einem Anprall von unten liefert das BID als Information einen Wert über die Impact Severity. Im Algorithmus können Auslöseschwellen für abgestufte Informationen bzw. Warnhinweise an den Fahrer definiert werden. Ab einer bestimmten Anprallenergie kann der Fahrer über die Mensch-Maschine-Schnittstelle die Empfehlung bekommen, den Unterboden

kontrollieren zu lassen. Ab einer höheren Schwelle, bei der die Gefahr der Intrusion und damit einer bedrohten Batterieintegrität besteht, kann der Warnhinweis dringender ausfallen – theoretisch bis zu dem Punkt, an dem die Nutzung des Fahrzeugs nicht mehr empfohlen wird, bzw. das Fahrzeug wegen möglicher Brandgefahr in eine sichere Position gebracht werden soll (Fahrbahnrand, Freiraum, Entfernung zu weiteren Brandlasten, keine Tiefgaragennutzung etc.). Langfristig ist auch eine Vernetzung mit dem e-Call System denkbar, das bei tatsächlich ausbrechendem Feuer (detektiert von Temperatursensoren in der Batterie) automatisch die Feuerwehr verständigen kann. Sollte ein Schadensfall mit Intrusion als wahrscheinlich erkannt worden sein, besteht auch hier analog zur Aufsetzerschutzfunktion die Möglichkeit, in der betroffenen Zone durch Datenübermittlung an das BMS einen vorsorglichen Eingriff auszulösen und die eventuell geschädigten Zellen zu entladen. Ist im Fahrzeug als Teil des BMS auch eine Funktion integriert, welche die Temperatur der Batteriekammern kontrolliert, so kann die Information seitens des BID als zusätzlicher Auslöser fungieren.

In dem Zusammenhang erscheint der Hinweis gerechtfertigt, dass den Verfassern derzeit keine statistischen Hinweise bekannt sind, dass BEV häufiger brennen als konventionelle Fahrzeuge. Brandmeldungen über BEV werden womöglich deshalb stärker wahrgenommen, weil sie neu und ungewohnt sind. Auch wenn eine solche Wahrnehmungsverzerrung psychologisch gut nachvollziehbar wäre, dürfte das erkannte Phänomen nicht dazu verleiten, keine optimale Vorsorge für die Fahrzeugsicherheit und den Insassenschutz in BEV zu treffen. Je höher die Zulassungszahlen für BEV sind, desto relevanter werden Schutzmaßnahmen. Dies gilt umso mehr, als sich Brände bei einem Elektrofahrzeug in einem Punkt deutlich von Bränden eines konventionellen Fahrzeugs unterscheiden: Auch nach einem gelöschten Brand kann aufgrund der Batterie bzw. Zellbeschädigungen zeitverzögert erneut ein Brand entstehen. Dieses aktuell noch „unkontrollierbare“ Verhalten erfordert umso dringender ein System, das stärkere mechanische Einwirkungen auf die Batterie erkennt und entsprechende Daten zur späteren Auswertung speichert.

4 Stand der Entwicklung und Ausblick

Elektroautos sind seit 2020 dabei, zum Mainstream im Pkw-Segment zu avancieren. Verglichen mit Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor bringen sie nach dem Kenntnisstand zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung kein höheres Brandrisiko mit sich, sondern lediglich eine andere Form des Brandrisikos, primär durch Unfälle bzw. durch Aufsetzen oder Anprall, die Beschädigungen der Batterie verursachen. Dies ist analog zu möglichen Beschädigungen eines Kraftstofftanks mit nachfolgender Brandgefahr bei konventionellen Fahrzeugen zu

sehen. Da jedoch bei Batteriebeschädigungen kein Auslaufen von Kraftstoff als sichtbares Warnzeichen gegeben ist, leistet die Sensierung von Schäden als Ursache möglicherweise kritischer Abläufe im Inneren der Batterie einen großen Beitrag zur Sicherheit. Continental nutzt existierende Sensoren aus dem Fußgängerschutz und wendet das Messprinzip auf die Batterie an. Dadurch können verschieden starke Aufprall-Ereignisse unterschieden und der Fahrer angemessen gewarnt werden.

Algorithmen, die in der ACU berechnet werden, erkennen kritische Ereignisse und aktivieren die entsprechenden Fahrzeugschutzsysteme wie z.B. Brandschutzsysteme, Fahrerinformationen oder andere Maßnahmen zur Risikobegrenzung. Durch die Integration dieses Konzepts in die ACU entsteht die Möglichkeit der Sensorfusion mit der Sensorik des Rückhaltesystems z.B. zum Abgleich mit der z-Beschleunigung bei Aufsetzern.

Weil Batterieschutzplatten aus Metall für einen „Worst Case“ dimensioniert sind, der während der Fahrzeuglebensdauer nur selten oder aber gar nicht vorkommt, besteht hier ein gewisses Missverhältnis zwischen Masseinsatz und Ertrag. Durch Sensierung der Schutzkonstruktion eröffnet sich die Möglichkeit, bei sogar noch höherer Sicherheit diese unverhältnismäßig schwere Schutzmaßnahme neu zu konstruieren. Wenn tatsächlich ein Anprall oder Aufsetzer vorkommt, kann der Fahrer über die Schwere des Vorfalles informiert werden und dann faktengestützt gezielt handeln. Aus der heutigen, rein passiven Schutzvorrichtung wird so ein intelligentes System mit einem höheren Niveau an Insassenschutz.

Da das verwendete Sensor- und Signalerzeugungsprinzip bereits langjährig in der Serie bewährt ist, bestehen exzellente Voraussetzungen für eine zeitnahe Industrialisierung der Battery Impact Detection (BID) mit Druckschlauch. Die laufenden Tests werden fortgesetzt, um die bisherigen Ergebnisse zu untermauern. Zu diesen Tests werden auch Fahrzeugtests mit installiertem BID System gehören.

Durch die Erfahrungen im Bereich der Crash-Algorithmik steht bei Continental der richtige „Werkzeugkasten“ bereit, um diese Lösung schnell und effizient in die Serienentwicklung zu überführen. Unterstützt wird dies durch die Möglichkeit der Testanlagen der Continental Safety Engineering. Die Instrumentierung der Prototypen-Elektrofahrzeuge erfolgt im Umfeld der Crashtestanlage, eine passende Teststrecke für Belastungs- und Misuse-Tests ist in unmittelbarer Reichweite.

Kundengespräche zu BID laufen, das Interesse ist sehr hoch. Ein BID Vorentwicklungsprojekt mit einem europäischen OEM läuft bereits. Entsprechende Überlegungen, ob und wie man einen Anprall am Fahrzeugunterboden erkennen kann, gibt es speziell in China schon seit Jahren. Je größer der Anteil an BEV an den neu zugelassenen Fahrzeugen wird, desto dringender wird eine entsprechende Lösung für den Batterieschutz und damit den Insassenschutz benötigt.

Längerfristig ist zusätzlich zum Schutz der Batterie gegen Beschädigungen von unten vorstellbar, zusätzliche Druckschläuche an den Seiten des Batteriepaketes zu installieren, um auch eine Intrusion bei einem Seiten-Crash eindeutig zu erkennen.

Ersatzmodellbasierte Effektivitätsbewertung integraler Sicherheitssysteme

Julian Hay, Lars Schories,

ZF Friedrichshafen AG, Safe Mobility Simulation, Friedrichshafen;

Eric Bayerchen, ZF Automotive Germany GmbH,

Passive Safety Systems, Division R, Alfdorf;

Peter Wimmer, Oliver Zehbe, Stefan Kirschbichler,

Virtual Vehicle, Graz;

Jörg Fehr, Institut für Technische und Numerische Mechanik,
Universität Stuttgart

1. Kurzfassung

In diesem Artikel wird ein Simulationsframework zur Effektivitätsbewertung integraler Fahrzeugsicherheitssysteme im szenarienbasierten Testen vorgestellt. Dieses verknüpft Szenarien, Fahrzeugcrash, sowie Insassen Pre- und In-Crash Simulationen miteinander und ermöglicht somit eine durchgängige Simulation von realistischen Fahr- und Kollisionsszenarien. Da herkömmliche Simulationsmethoden wie die Finite-Elemente Methode sehr lange Rechenzeiten benötigen, um eine Vielzahl an Fahrscenarien zu berechnen, werden in dieser Arbeit schnellrechnende physik- und datenbasierte Ersatzmodelle entwickelt, welche in einem nachfolgenden Schritt für eine effiziente Bewertung des Sicherheitssystems eingesetzt werden.

2. Abstract

In this article a simulation framework for the scenario-based safety performance assessment of integrated vehicle safety systems is presented. The framework includes scenario, vehicle crash, as well as occupant pre- and in-crash simulations and thus allows a traceable simulation of realistic driving scenarios. Since state-of-the-art simulation methods such as FEM require huge computational efforts for the simulation of a large number of driving scenarios, physics- and data-based surrogate models are developed and applied for an efficient assessment of the vehicle safety system.

3. Einleitung

Integrale Fahrzeugsicherheitssysteme bieten durch die geschickte Kombination von aktiven und passiven Sicherheitskomponenten das Potential, die Insassensicherheit weiter zu erhöhen. Auch durch die Einführung autonomer Systeme und Assistenzfunktionen wird eine gesamtheitliche szenarienbasierte Betrachtung der Schutzwirkung integraler Sicherheitssysteme immer wichtiger, um die Auswirkungen aktiver Komponenten auf die Insassenverletzung zu bewerten und die Wirksamkeit des integralen Sicherheitssystems anhand realistischer Fahr-szenarien auszuwerten. Dieser Zusammenhang spiegelt sich auch in den zukünftigen Anforderungen des Euro NCAP [1] und aktuellen Forschungsprojekten, wie z.B. OSCCAR [2] and SAFE-UP [3] wider, in welchen vor allem virtuelle Testmethoden im Fokus stehen.

Diese ermöglichen, schon früh im Entwicklungsprozess Produktanalysen durchzuführen und prospektiv die Wirksamkeit möglicher Sicherheitskonzepte zu bewerten.

Die Entwicklung und Bewertung solcher integraler Systeme bedarf einer Kombination verschiedener Domänen, zu denen unter anderen die Umfeldsensorik, die Bewegung des Insassen in der Pre-Crash Phase, die strukturelle Deformation der Karosserie bei einer Fahrzeugkollision und die Rückwirkung des Rückhaltesystems auf den Insassen zählen.

Typischerweise werden in diesen Bereichen finite Elemente oder Mehrkörpersimulationsmodelle eingesetzt, welche hochgenaue numerische Lösungen berechnen, dafür jedoch sehr lange Rechenzeiten benötigen. Wird eine szenarienbasierte Wirksamkeitsbewertung anhand einer Vielzahl an realistischen Fahr-szenarien umgesetzt, steigt der benötigte Rechenaufwand stark an, sodass die benötigten Ergebnisse zur optimalen Auslegung des Sicherheitssystems mit konventionellen Simulationsmethoden nicht innerhalb eines Produktentwicklungszyklus bereitgestellt werden können. Dies fördert die Nachfrage an schnellrechnenden Ersatzmodellen, welche vereinfachte physikalische Modelle oder maschinelles Lernen verwenden, um die gewünschten Ergebnisse in einem Bruchteil der Rechenzeit approximieren zu können.

In dieser Arbeit soll in einer ersten Konzeptstudie eine ersatzmodellgestützte Wirksamkeitsbewertung eines Rückhaltesystems mit und ohne Automated Emergency Braking (AEB) für Frontalkollisionen durchgeführt werden.

4. Simulationsframework für integrale Fahrzeugsicherheit

Um die Wirksamkeit des Rückhaltesystems szenarienbasiert zu berechnen, müssen alle Fahrphasen vom normalen Fahren bis zur Kollision betrachtet werden. Wie in Bild 1 dargestellt, werden dazu die Simulationsmodelle der Szenarien, Fahrzeugcrash und Insassen Pre- und In-Crash Simulation miteinander verbunden und Schnittstellen definiert, welche die relevanten

Informationen an das nachfolgende Simulationsmodell weitergeben und somit eine durchgängige automatisierte Simulation realistischer Fahrscenarien ermöglichen.

Die einzelnen Simulationsmodelle und Schnittstellen werden im Folgenden beschrieben.

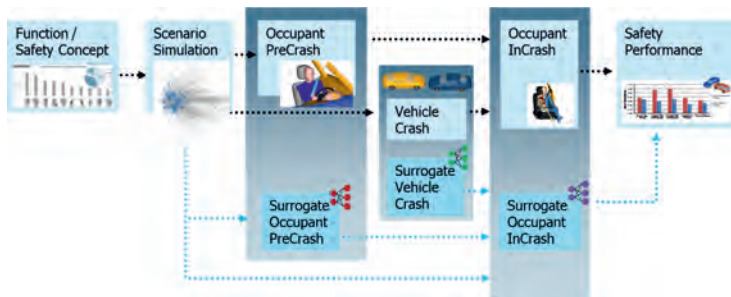


Bild 1: Skizze des Simulationsframeworks, welcher alle relevanten Simulationen vom normalen Fahren bis hin zum Crash beinhaltet

Szenarien Simulation

Die Szenarien Simulation beschreibt das Fahrscenario und beinhaltet zwei Fahrzeuge, deren Bewegung durch ein Carmaker Fahrdynamikmodell definiert wird. Für jedes Szenario werden die Beschleunigungen des Ego Fahrzeugs und die Kollisionskonfiguration des Ego und Target Fahrzeugs berechnet. In dieser Arbeit werden 285 Szenarien betrachtet, welche in einer Frontalkollision enden. Diese sind in Bild 2 dargestellt.

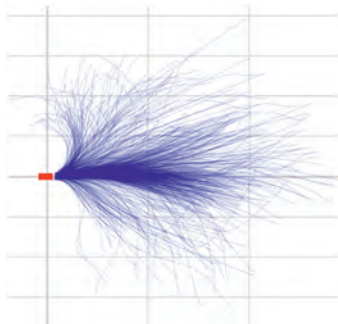


Bild 2: Betrachtete Trajektorien des Ego Fahrzeugs (blau), welche in einer Frontalkollision enden und relativ zur Position des Target Fahrzeugs (rot) zum Zeitpunkt der Kollision dargestellt sind.

Pre-Crash Insassensimulation

In der Simulation der Pre-Crash Phase werden die Fahrzeugbeschleunigungen der Szenarien Simulation auf ein Madymo Active Human Model (AHM) aufgeprägt und die Insassenverlagerung für das entsprechende Fahrmanöver berechnet. Das Insassenmodell beinhaltet neben dem Menschmodell einen Fahrzeuginnenraum mit Instrumententafel, Sitz und Gurt, siehe Bild 3. Die Hände des Fahrers werden während des gesamten Pre-Crash Manövers am Lenkrad fixiert.



Bild 3: Insassenverlagerung während der Pre-Crash Phase.

Die Kopfposition wird als Referenzgröße für die Insassenverlagerung verwendet, da diese eine zentrale Randbedingung für die Interaktion mit dem Airbag ist.

Fahrzeugcrashsimulation

Jedes betrachtete Pre-Crash Szenario endet in einer Kollision, welche in dieser Arbeit durch drei Parameter - Kollisionswinkel, Kollisionsgeschwindigkeit und Offset - beschrieben wird. Die Kollisionsparameter und deren Wertebereich sind in Bild 4 dargestellt. Für diese Machbarkeitsstudie werden die betrachteten Szenarien durch eine Vorauswahl auf einen Parameterraum eingegrenzt. Dieser orientiert sich an aktuell gültigen Lastfällen für die Rückhaltesystemauslegung.



Bild 4: Definition des Kollisionsszenarios in Abhängigkeit des Kollisionswinkels, der initialen Geschwindigkeit und des Offsets.

Um die Komplexität in dieser Konzeptstudie gering zu halten, werden nur Kollisionen desselben Fahrzeugtyps, eines Honda Accords [4] berücksichtigt. In der Fahrzeugcrashsimulation werden die Verzögerungen, auch Crashpuls genannt, am Schwerpunkt gemessen und anschließend auf das In-Crash Insassenmodell aufgeprägt.

In-Crash Insassensimulation

Die Randbedingungen der In-Crash Phase zum Kollisionszeitpunkt, welche die Fahrzeuggeschwindigkeit und Insassenposition beinhalten, werden durch die Szenarien und Pre-Crash Simulation definiert. Durch ein anschließendes Aufprägen des Crashpulses verlagert sich der Insasse nach vorne und taucht nach Auslösen des Gurtstraffers und Ausziehen des Gurtes mit Kraftbegrenzung in den Airbag ein, siehe Bild 5.

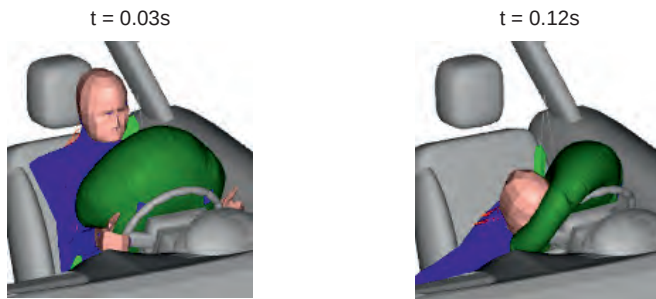


Bild 5: Eintauchen des Menschmodells in den Airbag durch Verzögerung des Fahrzeugs.

Um den Einfluss der Rückhaltesystemparameter zu untersuchen, wurden die Zündzeiten des Gurtstraffers und Airbags (jeweils 5-15ms), sowie die Kraftbegrenzung des Traffrs (3500-5500N) und der Durchmesser der Abströmmöffnung des Airbags (35-45mm) variiert. Aus den verfügbaren Verletzungswerten wurden exemplarisch das Head Injury Criterion (HIC36) und die Brust eindrückung als zwei der relevantesten Verletzungsgrößen ausgewählt.

5. Entwickelte Ersatzmodelle

Da die Simulation eines einzelnen Fahrerszenarios mehr als 24 Stunden Rechenzeit benötigt, bedarf es alternativer Methoden, welche eine Abschätzung der relevanten Ergebnisse in sehr viel kürzerer Zeit ermöglichen. Die sogenannten Ersatzmodelle lassen sich in zwei Gruppen einteilen: physikalische und datenbasierte Modelle. Während die datenbasierten Modelle von sehr schnellen Rechenzeiten profitieren, kann Systemwissen in physikalische Ersatzmodelle

integriert werden. Im Folgenden werden die drei Ersatzmodelle vorgestellt die im Simulationsframework für die Pre-Crash, Fahrzeugcrash und Insassen In-Crash Phase entwickelt worden sind.

Pre-Crash Ersatzmodell

Das Verhalten des Insassen in der Pre-Crash Phase lässt sich für die betrachteten Lastfälle durch ein stark vereinfachtes inverses Pendel abbilden, siehe [5]. In dieser Arbeit wurde ein dreigliedriges Pendel entworfen, welches in einem Sitz aus Ellipsoiden verankert ist. Durch die Interaktion der Zylinder, welche den Oberkörper des Insassen darstellen, mit den Sitzwangen und einem vereinfachten Gurtmodell wird die Bewegung des Insassen eingeschränkt. Zusätzlich wird die Abstützung der Arme am Lenkrad vereinfacht durch eine translatorische Federkraft modelliert. In Bild 6 ist eine Skizze des vereinfachten Modells mit dem Skelett des Menschmodells überlagert.

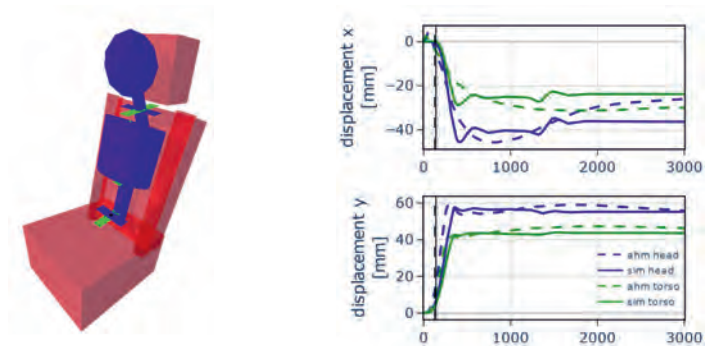


Bild 6: Seitenansicht des Ersatzmodells bestehend aus einem inversen Pendel, welches in einem Sitz positioniert ist und Vergleich einer beispielhaften Simulation von AHM und Ersatzmodell.

Nach aufprägen der Fahrzeugbeschleunigungen verlagert sich das inverse Pendel, wobei die Bewegung des Kopfschwerpunktes gemessen wird. Zur Identifikation der Modellparameter wurden 10 Fahrscenarien als Trainingssimulationen verwendet. Mit einem unabhängigen Set bestehend aus 9 Testsimulationen wurde ein Mean Absolute Error (MAE) von 8 mm berechnet. Auf der rechten Seite von Bild 6 ist die Verlagerung des inversen Pendels und des Menschmodells beispielhaft für ein Szenario dargestellt.

Fahrzeugcrash Ersatzmodell

Das Verzögerungsverhalten des Fahrzeugs während einer Kollision ist abhängig von der Fahrzeugstruktur der beiden Kollisionspartner und der Kollisionskonfiguration. Um das nichtlineare, richtungsabhängige Verformungsverhalten der Fahrzeugstruktur abbilden zu können, wurde ein Gaußprozessmodell [6], ein datenbasiertes Verfahren zur Approximation des Crashpulses verwendet. Basierend auf den Kollisionsparametern – Kollisionswinkel, Kollisionsgeschwindigkeit und Offset – wird der Crashpuls als Zeitsignal approximiert [7]. Zum Training des Gaußprozesses wurden 112 Fahrzeugcrashsimulationen verwendet, welche durch ein Latin Hypercube Sampling erzeugt wurden. Eine beispielhafte Vorhersage ist in Bild 7 dargestellt. Das Ersatzmodell wurde mittels einer K-Fold-Crossvalidation validiert, wobei ein Root Mean Squared Error (RMS) von 24.17 m/s^2 und ein mittlerer Occupant Load Criterion (OLC) [8] Fehler von 0.689g berechnet wurde. Bild 7 zeigt die Verteilung des OLC Fehlers aller betrachteter Kollisionsszenarien. Das entwickelte Ersatzmodell ermöglicht eine Reduktion der Rechenzeit von ca. 20 h zu wenigen Millisekunden.

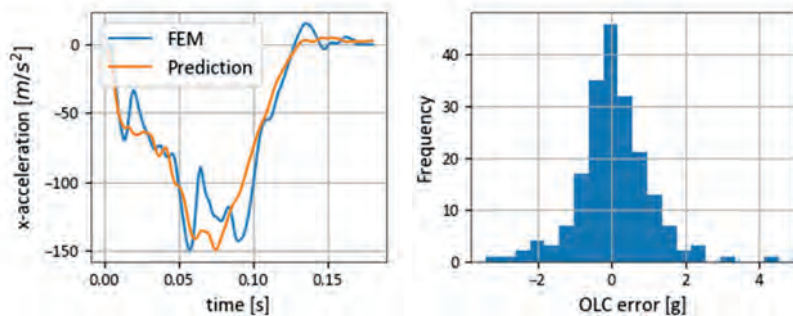


Bild 7: Validierung der Vorhersage des Crashpulses anhand FEM Daten und OLC.

In-Crash Ersatzmodell

Zur Approximation der aus einer Kollision resultierenden Verletzungswerte wurden ebenfalls Gaußprozessmodelle verwendet. Da sich die Response Surfaces von HIC36 und Brusteingdrückung in ihrer Form stark unterscheiden, wurde ein Gaußprozess mit Matern Kernel [5] für das unstetige Verhalten des HIC36 verwendet, während ein RBF Kernel für das kontinuierlichere Verhalten der Brusteingdrückung gewählt wurde. Als Eingangsparameter zur Vorhersage der Verletzungswerte stehen sowohl die Kopfposition und Kollisionskonfiguration als auch die in Kapitel 4 definierten Rückhaltesystemparameter zur Verfügung. Es wurden 200 Samples mit

einer Halton Sequenz erzeugt, wobei die ersten 100 Simulationen zum Training und die restlichen 100 Simulationen zur Validierung der Ersatzmodelle verwendet wurden. Ein Vergleich von vorhergesagten und simulativ berechneten Verletzungswerten ist in Bild 8 dargestellt.

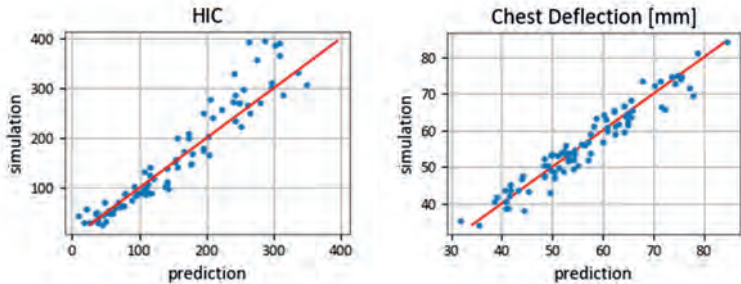


Bild 8: Validierung des In-Crash Ersatzmodells.

Die trainierten Gaußprozesse liefern Vorhersagen des HIC36 und der Brusteingdrückung mit einem MAE von jeweils 80.67 und 6.7 mm. Des Weiteren kann eine Verringerung der Rechenzeit von 2 Stunden auf wenige Millisekunden erzielt werden.

6. Effektivitätsbewertung

Durch Integration der entwickelten Ersatzmodelle wird eine effiziente Bewertung einer Vielzahl an Fahrscenarien ermöglicht. Jedoch werden für jedes Szenario zwei unabhängige Verletzungswerte vorhergesagt. Deshalb wird für beide Größen die AIS2+ Verletzungswahrscheinlichkeit

$$P_{HeadAIS2+} = N\left(\frac{\ln(HIC36) - 6.96352}{0.84664}\right), \quad (1)$$

$$P_{ThoraxAIS2+} = \frac{1}{1 + e^{(1.8706 - 0.04439 \cdot D_{max})}}, \quad (2)$$

nach [9] berechnet. Anschließend werden, wie in [10] beschrieben, beide Verletzungswahrscheinlichkeiten in einer Gesamtverletzungswahrscheinlichkeit zusammengefasst

$$P_{joint} = P_{HeadAIS2+} + P_{ThoraxAIS2+} - (P_{HeadAIS2+} * P_{ThoraxAIS2+}). \quad (3)$$

Jedes der in Bild 2 dargestellten Szenarien wird ohne AEB (Baseline) und mit zwei verschiedenen AEB Varianten (time to collision (TTC) von 0.6 und 0.9 s) simuliert, somit werden insgesamt 855 Szenarien untersucht. Die resultierenden Verteilungen des Verletzungsrisikos in Bild 9 zeigen klar auf, dass durch die Integration eines AEBs bzw. dessen frühere Aktivierung

das Verletzungsrisiko gesenkt wird. In Tabelle 1 wird dies durch eine Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit und eine Verringerung des Verletzungsrisikos um 6% beziehungsweise 16% sichtbar.

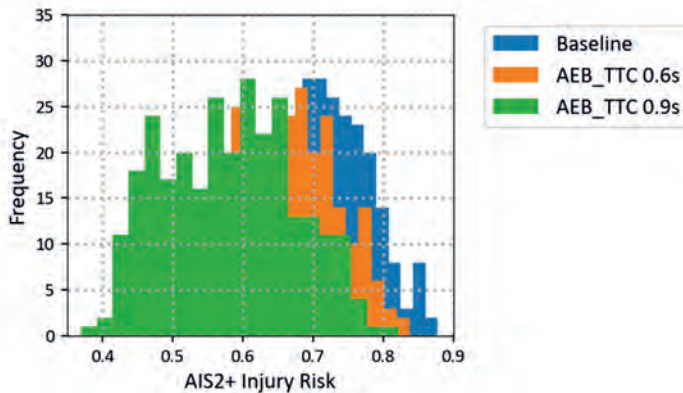


Bild 9: Reduktion des AIS2+ Verletzungsrisikos.

Neben einer Bewertung des aktiven Sicherheitssystems ermöglichen die Ersatzmodelle durch die stark reduzierte Rechenzeit eine Optimierung der in Kapitel 4 beschriebenen Rückhaltesystemparameter in wenigen Sekunden. Für jedes Fahrzenario kann auf diese Weise eine optimale Rückhaltesystemkonfiguration bestimmt werden, wodurch das Verletzungsrisiko weiter reduziert werden kann, siehe Bild 11.

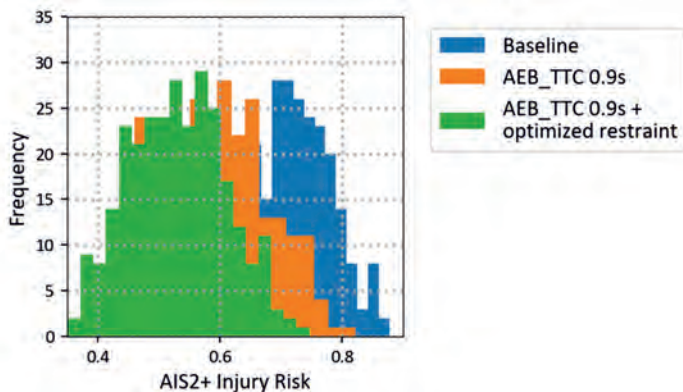


Bild 11: Weitere Reduktion des Verletzungsrisikos durch eine lastfallspezifische Optimierung der Rückhaltesystemparameter

Im Vergleich zum Standardrückhaltesystem kann dabei bei gleichbleibender Kollisionsgeschwindigkeit eine Reduktion des Verletzungsrisikos um weitere 4% erreicht werden.

Tabelle 1: Ergebnisse der Effektivitätsbewertung für Baseline, AEB Varianten und optimiertes Rückhaltesystem

	Baseline	AEB_TTC 0.6s	AEB_TTC 0.9s	AEB_TTC 0.9s + optimiertes Rückhaltesystem
Mittelwert der Kollisionsgeschwindigkeit [km/h]	58.7	52.0	44.8	44.8
Mittlere Änderung der Kollisionsgeschwindigkeit [km/h]	---	-6.7	-13.9	-13.9
Relative Änderung zur Baseline [%]	---	-11	-24	-24
Mittleres AIS 2+ Risiko	0.7	0.66	0.59	0.56
Mittlere Reduktion des AIS 2+ Risikos	---	-0.04	-0.11	-0.14
Relative Änderung zur Baseline [%]	---	-6	-16	-20

Durch eine anschließende Simulation einzelner Szenarien kann das gesamte Ersatzmodell-Framework validiert werden. In Bild 12 sind die vorhergesagten und simulativ bestimmten Verletzungswerte jeweils für das Standardrückhaltesystem als auch mit optimiertem Rückhaltesystemparametern für 10 zufällig ausgewählte Fahrscenarien dargestellt.

Obwohl die Vorhersage der Ersatzmodelle von den Referenzsimulationen abweichen, sind sie dennoch in der Lage, die globalen Zusammenhänge abzubilden und Rückhaltesystemparameter zu finden welche die Verletzungsschwere für die Testsimulationen zu reduzieren.

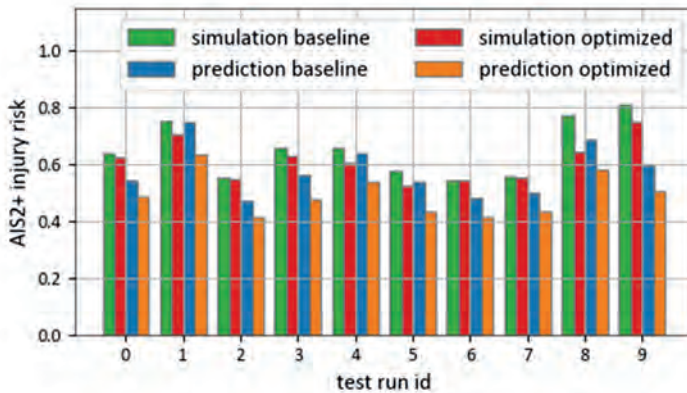


Bild 12: Validierung des Gesamtframeworks.

7. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Simulationsframework zur Bewertung von integralen Fahrzeugsicherheitssystemen aufgebaut. Durch die Entwicklung und den Einsatz von schnellrechnenden Ersatzmodellen ist eine effiziente Betrachtung einer Vielzahl von Fahrscenarien in einem kurzen Zeitraum möglich. Des Weiteren können die Ersatzmodelle für eine Optimierung des Rückhaltesystems eingesetzt werden und dadurch das Potential optimal abgestimmter aktiver und passiver Fahrzeugsicherheitssysteme aufgezeigt werden.

Die Ersatzmodelle liefern eine erste Abschätzung der relevanten Größen mit dem aufgezeigten Fehler im Vergleich zu einer vollständigen Simulation mit physikalisch aufgelösten Modellen. Über der Gesamtheit aller betrachteten Simulationen kann mit den Ersatzmodellen eine Approximation in gewünschter Güte erreicht werden. Da es sich hierbei jedoch um mathematische Ersatzmodelle handelt, ist nicht zu erwarten, dass der Zeitverlauf aller Ergebnisgrößen exakt dem eines vollständig physikalischen Modells entspricht. Sollte der gesamte Verlauf der Ergebnisse über die Simulationskette benötigt werden, ist im Einzelfall zu prüfen ob eine vollständige physikalische Simulation dafür benötigt wird.

Des Weiteren sind die erzeugten Ergebnisse nur für den ausgewählten Fahrzeugtyp und Rückhaltesystem gültig. Sollen weitere Fahrzeuge oder ein verändertes Rückhaltesystem betrachtet werden, müssen die beschriebenen Trainingsschritte wiederholt werden.

In Zukunft soll der Gültigkeitsbereich des Frameworks erweitert werden, um einen größeren Kollisionsbereich und unterschiedliche Fahrzeugtypen mit Beladung berücksichtigen zu können. Außerdem können die entwickelten Ersatzmodelle für neue Fahrzeugfunktionen wie zum Beispiel eine Vorhersage des Crashpulses in Echtzeit oder ein Insassen-Monitoring-System verwendet werden.

- [1] Euro NCAP Roadmap 2025,
<https://cdn.euroncap.com/media/30599/euroncap-roadmap2025.pdf>,
Zugriff am 08.10.21
- [2] OSCCAR Project, <https://www.osccarproject.eu/>, Zugriff am 08.10.21
- [3] SAFE-UP Project, <https://www.safe-up.eu/>, Zugriff am 08.10.21
- [4] Singh, H.; Kan, CD.; Marzougui, D.; Quong, S. (2016). *Update to Future Midsize Light weight Vehicle Findings in Response to Manufacturer Review and IIHS Small-Overlap Testing*: NHTSA Report No. DOT HS 812 237.
- [5] Rasmussen, C.; Williams, C. (2006). *Gaussian Processes for Machine Learning*: MIT Press.
- [6] Kübler, L.; Gargallo, S.; Elsässer, K. (2009). *Frontal Crash pulse Assessment with Application to Occupant Safety*: ATZ worldwide, Bd. 111, Nr. 6, p. 12-17.
- [7] Hay, J.; Fehr, J.; Schories, L. (2020). *Crash Pulse Prediction for Scenario-based Vehicle Crash FE-Simulations*: Proceedings of IRCOBI Conference.
- [8] Cyrén, O. and Johansson, S. (2018). *Modeling of Occupant Kinematic Response in Pre-crash Maneuvers - A simplified human 3D-model for simulation of occupant kinematics in maneuvers*: Chalmers University of Technology (Master's thesis - Department of Mechanics and Maritime Sciences, no. 2018:57).
- [9] Eppinger, R.; Sun, E.; Bandak, F.; Haffner, M.; Khaewpong, N.; Maltese, M.; Kuppia, S.; Nguyen, T.; Takhoumts, E.; Tannous, R.; Zhang, A.; Saul, R. (1999). *Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems-II*: NHTSA.
- [10] National Highway Traffic Safety Administration (2008). *Consumer Information; New Car Assessment Program; Notice*: Federal Register / Vol. 73., No. 134, p. 40015-40050.

Evaluation of motorized seatbelts in the Euro NCAP AEB-CCFtap scenario: Application of a feedback control loop model in Simulink coupled to a finite element model in LS-Dyna

Stefan Schilling, Anurag Soni, Heiko Hinrichs, Christian Verheyen, Andreas Lucht, Burkhard Eickhoff,
Autoliv B. V. & Co. KG, Elmshorn;
Ekant Mishra, Autoliv Sweden

Zusammenfassung

Die Applikation von mechatronischen Gurtstraffersystemen (MBPPT) wird seit dem ENCAP 2020 Protokoll mit Zusatzpunkten in der Kategorie „Safety Assist“ belohnt. U.a. dient in dieser Kategorie das Szenario des Abbiegeunfalls (Car-to-Car Front turn-across-path, CCFtap) der Beurteilung von AEB Assistenten. Es wird erwartet, dass diese Manöver die Kinematik der Insassen beeinflussen und zu einer Insassenhaltung führen, die von der standardmäßigen, aufrechten Haltung bei Crashtests abweicht. Ein MBPPT kann dem Entgegenwirken und den Insassen in einer bevorzugten aufrechten Haltung halten. In der Vergangenheit wurden die MBPPT-Systeme aufgrund vereinfachender Modellierungsansätze in der Simulation nicht optimiert. Außerdem wurden Fahrzeugnetzdaten (z. B. Bedingungen vor dem Unfall, verfügbare elektrische Leistung, Spannung und Strom) bei der Simulation dieser Systeme kaum genutzt.

Ziel dieser Studie war es, durch die Kopplung von Simulink und LS-Dyna, eine fortschrittliche Simulationemethode anzuwenden, um ausreichend genaue und realistische MBPPT-Systeme zu modellieren und ihre Effektivität im CCFtap-Szenario zu bewerten. Die MBPPT-Modelleinstellungen basierten auf zwei bestehenden Produktkonfigurationen. Die Auswirkungen der beiden MBPPT-Konfigurationen auf die Gurtcharakteristiken und die seitliche Verschiebung der Insassen wurden mit dem SAFER A-HBM sowie den ATD-Modellen THOR und Hybrid III untersucht.

In der Studie wurde festgestellt, dass das MBPPT-System die Rückhalteleistung im CCFtap-Szenario gegenüber dem Standardgurt-System verbesserte, da es die seitliche Verschiebung einschränkte und die Insassenmodelle in nahezu aufrechter Haltung hielt. Das MBPPT-System in der Konfiguration C_{high} schränkte die Bewegung stärker ein als in der Konfiguration C_{low} . Das aktive SAFER-HBM zeigte für alle Gurtkonfigurationen größere Y-

Verschiebungen im Vergleich zu den beiden ATDs. Dies verdeutlicht die begrenzte Eignung beider ATDs für die Pre-Crash-Analyse bei niedrigen Beschleunigungen.

Die Kopplung von Simulink mit LS-Dyna wurde erfolgreich angewendet, um ein genaues MBPPT-Modell zu erhalten. Die Methode kann durch Hinzufügen von Modulen für verschiedene Funktionen (z. B. Algorithmen zur Entscheidungsfindung im Fahrzeug) weiter ausgebaut werden. Diese Software-in-the-Loop-Methode kann dann Informationen aus dem Fahrzeugnetzwerk während verschiedener Fahrphasen direkt in die Entwurfsparameter des MBPPT einspeisen, um die Auswirkungen auf die Insassenkinematik zu bewerten. Dieser Ansatz kann auf ein breiteres Spektrum von Szenarien angewendet werden, um das Rückhaltesystem weiter zu optimieren und schließlich virtuelle Tests zu ermöglichen.

Abstract

Since the ENCAP 2020 protocol, the application of mechatronic belt pre-pretensioner (MBPPT) has been rewarded with additional points in the "Safety Assist" category. Among others, in this category, the scenario of a turning-accident (car-to-car front turn-across-path, CCFtap) is used to assess AEB assistants. These maneuvers are expected to affect occupant kinematics leading to a posture different from the standard upright position in crash testing. A MBPPT system can counteract and maintain the occupant in a preferred upright posture. In the past, the MBPPT systems were not optimized in simulation due to simplistic modelling approaches. Moreover, vehicle network data (e.g. Pre-crash conditions, available power, voltage and current) has hardly been utilized simulating these systems.

The objective of this study was to apply an advanced simulation method by coupling Simulink to LS-Dyna to model sufficiently accurate and realistic MBPPT systems and evaluate their performance in the CCFtap scenario. The MBPPT model settings were based on two existing product configurations. The effect of both MBPPT configurations on belt characteristics and occupant lateral displacement were studied with the SAFER A-HBM and ATD models of THOR and Hybrid III.

It was found in this study, that the MBPPT system improved restraint performance over the standard belt system in the CCFtap scenario as it restricted lateral displacement and held the occupant models in near upright posture. The MBPPT in C_{high} configuration restricted motion more than the C_{low} configuration. The active SAFER-HBM showed larger Y-displacements for all belt configurations compared to both ATDs. This is identifying the limited suitability of both ATD for low speed pre-crash analysis.

The coupling of Simulink to LS-Dyna solvers was successfully applied to achieve an accurate MBPPT model. The method can be further extended by adding modules for different functions (e.g. vehicle decision making algorithms). This software-in-the-loop method can then directly feed information from vehicle network during different stages of driving to the design parameters of MBPPT for evaluating the effects on occupant kinematics. This approach can be applied to a broader spectrum of scenarios for further optimizing the restraint system and finally enabling virtual testing.

1. Introduction

Euro NCAP implemented the AEB Car-to-Car Front turn-across-path (CCFtap) scenario in 2019 [1], where AEB systems are devised to brake to avoid crashes in the CCFtap scenario. The combined steering and braking maneuver during CCFtap are expected to affect occupant kinematics leading to a posture different from the standard upright position in crash testing.

A mechatronic belt pre-pretensioner (MBPPT) system can counteract and maintain the occupant in a preferred upright posture [2, 3, 4]. In the past, the MBPPT systems were not optimized in simulation due to simplistic modelling approaches involving pre-crash postures [5] and assumed belt forces [6]. Moreover, vehicle network data (e.g. pre-crash conditions, available power, voltage and current) have hardly been utilized when simulating these systems. For defining proper MBPPT motor characteristics a sophisticated feedback control loop model is required. LS-Dyna provides a user interface for defining controller models and feedback control loops, but simplicity of this approach and lack in advanced optimization toolboxes represent limitations [7, 8]. Alternatively, a Matlab/Simulink MBPPT feedback control loop model can be coupled to interact with the occupant model in LS-Dyna [9].

AEB and belt pre-pretensioner systems can affect the way the occupants interact with the vehicles. In these scenarios, where low forces act over a long duration on the occupant, the muscle responses of the occupants become crucial. Not only AEB and MBPPT but also the impending crash can trigger a dynamic occupant response influenced by muscle tension [10]. Thus, it is essential to study the muscle activity of the occupants to predict the kinematics in pre-crash situations, as several previous studies have concluded [10-12].

Human Body Models (HBMs) equipped with active muscular control systems, known as Active HBMs (A-HBMs), have been developed to replicate the occupant responses in pre-crash scenarios. The SAFER A-HBM is one such model which has been modelled and validated towards driving and braking maneuvers using volunteer kinematic and muscle response data [13]. It has also been validated for lane change and combined braking and lane change sce-

narios using different omnidirectional muscle recruitment strategies [14-15]. In previous studies the SAFER A-HBM has been used to simulate braking, lane change, and combined scenarios with or without a belt pre-tensioner [6] [13] [15-17]. However, the difference in kinematic responses between A-HBMs and conventional Anthropomorphic Test Devices (ATDs), if exposed to advanced MBPPT modelling and Euro NCAP CCFTap scenario, has not been studied sufficiently.

The objective of this study was to apply an advanced simulation method to model sufficiently accurate and realistic MBPPT systems and to evaluate their performance in the CCFTap scenario and assessing the resulting occupant kinematics. The MBPPT model settings were based on two existing product configurations resulting in two different belt force level. The effect of both MBPPT configurations on belt characteristics and occupant lateral displacement were studied with the 50th percentile male SAFER A-HBM version 9, THOR 50th percentile (THOR) and Hybrid III 50th percentile (Hybrid) male ATD models.

2. Methods

The methods section describes the used load case, the Matlab/Simulink model of the MBPPT as well as the passive safety environment in LS-Dyna. Also, the methodology for coupling and model parameterization is explained.

Deriving load case from Euro NCAP CCFTap scenario

The Euro NCAP Test Protocol „AEB Car-to-Car Systems“ Version 3.0.2 [1] specifies the vehicle load case CCFTap. It describes a turning scenario at an intersection of a Vehicle under Test (VUT) and a Global Vehicle Target (GVT). For the VUT three trajectories are described dependent on the constant turning velocity, where the fastest and in this work used was 20 km/h. The VUT trajectory consists of several parts: straight entry and exit path, starting and ending clothoid and in between a constant radius; each with specified radii and angles. The GVT follows a straight trajectory. For both vehicles the longitudinal axis is 1.75 m off the streets center axis. Both the trajectories are synchronized so that both vehicles will meet with 50% overlap with no AEB system reaction assumed.

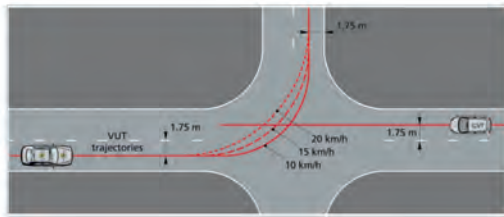


Fig. 1: Euro NCAP CCFtap load case as specified in [1].

This scenario was used as a basis to derive a load case to rate occupant kinematics. In this hypothesized load case the following assumptions were made. The VUT is equipped with an AEB system and can avoid the crash with the GVT by deceleration. Deceleration of 1 g is initiated as the VUT is leaving the center axis of the street lane by 0.25 m, which occurs at 0.4 s. While deceleration the VUT maintains the intended trajectory until coming to a full stop. The GVT crossing the VUT's trajectory was neglected, hence, the VUT was not exposed to a crash pulse. The MBPPT was triggered at time 0 s, hence, before the triggering of the AEB, to ensure belt slack removal was completed before significant occupant lateral kinematics were initiated. The resulting vehicle dynamics are illustrated in Fig. 2.

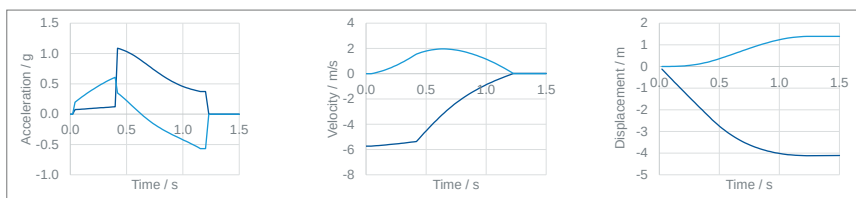


Fig. 2: Acceleration (left), Velocity (center) and Displacement (right) used for occupant kinematic analysis derived from CCFtap load case. In dark blue the x-directional component is illustrated; light blue shows the y-direction.

Passive safety environment in LS-Dyna

The passive safety environment was built around a rigid UN ECER16 steel seat. The describing right-handed coordinate system has the X-axis pointing in the reverse driving direction and the Z-axis in the upwards direction. It had a seat pan angle of 10° with respect to the YX plane and a seat backrest angle of 10° with respect to the YZ plane. At -791 mm x-direction from H-Point a 45° footrest was placed. For the seat pan and the seat backrest a contact friction coefficient of $\mu=0.35$ was defined for the contacting surfaces of the investigat-

ed ATDs and HBM. A generic pillar loop based seat belt geometry was chosen. The seat belt layout consisted of an anchor plate and a semi-flexible buckle on wire, with wire length of 90 mm. The anchorage points with respect to the H-Point of Hybrid dummy of the seat were for anchor $x = 75$ mm, $y = -267$ mm, $z = -148$ mm, buckle $x = 70$ mm, $y = 228$ mm, $z = -163$ mm, D-Ring $x = 295$ mm, $y = -272$ mm, $z = 687$ mm and retractor $x = 100$ mm, $y = -337$ mm, $z = -266$ mm. The friction between belt and pillar loop was set to $\mu = 0.10$ and between belt and buckle to $\mu = 0.12$. The belt to buckle and pillar loop contact was modelled as 3D contact. For all three occupant models gravity was included. The passive safety environment was modelled in the explicit code environment of LS-Dyna R9.3.1 SVN version 141945. The modelling technique and parameterization of MBPPT are described in the two following sections.

As occupant model the active SAFER Human Body Model v9.0.1 was used, 50% male Hybrid III v. 8.0.1. and THOR v.1.6 ATDs were used as references. The Hybrid was positioned with its H-Point aligned to the seat reference point determined by "three-dimensional H-Point machine". The THOR H-Point position was defined using [18]. For active SAFER HBM a position was chosen, such that the pelvis positions between Hybrid and active SAFER HBM closely match. For all occupants the thorax angle was defined such that contact with the seat backrest was initiated. All three occupant models in ECE R16 seat environment are illustrated in Fig. 3.

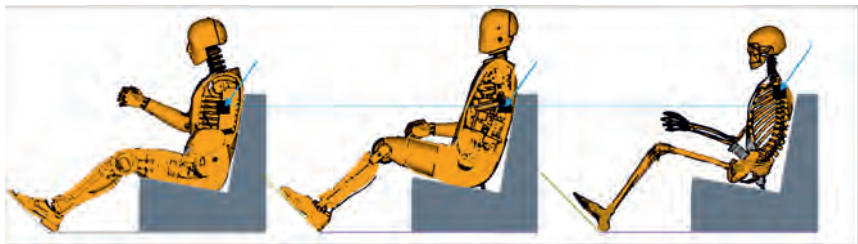


Fig. 3: Centroidal section cut of Hybrid (left), THOR (center) ATD and active SAFER HBM (right) positioned on UN ECER16 seat environment with indicated T4 location.

The active SAFER HBM required a settling time of 300 ms before the actual onset of scenario pulse. During the settling time the activated muscle modelling was establishing an equilibrium with prevailing gravity. Also contact forces of SAFER HBM to seat environment were established. These 300 ms settling time were included in the ATD simulation as well. After the 300 ms settling time with zero acceleration the CCFtap scenario acceleration (Fig. 2) was appended.

For result assessment the following metrics were evaluated: 1) Maximum X (forward) - and Y (lateral) -displacement of T4 after activation of AEB. 2) Maximum belt pay in travel before AEB activation. 3) Belt pay in onset after MBPPT activation, defined as time value at maximum belt pay in velocity. 4) Duration of belt pay in to complete, defined as the interval between onset and first time of belt pay in velocity leveling to 0 m/s. 5) Maximum webbing pay in speed. 6) Maximum shoulder belt force before AEB activation.

Modelling MBPPT in Matlab/Simulink

The MBPPT was modelled in Matlab/Simulink R2020B by implementing the relevant physical properties of the respective mechatronic parts. For the modelling four main categories were considered. 1) The mechanical properties of electrical motor, gear stage and retractor. 2) The electronic circuit unit (ECU) characteristics and 3) the electro-mechanical interaction. 4) Pyrotechnical pretensioning of the retractor for in crash belt slack reduction was not further focused on in this work. For the modelling, standard Simulink block building methodology was applied by accounting switches, time integration and differentiation, adds, gains and lookup table blocks.

The mechanical modelling of used physical components was conducted by numerically solving differential equation in rotational formulation using acceleration Moment M_{acc} , rotatory inertia J and rotatory acceleration α (1):

$$M_{acc} = J \cdot \alpha \quad (1)$$

Energy dissipation terms, e.g. due to friction in between the components was considered in the equilibrium formulation of moments.

The electronical modelling was conducted by numerically solving differential equation consisting of voltage U , current I , ohmic resistor R , inductivity L , speed constant of motor k_v and motor rotation speed ω (2):

$$U = R \cdot I + L \cdot \dot{I} + k_v \cdot \omega \quad (2)$$

Solving (2) for the current I , the motor torque M_{Motor} can be calculated using torque constant k_m and current I which will also contribute to the equilibrium formulation of moments (3):

$$M_{Motor} = k_m \cdot I \quad (3)$$

With (1-3) the acceleration of the motor was calculated using the external load on the motor M_{load} (4):

$$\alpha = \frac{k_m \cdot I - M_{friction} - M_{load}}{J} \quad (3)$$

Along with the time dependent mechanical and electronical behavior the ECU of the motor was modelled, e.g. voltage and power control, voltage booster or rotational speed limitation.

For this PID-Controller blocks, with optimized parameter sets, were used and also a multi rate system was considered by accounting different clock rates in the system (chipset-, software- and vehicle CAN-Bus clock rate). The complete Matlab/Simulink model consisted of 1587 blocks and was numerically solved by explicit Euler-Cauchy method.

Coupling Matlab/Simulink to LS-Dyna

The Coupling of two systems can be interpreted as exchanging kinematic (e.g. velocity) and kinetic (e.g. force) information. To enable the exchange of information between Matlab/Simulink and LS-Dyna a third-party software (model.connect R2020.2) was required. Along with the graphical user interface (GUI) of model.connect, interfaces to LS-Dyna and Matlab/Simulink were supplied. For LS-Dyna a user defined material was supplied which was assigned to a beam element (b_1). The used LS-Dyna version enables to define a curve which is filled with values during the runtime of the simulation. This feature was used to provide belt pay in velocity information from Matlab/Simulink to LS-Dyna, where the velocity was embossed to a node of the beam element b_1 connected to the seat belt in the passive safety environment.

The MBPPT Matlab/Simulink model interface to LS-Dyna expected forces as input parameter. The used software release of model.connect did not support reading beam forces from element b_1 direct during LS-Dyna runtime, on the other side, reading nodal velocities was supported. Hence, a workaround was developed. The current seat belt force in element b_1 was extracted within LS-Dyna using *DEFINE_CURVE_FUNCTION and embossed to a node of a sled model independent defined beam element b_2 as velocity. This velocity was read by model.connect and further sent to Matlab/Simulink, where the velocity was interpreted as force. With such workaround the required force information was transferred as scalar value between the Matlab/Simulink and LS-Dyna.

Parametrization of MBPPT

Using the Matlab/Simulink model of the MBPPT two parameter configurations were used for the investigation, which were derived from two existing serial products. In this study the two configuration will be referenced as configuration "High" (C_{high}) and configuration "Low" (C_{low}), based on the realizable belt forces. Hidden behind these two configurations the maximum power supply, gear ratio and gear efficiency were modified. For baseline reference a configuration without MBPPT was selected, referenced as the standard belt (StdB).

3. Results

The time history data for belt pay in and shoulder belt force is illustrated in Fig. 4 for active SAFER HBM and the two ATD and the respective belt configurations.

The belt pay in showed the same trends for all three occupants. StdB belt pay out from the retractor in the restraint system was at a very similar level of ~ 30 mm for all three occupant models during the CCftap scenario. C_{high} showed highest belt pay in followed by C_{low} . For both MBPPT configuration the maximum belt pay in level was dependent on the used occupant model, where most pay in was with SAFER HBM, followed by THOR and Hybrid.

Shoulder belt force ramp up after MBPPT activation was faster for C_{low} compared to C_{high} . Both MBPPT configurations saturated at their respective shoulder belt force level before AEB activation at 700 ms. SAFER HBM with C_{high} took the longest time to reach static shoulder belt force level. The shoulder belt force level for SAFER HBM showed strong oscillations compared to both ATD. For all three occupants shoulder belt force had the peak after AEB activation, where the used belt configuration was insensitive to the timing (SAFER HBM ~800 ms, THOR ~750-800 ms, Hybrid ~800 ms). Only for THOR the shoulder belt force maximum of StdB was delayed by ~50 ms compared to both MBPPT configurations.

Shoulder belt force ramp up after MBPPT activation was faster for C_{low} compared to C_{high} . Both MBPPT configurations saturated at their respective shoulder belt force level before AEB activation at 700 ms. SAFER HBM with C_{high} took the longest time to reach static shoulder belt force level. The shoulder belt force level for SAFER HBM showed strong oscillations compared to both ATD. For all three occupants shoulder belt force had the peak after AEB activation, where the used belt configuration was insensitive to the timing (SAFER HBM ~800 ms, THOR ~750-800 ms, Hybrid ~800 ms). Only for THOR the shoulder belt force maximum of StdB was delayed by ~50 ms compared to both MBPPT configurations.

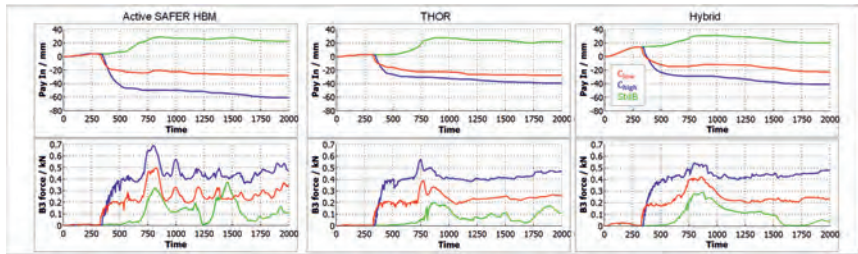


Fig. 4: Belt pay in top, belt force in bottom figure for active SAFER HBM (left) and both ATD THOR (center) and Hybrid (right). Each figure shows C_{low} in red, C_{high} in blue and StdB in green.

The T4 Y-displacement time history data is illustrated in Fig. 5 for active SAFER HBM and the two ATD and the respective belt configurations. The trends for the three occupants were similar, where StdB showed highest T4 Y-displacement followed by C_{low} and C_{high} . For all three occupant models the maximum T4 Y-displacement occurred in a similar time window of ~750 – 800 ms. Both the ATD showed similar T4 Y-displacements for the respective belt configurations, SAFER HBM generally showed the largest T4 Y-displacement.

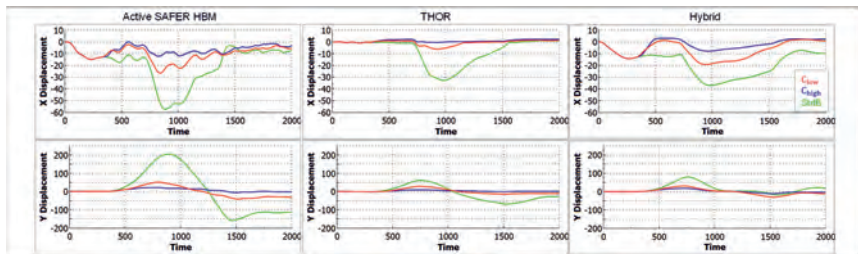


Fig. 5: T4 X- (top) and Y-displacement (bottom) of active SAFER HBM (left) and both ATD THOR (center) and Hybrid (right). Each figure shows C_{low} in red, C_{high} in blue and StdB in green.

Fig. 6 illustrates the selected output of the two MBPPT configuration for SAFER HBM. Most relevant were voltage, current and power, each normalized. Both MBPPT configurations were controlled by electrical power, where the target power was ramped up at 300 ms. C_{high} was not able to directly follow the target power, where C_{low} had a faster response to the target. The current of each configuration saturated at 600 ms for C_{high} and 500 ms for C_{low} . The voltage of both variants saturated at very similar times.

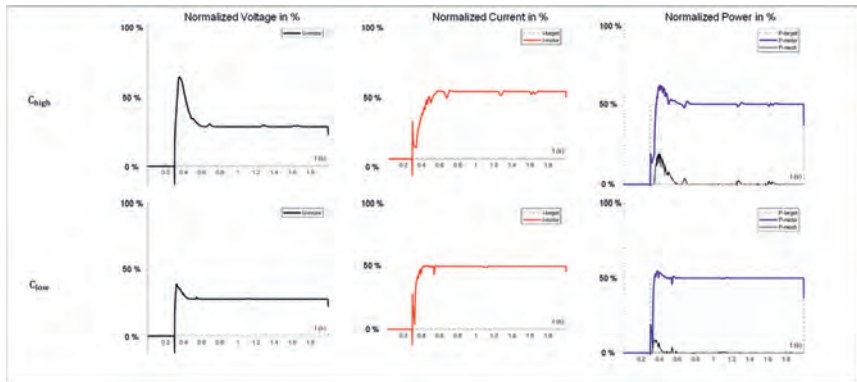


Fig. 6: Voltage, current and power of both MBPPT configuration C_{high} (top), C_{low} (bottom) used for SAFER HBM. The results were normalized for comparison purpose.

From time history data scalar metrics were calculated using the described process in section 2, the resulting values are illustrated in Table 1.

Table 1: Overview of results, extracted from time history data for active SAFER HBM and the two ATD with the respective belt configuration.

Occupant	MBPPT	Y max / mm	X max / mm	Webbing payin before brake onset	Pay in onset after activation / completion time ms	Pay in completion time / ms	Max. Webbing pay in speed / mm/ms	B3 max before 500 ms / N
active SAFER- HBM	C_{High}	21.65	-12.15	-49.85	46.51	261.21	0.88	413.52
	C_{Low}	50.86	-26.57	-24.50	28.51	136.62	1.11	223.13
	StdB	205.15	-57.46	0.00	n.A.	n.A.	n.A.	12.38
THOR	C_{High}	9.17	-0.49	-30.44	46.61	179.82	0.83	403.33
	C_{Low}	28.46	-6.11	-22.17	28.51	97.21	1.12	212.65
	StdB	61.61	-32.84	0.00	n.A.	n.A.	n.A.	10.80
Hybrid	C_{High}	18.09	-7.89	-28.83	46.91	299.10	0.98	407.62
	C_{Low}	31.11	-19.22	-14.81	28.71	264.51	1.20	197.35
	StdB	79.97	-36.91	0.00	n.A.	n.A.	n.A.	26.68

Scalar metrics from Table 1 were used for further trend analysis in scatter plots. Here the respective metric was shown in dependency of the main result of interest: Maximum T4 Y-displacement. Fig. 7 illustrates belt pay in onset after MBPPT activation (left), belt pay in duration (center) and maximum belt pay in speed (right). For the three occupant models both MBPPT configurations as well as the StdB are illustrated. The belt pay in onset trends were similar for the three occupants, C_{high} had ~50 ms onset delay compared to ~30 ms with C_{low} . Belt pay in duration was longer for C_{high} compared to C_{low} . This trend was same for all three occupant models. Belt pay in duration was longest for Hybrid, followed by active SAFER HBM and fastest for THOR. The maximum belt pay in speed trends were similar for the three occupants, C_{high} had ~0.6-1.0 m/s maximum belt pay in speed compared to ~1.2 m/s with C_{low} .

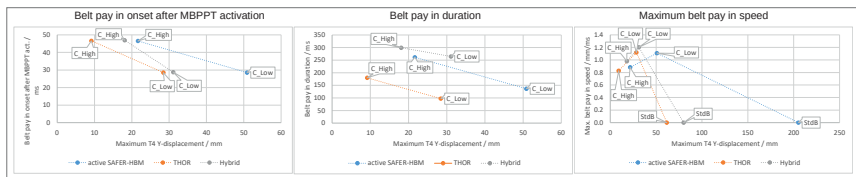


Fig. 7: Belt pay in onset after MBPPT activation (left), belt pay in duration (center) and maximum belt pay in speed (right) illustrated over maximum Y-Displacement of T4 of the active SAFER HBM and two ATD for the three respective belt configurations.

Fig. 8 illustrates maximum belt pay in before AEB activation (left), maximum shoulder belt force before AEB activation (center) and maximum T4 X-displacement (right). Each of the metrics in dependency of maximum T4 Y-displacement. For the three occupant models both MBPPT configuration as well as the StdB are illustrated. Maximum belt pay in trends were very similar for both ATD and the respective MBPPT configurations, C_{high} showed ~30 mm belt pay compared to ~10-15 mm with C_{low} . For SAFER HBM C_{high} showed 45 mm belt pay in compared to 25 mm with C_{low} . The maximum shoulder belt force was very similar for the three occupants. C_{high} showed ~400 N of maximum shoulder belt force compared to ~210 N with C_{low} . Maximum T4 X-displacement showed similar trends for both ATD. C_{high} resulted in very low T4 X- and Y-displacements. C_{low} showed higher X- and Y-displacements, where StdB had highest. The X- and Y-displacements for SAFER HBM and C_{high} were similar to THOR and close to Hybrid and for C_{low} and StdB significantly larger.

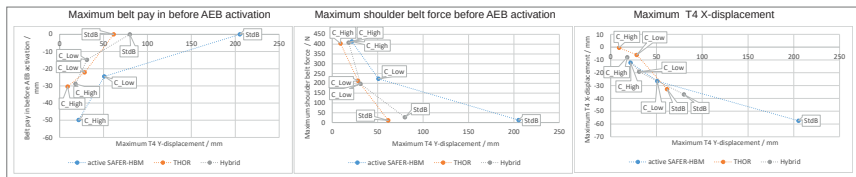


Fig. 8: Maximum belt pay in before AEB activation (left), maximum shoulder belt force (center) and maximum X-Displacement (right) illustrated over maximum Y-displacement of T4 of the active SAFER HBM and two ATD for the three respective belt configurations.

Fig. 9 depicts the occupant posture for StdB at the respective time of maximum T4 Y-displacement. SAFER HBM showed the largest Y-displacement with the belt slipping off the shoulder. Both ATD showed a similar T4 Y-displacement both maintained the shoulder belt on the shoulder. Both ADT showed a body-block rotation of the thorax, where for SAFER HBM the thorax showed a curvature, emerging different spine flexibility between ATD and SAFER HBM.

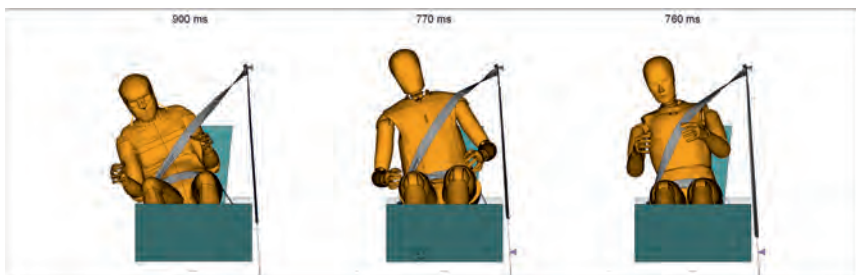


Fig. 9: StdB kinematic behavior of active SAFER HBM (left) and both ATD THOR (center) and Hybrid (right) at the respective time of maximum T4 Y-displacement. For active SAFER HBM the belt was slipping off the shoulder.

4. Discussion

The study compared the occupant kinematics of active SAFER HBM and two ATD (Hybrid and THOR) in the Euro NCAP CCFtap load case. The three occupant models were restrained by two configurations of MBPPT and as a reference with a standard belt without MBPPT. For MBPPT modelling an advanced simulation technology was applied, where

feedback control loop modelling in Matlab/Simulink was coupled to LS-Dyna passive safety environment.

The two configurations supplied to the MBPPT system, affected belt force gradient and time to achieve steady state belt force level and hence, time to complete the belt pay in for all three occupants. Hence, by defining the input parameter of MBPPT (e.g., voltage, current, power, mechanical properties) the output (e.g., force, belt pay in) will depend on current occupant state (e.g., pulse, position, belt slack). This approach ultimately connects mechatronic MBPPT parameter with the seat belt system- and occupant state. This outperforms the method of assumed MBPPT characteristics as in [6] and of predefined and static pre-crash postures where belt and contact forces are not accounted as in [5].

The MBPPT activation was defined to achieve the steady state belt force in both C_{low} and C_{high} configurations before the braking was initiated. The restraining performance might differ if steady state belt force was not achieved. The C_{high} configuration led to the lowest T4 Y-displacements explainable by better restraint coupling with higher belt forces and less belt slack in the system as discussed in [2, 3, 4]. A MBPPT configuration combining higher belt force and a faster force-gradient is believed to improve occupant pre-crash kinematics in CCftap scenario, even further, especially when a steady state belt force cannot be achieved before the occupant starts moving in a lateral direction.

It is to be considered, that both ATD have the T4 location at a similar distance compared to H-Point, where SAFER HBM T4 location is 75 mm higher. As only Y-displacement trajectory was accounted the inhering leverage arm affected the result. Hence, the result investigation using an angular representation of lateral kinematics might give a better base for comparison between ATD and SAFER A-HBM.

In all configurations, the lateral displacement of the SAFER HBM was substantially larger than both ATD, this correlates to the conclusion in [6].

More spine extension in the SAFER HBM during the lateral movement might be due to a better representation of spine geometry and material stiffness compared to the rigid ATDs. This suggests that laboratory investigations of lateral pre-crash displacements using ATD likely underestimate occupant movements.

The results of the current study are only valid to the steel seat and may differ to the production seat due to seat profile, side support and foam compression.

The findings of the study clearly showed the extended challenges and opportunities of the design of passive safety systems through the introduction of ADAS-supported pre-crash sce-

narios. Here, using the example of the turning accident scenario introduced into the Euro NCAP rating and the expanded functional design of the MBPPT.

MBPPT systems address the risks of critical occupant displacement and can be optimally designed in their functional requirements using the presented toolset of coupled simulation models.

This virtual approach to the future system design of restraint components is without alternative: the number of system-relevant parameters increases, the complexity of the scenarios to be expected in the field increases [19] and the occupant's safety demand for the ADAS- or HAD-vehicle will increase significantly [20].

The MBPPT as Human-Machine-Interface (HMI) and primary life saver has a special role to play here.

Intelligent network, sensitive and high-performance mechatronic designs, learning algorithms, anticipation of accident severity and trajectories will provide the options for adaptive and biomechanically optimized responses of the MBPPT. Product characteristics and restraint strategies can be optimally designed for the HMI phases 1) to gain comfort, 2) confidence and sense of value and 3) for the direct pre-crash and crash. Occupant repositioning, adaptive coupling, as well as controlled occupant kinematics, belt forces and belt pay out velocity mitigate the accident loads exposed to the occupants.

5. Conclusion

The coupling of Matlab/Simulink to LS-Dyna solvers was successfully applied to achieve an accurate MBPPT model. The method can be further extended by adding modules for different functions (e.g. vehicle decision making algorithms or vehicle dynamics). This software-in-the-loop method can then directly feed information from vehicle network during different stages of driving to the design parameters of MBPPT for evaluating the effects on occupant kinematics. This approach can be applied to a broader spectrum of scenarios for further optimizing the restraint system and finally enabling virtual testing.

The coupled simulation increased the computation time compared to an uncoupled simulation by 10 %. The total wall clock time of the 2 s simulation time was 22 hours on 48 cores using a single-precision approach where 3'200'000 cycles were calculated. This is exceeding the recommendation of [21] where double-precision is recommended for ~200'000 cycles, even further increasing computation times, in this case by factor four. Hence, further improvement of computational efficiency is required.

The MBPPT system improved restraint performance over the StdB in the CCFTap scenario as it restricted lateral displacement and held the occupant models in near upright posture. The MBPPT in C_{high} configuration restricted motion more than the C_{low} configuration. The active SAFER-HBM showed larger Y-displacements for all belt configurations compared to both ATDs. This is identifying the limited suitability of both ATD for low speed pre-crash analysis if lateral kinematics are of concern.

References

- [1] Euro NCAP Test Protocol – AEB Car-to-Car Systems
<https://cdn.euroncap.com/media/56143/euro-ncap-aeb-c2c-test-protocol-v302.pdf>
- [2] Ghazaleh Ghaffari, Karin Brolin, Dan Bråse, Bengt Pipkorn, Bo Svanberg, Lotta Jakobsson and Johan Davidsson: Passenger kinematics in Lane change and Lane change with Braking Manoeuvres using two belt configurations: standard and reversible pre-pretensioner, IRCOBI conference 2018
- [3] Christine Holt, Ethan Douglas., Valentina Graci, Thomas Seacrist, Jason Kerrigan, Richard Kent, Sriram Balasubramanian, Kristy Arbogast: *Effect of Countermeasures on Adult Kinematics during Pre-Crash Evasive Swerving*, IRCOBI conference 2018
- [4] John-Paul Donlon, Rachel Richardson, Mohan Jayathirtha, Jason Forman, Jason Kerrigan, Richard Kent, Kristy B. Arbogast, Vivek Maripudi & Mike Scavnick: *Kinematics of inboard-leaning occupants in frontal Impacts*, Traffic Injury Prevention 2020
- [5] Kyle Boylea, Abeselom Fantaa, Matthew P. Reeda, Kurt Fischerb, Alex Smithb, Angelo Adlerb, and Jingwen Hu: *Restraint systems considering occupant diversity and pre-crash posture*, Traffic Injury Prevention 2021
- [6] Bengt Pipkorn, Jacob Wass: Pre-Crash triggered pretensioning of the seat belt for improved safety. 25th ESV Conference
- [7] Charlotte Keisser, Isheng Yeh: *Control System in LS-DYNA*, 11th European LS-DYNA Conference 2017
- [8] Charlotte Keisser, Isheng Yeh: *Control System*, German LS-DYNA Forum 2016
- [9] Stefan Schilling, Anurag Soni, Heiko Hinrichs, Christian Verheyen, Martin Grikschat, Burkhard Eickhoff, Andreas Lucht, Alexandru Cirstea: *Coupling feed-back control loop-based model in Simulink to finite element model in LS-Dyna: Application to reposition forward leaning occupant to upright posture*, European LS-DYNA Forum 2021

- [10] Jóna M. Ólafsdóttir, Jonas K. H. Östh, Johan Davidsson, Karin B. Brolin: Passenger Kinematics and Muscle Responses in Autonomous Braking Events with Standard and Reversible Pre-tensioned Restraints, IRCOBI Conference 2013
- [11] Behr M, Poumarat G, et al., Posture and muscular behaviour in emergency braking: An experimental approach, Accident Analysis and Prevention, 2010, vol. 42, no. 3, pp. 797–801
- [12] Ejima S, Zama Y, Satou F, Holcombe S, Prediction of the physical motion of the human body based on muscle activity during pre-impact braking, Preceedings of IRCOBI Conference, 2008, Bern, Switzerland, pp.163–175.
- [13] Jonas Östh, Karin Brolin, Dan Bråse (2015) A Human Body Model With Active Muscles for Simulation of Pretensioned Restraints in Autonomous Braking Interventions, Traffic Injury Prevention, 16:3, 304-313, DOI: 10.1080/15389588.2014.931949
- [14] Ólafsdóttir, J.M., Östh, J., Brolin, K. Modelling Reflex Recruitment of Neck Muscles in a Finite Element Human Body Model for Simulating Omnidirectional Head Kinematics. Proceedings of IRCOBI, 2019. Florence (Italy)
- [15] Emma Larsson, Johan Iraeus, Jason Fice, Bengt Pipkorn, Lotta Jakobsson, Erik Brynskog, Karin Brolin, Johan Davidsson: Active Human Body Model Predictions Compared to Volunteer Response in Experiments with Braking, Lane Change, and Combined Manoeuvres, IRCOBI Conference 2019
- [16] Merete Östmann, Lotta Jakobsson: An Examination of Pre-crash Braking Influence on Occupant Crash Response using an Active Human Body Model, IROBI Conference 2016
- [17] Ekant Mishra, Aarti Ranmal, Nils Lubbe. The Effect of Pre-Crash Braking on Thoracic Injuries in Frontal Impacts. Proceedings of IRCOBI Asia Conference, 2021.
- [18] NHTSA, Revised THOR 50th Percentile Male Dummy Seating Procedure, 2019
- [19] Martin Östling, Hanna Jeppsson, Nils Lübke: Predicted crash configurations for Autonomous Driving vehicles in mixed German traffic for the evaluation of occupant restraint system, VDI Fahrzeugsicherheit 2019
- [20] Unselt, T., Schoneburg, R., Bakker, J.: Occupant and Partner Protection under the Circumstances of the Introduction of autonomous Vehicle Systems, 9. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit 2013
- [21] LS Dyna "HowTos" in "General / Double precision"
<https://www.dynasupport.com/howtos/general/double-precision>, 02.07.2021

Schnelle Abschätzung des Crashverhaltens von Insassen unter Berücksichtigung der Vielfalt des Menschen: Robustheit, Datenintensität und Vorhersagekraft von Metamodellen

Franz Plaschkies, M.Sc., Prof. **Ondřej Vaculín**, Ph. D.,
Angelo A. Pelisson, M.Sc.,
Technische Hochschule Ingolstadt;
Prof. Dr.-Ing. **Axel Schumacher**,
Bergische Universität Wuppertal

Zusammenfassung

Die Entwicklung von Systemen zum Schutz von Fahrzeuginsassen erfolgt auf Basis einiger weniger ausgewählter Körperformen. Demgegenüber stehen die vielfältigen Variationen des menschlichen Körpers. Daraus motivieren sich Bestrebungen, Werkzeuge zu entwickeln, um diese Abweichungen während der Fahrzeugentwicklung zu berücksichtigen. Es werden ein Ansatz zur Unterstützung einer robusten Entwicklung vorgestellt und dafür Kosten- und Nutzenfaktoren aufgestellt. Ein Schema zur Bewertung der Methodik wird diskutiert.

Abstract

The development of systems for the vehicle occupant protection is based on a few selected body shapes, in contrast to the broad variations of the human body. The discrepancy motivates efforts to develop tools taking these variations during vehicle development into account. An approach supporting robust development is presented and analyzed concerning cost and benefit factors. Finally, a scheme for evaluating the methodology is discussed.

1 Einleitung und Motivation

Ein zentraler Aspekt bei der Entwicklung von Systemen der Fahrzeugsicherheit ist das Testen. Im Bereich der passiven Sicherheit wird neben klassischen Crashtests auch virtuell mittels Finiter Elemente Analyse (FEA) oder Mehrkörpersimulation (MKS) geprüft. Es werden digitale Modelle von Fahrzeug und Crashtest-Dummy in der Testsituation gebildet. Ergänzend werden auch Menschmodelle verwendet. Dummies sind Messmittel, deren Verhalten dem Menschen entsprechen sollen. Sie existieren in verschiedenen biofidelen Stufen. Menschmodelle sind rein virtuelle, normalerweise hochdetaillierte Modelle. Die

Geometrie dieser Modelle wird durch CT-Scans eines Körpers, der einem festgelegten Perzentil einer Bevölkerung entspricht, ermittelt. Die Charakterisierung und Validierung erfolgt anhand von Kadaverversuchen. Zunehmende Akzeptanz erfährt die virtuelle Entwicklung durch das enorme Einsparpotenzial und die hohe Flexibilität bei der Systemauslegung durch die Zulassung von Menschmodellen zur Euro NCAP-Bewertung im Fußgängerschutz [1] und durch die Kommentare der NHTSA in [2] zur Verwendung von Menschmodellen. Aufbau, Berechnung und Auswertung solcher Modelle bergen viele Fehlerquellen und müssen sehr sorgfältig durchgeführt werden. Im Projekt OSCCAR, vorgestellt beispielsweise durch Eggers et al. in [3], wird eine Methodik entwickelt, durch die Zertifizierung von Fahrzeugumgebung und Menschmodell das Vertrauen in virtuelles Testen zu erhöhen, um es in Zukunft auch für Zulassungen oder Verbraucherschutzbewertungen nutzen zu können.

Trotz zunehmender Nutzung virtueller Methoden werden Rückhaltesysteme von Fahrzeugen noch immer auf die Grenzwerte aus Gesetz und Verbraucherschutz für die Messungen mit dem jeweils festgelegten Crashtest-Dummy optimiert. Diese Dummies spiegeln nur sehr spezifische Perzentile einer bestimmten Population wider. Im Beispiel der im Insassenschutz für den frontalen Aufprall vorrangig verwendeten Hybrid III-Familie (HIII) gehen die 5 % Frau, der 50 % Mann und der 95 % Mann auf die aus der Population Nordamerikas in den 1970er-Jahren gebildeten Perzentile zurück [4]. In

Bild 1 sind Beispiele für regionale und zeitliche Veränderungen der menschlichen Populationen dargestellt. In Nordamerika hat sich das Gewicht aller Gruppen von den 1970er-Jahren zu den 2000ern deutlich erhöht. Dagegen ist die hier durch Malaysia repräsentierte ostasiatische Bevölkerung generell signifikant kleiner und leichter. Die in Europa relevanten Vorgaben für den frontalen Insassenschutz der ersten Sitzreihe von M1 Fahrzeugen (UN R95, UN R137, Euro NCAP) schreiben aktuell nur die Prüfung mit der HIII 5 % Frau und dem HIII beziehungsweise THOR 50 % Mann vor. Eine Verschiebung der Perzentile in einer Population bedeutet, dass die Bereiche des optimalen Schutzes um die Auslegungsperzentile nun einen geringeren Anteil der Bevölkerung abdecken.

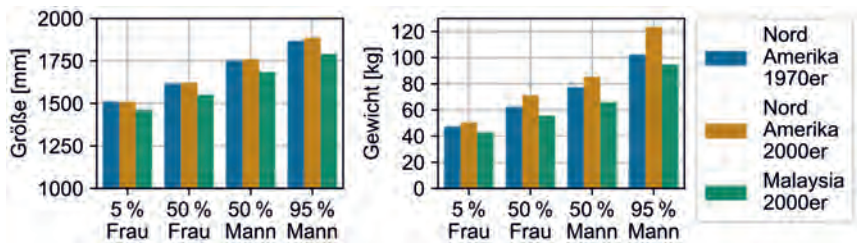


Bild 1: Vergleich verschiedener Populationen bezüglich Größe und Gewicht, nach [5 bis 8]

Für eine schnelle und ökonomisch sinnvolle Vorhersage zur Auswirkung verschiedener Ausprägungen des menschlichen Körpers in einem Fahrzeugcrash könnten aufwendige, physikbasierte FEA-Simulationen durch schnelle, datenbasierte Vorhersagemodelle – sogenannte Metamodelle – teilweise ersetzt werden, z. B. [9]. Die schnelle Vorhersage kann beispielsweise von einer Simulation mit einem Insassen in einer Körperausprägung zu einer anderen Anthropometrie erfolgen. Dies kann innerhalb einer Dummy- oder Menschmodell-Familie geschehen. Ein weiterer Ansatz ist es, basierend auf Ergebnissen mit einem Dummy Vorhersagen von Ergebnissen des detaillierten Menschmodells zu erzeugen. Eine besondere Herausforderung für die Erstellung von Metamodellen in der Domäne sind die auftretenden Nicht-Linearitäten in einem Crashverlauf. Zudem ist die Größe der zu erstellenden Datenbank insbesondere bei der Verwendung von detaillierten FEA-Modellen durch deren Rechenzeit limitiert.

2 Vorstellung der Methodik

2.1 Grundidee

Im vorgestellten Konzept werden die Variationen in die des menschlichen Körpers und die der Fahrzeugumgebung aufgeteilt. Die Variation der Anthropometrie ist entweder als eine gesamtheitliche Betrachtung analog zu den Dummy-Perzentilen oder als Variation einzelner Körperteile, wie sie beispielsweise von Hu et al. in [10] am Menschmodell GHBM vorgeschlagen wird, vorgesehen. Unter der Variation des Fahrzeuges sind die für den Insassenschutz relevanten Eigenschaften der Karosserie, des Interieurs und des Rückhaltesystems zu verstehen. Durch verschiedene Fahrzeugklassen, Derivate, Ausstattungsvarianten und Entwicklungsstände entstehen unterschiedliche Crashpulse in nominell denselben Unfallszenarien. Änderungen im Interieur können die Kinematik des Insassen im Crash und die Anordnung der Rückhaltesysteme beeinflussen. Die

Konfiguration des Rückhaltesystems ist zusammen mit der Auslegung der Crashstruktur der zentrale Bereich für die Absicherung der Insassen. Die Auswirkung solcher Änderungen sind nicht immer abzusehen und somit nicht vorab durch einen Parameter abbildbar. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch eine Einflussanalyse bestimmte relevante Variablen (Charakterisierungen der Fahrzeugumgebung) bei geänderten Komponenten noch korrekt sind. Ein Beispiel sind neue Komponenten wie einst die Einführung von Front-Airbags aufgrund sich ändernder Anforderungen. Solche Entwicklungen haben signifikanten Einfluss auf die Lastpfade, die Insassenkinematik und auf die Verletzungsmuster. Metamodelle liefern jedoch nur valide Aussagen, wenn:

- a) die zur Gesamtvariation führenden relevanten Parameter bekannt sind und
- b) diese Parameter im Bereich der Trainings-Variation liegen.

Um trotzdem eine möglichst langlebige Prognosefähigkeit zu erreichen, wird der Ansatz verfolgt, anstatt der expliziten Definition der Umgebungsparameter, diese Information implizit in Form von Kalibrierungsdaten als Simulationsergebnis eines Insassen mit einer Referenzanthropometrie in der jeweiligen Umgebung zur Verfügung zu stellen.

In Bild 2 ist für das Konzept der Datenfluss und die allgemeine Systemarchitektur dargestellt. Es handelt sich um eine Architektur des überwachten Lernens. Das heißt, dass während des Trainings Modelleingang und das vorherzusagende Ergebnis bekannt sind. Das Metamodell wird durch die Anpassung seiner Vorhersagen an das wahre Ergebnis trainiert.

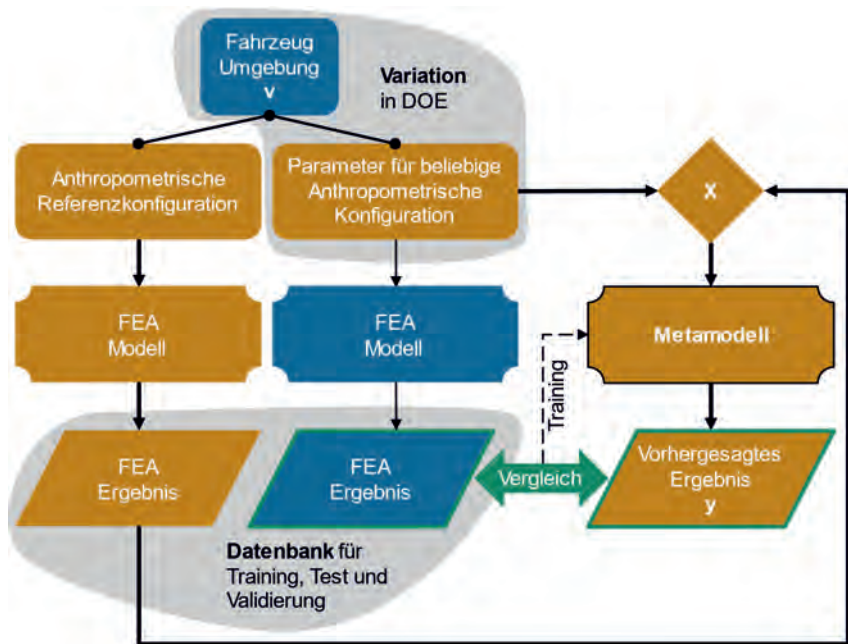


Bild 2: Datenfluss und Architektur für das Modelltraining und die Anwendung

Im ersten Schritt werden Daten mittels FEA erzeugt. Der Versuchsplan – ein *Design of Experiments* (DOE) – beinhaltet wie oben beschrieben die Variation der Anthropometrie und die des Fahrzeugs. Die Referenzanthropometrie muss in jeder Version der Umgebung vorkommen, um sie später für die Kalibrierung des Metamodells auf die jeweilige Fahrzeugumgebung verwenden zu können. Die anthropometrischen Parameter und die Ergebnisse eines jeden Versuchs werden in einer Datenbank gespeichert. Die Beschreibung der Anthropometrie des Insassen in einer FEA-Simulation in einer bestimmten Version v der Fahrzeugumgebung und das Ergebnis der FEA-Simulation mit der Insassen-Referenzanthropometrie in derselben Umgebung sind der Modelleingang X (Features) des Metamodells. Es sind relevante Informationen y (Targets) über den Insassen mit der aktuellen Eingangsanthropometrie vorherzusagen. Die Art der Simulationsergebnisse in X beziehungsweise y sind grundsätzlich voneinander unabhängig. Beide können sowohl ganze Zeitreihen (z. B. Kopfbeschleunigung) als auch einzelne Werte wie das *Head Injury Criterion* (HIC) oder auch nur die Klassifikation bezüglich Kritikalität enthalten.

Um die Vorhersagegüte des Metamodells zu bewerten, können grundsätzlich Metriken für die Regressions- (z. B. mittlere quadratische Abweichung, Bestimmtheitsmaß R^2) oder Klassifikationsgüte (z. B. Sensitivität) verwendet werden. Um eine Aussage zum *Overfitting* des Metamodells zu treffen, wird üblicherweise die Datenbasis in einen Trainings- und einen Test- sowie gegebenenfalls einen Validierungsdatensatz aufgeteilt. Mit diesem Ansatz kann jedoch erst einmal nur die Gesamtleistung über alle Fahrzeugumgebungen bewertet werden. Um auch die Robustheit des Metamodells gegenüber der Variation des Fahrzeugs auszuwerten, müssen die erzeugten Fahrzeugvarianten charakterisiert werden. Der Ansatz ist dafür die Verletzungsschwere des Insassen mit der Referenzanthropometrie in der jeweiligen Simulation zu verwenden. Durch die Charakterisierung können die Umgebungen dann in Interpolations- und Extrapolationsbereiche aufgeteilt werden.

2.2 Darstellung der Grundidee anhand eines generischen, analytischen Beispiels

In dem abstrakten Beispiel wurde ein linearer Zusammenhang zwischen einer skalaren Vorhersagegröße y und der kontinuierlichen skalaren Variation X auf der diskreten Variation von v definiert. Durch die Variation v entstehen parallel verschobene Geraden mit der Laufnummer i . Gleichung (1) beschreibt die gewählte Bildungsvorschrift der Strecken:

$$y = 0,5 * X + 20 * (i - 1); i \in \mathbb{N}; X, y \in \mathbb{R}, 0 \leq X \leq 100. \quad (1)$$

Werden nun sieben solcher Strecken definiert, so können, wie in Bild 3 dargestellt, drei Strecken für das Training und das Testen eines Metamodells, zwei dazwischen liegende Strecken für die Bewertung der Interpolationsgüte und zwei außerhalb liegende Strecken für die Bewertung der Extrapolationsgüte genutzt werden. Daten für den Test und die Inter- und Extrapolation werden lediglich für die Überprüfung des Metamodells verwendet, nicht für das Training selbst. Der Datensatz besteht aus Punkten auf den Linien. Die Referenzkonfiguration ist der Mittelpunkt jeder Strecke. Um auch *Overfitting* bewerten zu können, wird jedes berechnete y mit einem zufälligen Offset im Intervall von ± 5 versehen. Auf den vier Validierungsstrecken wurden jeweils 100 Punkte mit gleichem Abstand im Intervall von X erstellt. Die Anzahl an Punkten auf den drei Trainings-/Testlinien ist variabel. Von den drei Linien wurden 70 % der Punkte zufällig für das Training ausgewählt und die restlichen Punkte für den Test vorbehalten.

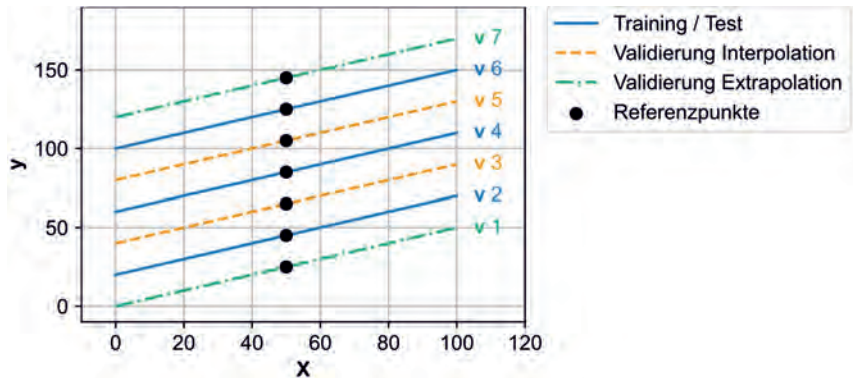


Bild 3: Konzept Inter- und Extrapolation mit sieben parallelen Linien

Es wurden verschiedene Regressionsverfahren und der Einfluss der Anzahl der Trainingspunkte untersucht. Zur Umsetzung diente die Programmiersprache *Python* 3.8 mit dem Modul *scikit-learn* 0.24 [11]. Es wurden nur Regressionsmethoden innerhalb *scikit-learn* mit ihren Default-Hyperparametern verglichen. Da sich die Daten auf ähnlichen Skalen bewegen, wurde auf eine Normierung verzichtet. Der erstellte Quellcode und die generierte Datenbasis sind unter [12] zugänglich. In Bild 4 sind die Vorhersagen auf den sieben Linien bei ca. 2.000 Trainingspunkten dargestellt. Sowohl auf *Decision Trees* basierende Methoden als auch die *Support Vector Machine* (SVM) können die parallelen Strecken auf Basis der gegebenen Referenzpunkte nicht abbilden. Das *Deep Neural Network* (DNN) scheint das Konzept zu erlernen und hinreichend zu verallgemeinern.

Zur Bewertung der Prognosegüte wurde R^2 (beste Bewertung ist 1,0) aufgrund seiner einfachen Interpretierbarkeit ausgewählt. In Bild 5 ist für das DNN R^2 links über v und rechts über die Anzahl an Datenpunkten im Training dargestellt. Zur Orientierung wurde R^2 von 0,8 als Mindestbewertung eingezeichnet. Im linken Diagramm ist R^2 für die sieben Linien im Test beziehungsweise Validierungsfall für verschiedene Datenbankgrößen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass insbesondere für die Abbildung der Extrapolation sehr viele Datenpunkte benötigt werden. Im rechten Diagramm ist R^2 über die Anzahl an Trainingspunkten für Vorhersagen mit dem Trainings-, Test- und Validierungsdatensatz dargestellt. Mit zunehmender Anzahl an Trainingspunkten verbessert sich erwartungsgemäß die Vorhersagegüte und die Robustheit. Das Metamodell verallgemeinert die Strecken mit Streuung zu einem linearen Zusammenhang (Bild 4) – es findet also kein *Overfitting* statt.

Dafür kann aber keine 1,0 Bewertung erreicht werden. Die Verallgemeinerung auf eine Gerade führt zwangsläufig zu einem Fehler gegenüber der Streuung der Daten.

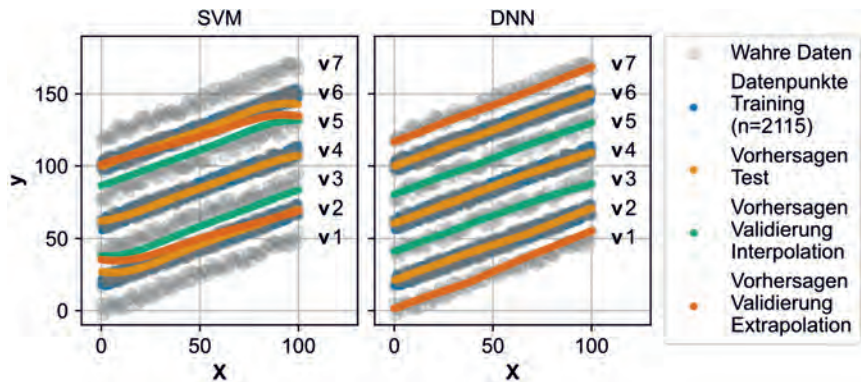


Bild 4: Vorhersagen für SVM und DNN

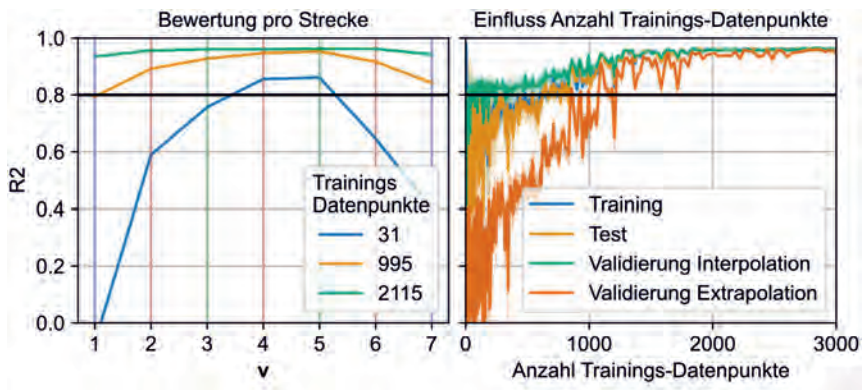


Bild 5: R^2 über die verschiedenen Linien für das Deep Neural Network

Natürlich ist der Sachverhalt in der Anwendungsdomäne Insassensicherheit wesentlich komplexer als parallele Geraden. Verschiedene Unfallszenarien, die Innenraumgestaltung und Rückhaltesysteme führen zu nicht-linearen Systemen. Zudem unterliegen numerische Simulationen einer gewissen Streuung, die teils zu nicht nutzbaren Ergebnissen führt. Um die Daten für maschinelles Lernen zu verwenden, müssen Kriterien definiert werden, mithilfe derer fehlerhafte Versuche effektiv herausgefiltert werden können.

3 Aufstellung von Kosten- und Nutzenfaktoren

Mit Tabelle 1 sollen die Kosten und Nutzenfaktoren bewertet werden. Die einzelnen Kriterien sollen gewichtet zu einer Gesamtbewertung führen.

Tabelle 1: Vorschlag für Kriterien zur Gesamtbewertung

Nr.	Bezeichnung	Kriterium / Bewertung
1	Prognosegüte	Durchschnittsbewertung (s. Bild 6) Kontinuierlich, höher ist besser
2	Wert Vorherhersage Anthropometrie	Schulnoten (1 Beste) 6 – Keine Vorhersage 5 – Ein Perzentil 4 – Zwei Perzentile 3 – Drei-Vier Perzentile 2 – Mehr als 5 Perzentile 1 – Einzelne Eigenschaften
3	Wert Vorherhersage Detailgrad	Schulnoten (1 Beste) 6 – Keine Vorhersage 5 – Binäre Klassifikation 4 – Drei Klassen 3 – Mehr als 3 Klassen 2 – Kontinuierliche Werte 1 – Zeitreihen
4	Geschwindigkeitsvorteil zu FEA	Kontinuierlich; Höher ist besser
5	Robustheit gegen Änderung der Fahrzeugumgebung	Schulnoten für Breite des zulässigen Extrapolationsbereichs
6	Erstellungsaufwand parametrisiertes Dummy-Modell	Schulnoten (kurz, 1 Beste) 1 – Existierende Familie 2 – Perzentil-Interpolation 3 – Segment-Skalierung
7	Erstellungsaufwand (parametrisierte) Fahrzeugvariante(n)	Schulnoten (kurz, 1 Beste) 1 – Existierende Fahrzeuge 2 – Nachträgliche Parametrisierung 3 – Neue Modelle
8	CPU-Rechenzeit für gesamte DOE	Kontinuierlich; Geringer ist besser
9	CPU-Rechenzeit für Kalibrierungssimulation(en)	Kontinuierlich Geringer ist besser
10	Kosten für erneutes Training	Schulnoten (kurz, 1 Beste) 3 – DOE erneut vollständig 2 – Reduzierte DOE 1 – Keine neue DOE notwendig

Der Wert einer einzelnen Vorhersage wird durch die Validität der Aussage sowie deren Detailgrad bestimmt. Die Validität kann durch die oben beschriebene Methodik zur Einteilung der Fahrzeugumgebungen in Interpolations- und Extrapolationsbereiche quantifiziert werden. Die Metrik wird für den gesamten zulässigen Bereich wie in Bild 6 dargestellt gemittelt. Weitere Kriterien sind die Detailgrade der abgebildeten Varianz der Anthropometrie und der Vorhersagen durch das Metamodell. Die Robustheit des Modells gegenüber den Änderungen der Fahrzeugumgebung bestimmt maßgeblich den Nutzen. Sind Vorhersagen nur für genau die trainierten Umgebungen zulässig, ist die Anwendung natürlich stark eingeschränkt. Kann jedoch durch die Eingabe ein oder mehrerer Kalibrierungsversuche die Anwendung auf unterschiedliche Fahrzeugentwicklungsstände, Derivate oder gar Fahrzeugklassen aufgeweitet werden, so wäre der Wert hoch. Die Bewertung kann, wie in Bild 6 skizziert, über die Größe des zulässigen Bereichs erfolgen.

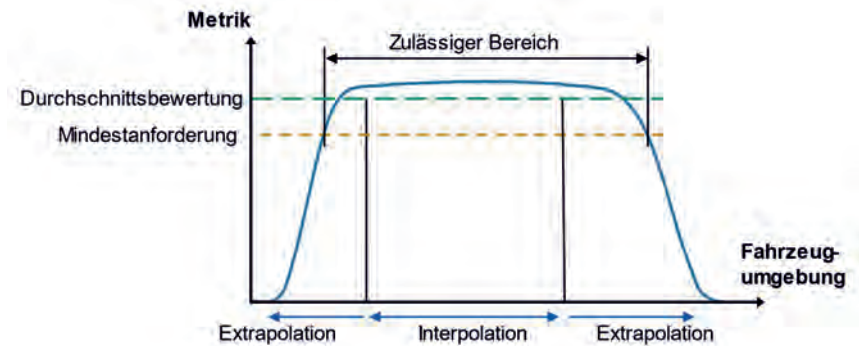


Bild 6: Schematische Darstellung zur Berechnung der Prognosegüte

Die Kosten des Metamodells werden maßgeblich durch die Anzahl der benötigten Versuche bestimmt. Versuche müssen zum einen zum Erstellen des Metamodells durchgeführt werden. Zum anderen fallen durch das Kalibrierungskonzept für jede Vorhersage weitere Simulationen an. Neben der CPU-Zeit für die Simulationen muss auch der stark erhöhte Aufwand zur Erstellung eines hinreichend parametrisierten FEA-Modells und der dazugehörigen Werkzeuge berücksichtigt werden. Die CPU-Kosten für Training und Vorhersagen sind bei Metamodellen dieser Größe in der Regel vernachlässigbar.

4 Simulationspläne – Optionen und Bewertung

Beim Aufbau eines zum Konzept passenden Simulationsplans wird zwischen der Variation der Anthropometrie und der des Fahrzeugs unterschieden. Grundsätzlich sollten nur voneinander unabhängige Parameter variiert werden. In dieser Konstellation können DOE mit verschiedenen Schwerpunkten erzeugt werden. Wichtig ist, dass die Anthropometrie der Kalibrierungskonfiguration im Plan vorkommt. Ein DOE muss die Randbedingungen des FEA-Modells berücksichtigen. Ein typischer Ansatz ist es, zunächst eine Crash-Simulation auszuführen, bei der Insassen und Interieur nur als Massen berücksichtigt werden. Die so erzeugte Bewegung wird dann auf ein Detailmodell der Fahrgastzelle übertragen. Parameter wie Aufprallgeschwindigkeit, Kraftniveau des Gurtkraftbegrenzers oder die Größe der Abströmöffnung eines Frontairbags können kontinuierlich variiert werden. Dagegen sind Parameter wie Sitzhersteller und Gasgenerator diskrete Eingangsgrößen und eventuell nicht quantifizierbar. Hier muss beispielsweise mit Variantennummern gearbeitet werden.

Eine Möglichkeit ist es, alle kontinuierlich variierbare Parameter gleichzeitig zu betrachten und das *Latin Hypercube* (LHC) Verfahren anzuwenden. Vorteil dieses Zufallsverfahrens ist die Vermeidung von Scheinvariationen, da sich keine Parametereinstellung doppelt. Weil alle Parameter zufällig miteinander kombiniert werden, kann die Kalibrierungsanthropometrie nicht direkt berücksichtigt werden. Daher muss der gesamte Versuchsplan (einmalige Fahrzeugumgebungen) nochmals mit dem Insassen in der Referenzanthropometrie ausgeführt werden. Auch für diskrete Parameter muss jede Einstellung des LHCs wiederholt werden. Der Umfang S einer solchen DOE hängt von der Größe S_{LH} des LHCs, der Anzahl R der Referenzgeometrien sowie der Anzahl P an diskreten Parametern ab. Wie Gleichung (2) zeigt, kann in dieser Konstellation der Testumfang schnell sehr umfangreich werden:

$$S = S_{LH} * (R + 1) * P. \quad (2)$$

Alternativ können beide Variationen aufgetrennt werden. Auf der einen Seite steht der Versuchsplan für die Fahrzeugumgebung mit der Größe S_F und auf der anderen Seite die Variation der Anthropometrie mit dem Umfang S_A . Jede Variante der Anthropometrie muss in jeder Fahrzeugvariante berechnet werden, was auf Gleichung (3) führt:

$$S = S_A * S_F. \quad (3)$$

Der Vorteil ist, dass passgenau auf die Modelleigenschaften von Insassen und Fahrzeug eingegangen werden kann. Die Variante zweier unabhängiger DOEs scheint daher vorteilhaft. Es ist davon auszugehen, dass mit einer größeren Vielfalt der Fahrzeugvarianten auch die Robustheit des Metamodells steigt. Gleichzeitig steigt der Wert jeder Vorhersage dieses Modells, je detaillierter die Parameter der Anthropometrie gewählt werden.

5 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Es wurde eine Methodik dargestellt, die aufwendige FEA-Simulationen teilweise durch schnelle Vorhersagen mittels eines Metamodells ersetzt, um so während der Fahrzeugentwicklung die anthropometrische Vielfalt des Menschen berücksichtigen zu können. Für die Methodik wurde ein Bewertungskonzept definiert und Kosten- / Nutzenfaktoren aufgestellt. Die gewählte Architektur ist ein überwachtes Lernverfahren. Mittels Kalibrierung auf die jeweilige Fahrzeugumgebung soll eine möglichst hohe Langlebigkeit des trainierten Metamodells erzeugt werden. In einem Test mit stark vereinfachten, generischen Daten konnte gezeigt werden, dass *Deep Neural Networks* grundsätzlich in der Lage sind, das Konzept der Kalibrierung abzubilden. Es müssen Daten aus Insassensimulationen erzeugt werden, um dies zu verifizieren.

Wichtigste Nutzenfaktoren sind die Prognosegüte und deren Stabilität gegenüber Änderungen in der Fahrzeugumgebung. Der wohl größte Kostenfaktor entsteht bei dem Aufbau der Datenbank zum Training und Testen des Metamodells. Signifikante laufende Kosten sind durch die Notwendigkeit von Kalibrierungsdaten für jede Vorhersage zu berücksichtigen. Das Konzept zur Bewertung der Modellrobustheit durch die Definition von Inter- und Extrapolationsbereichen bedeutet einen erheblichen, zusätzlich zum traditionellen Trainieren und Testen kommenden Mehrbedarf an Daten. Die separate Betrachtung von anthropometrischer Variation und der Variation der Fahrzeugumgebung in einer DOE scheint eine gute Möglichkeit zu sein, möglichst effizient Daten zu generieren.

In der nachfolgenden Arbeit muss Methodik, Systemarchitektur und Bewertungsschema anhand von tatsächlichen Daten erprobt werden. Dafür ist es notwendig, zunächst entsprechend parametrisierte Modelle zu erzeugen. In Publikationen wurden Menschmodelle auf Zielgeometrien transformiert. Eine interessante Alternative dazu ist die Anwendung der Methodik auf Crashtest-Dummies. Hier kann durch die existierenden 5 %, 50 % und 95 % Perzentile eine Verifizierung der Daten an Hardware Crashversuchen erfolgen.

Literaturangaben

- [1] Euro NCAP: Pedestrian Human Model Certification. TB 024, 2017.
- [2] NHTSA: AUTOMATED DRIVING SYSTEMS 2.0. A Vision for Safety, 2017.
https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/13069a-ads2.0_090617_v9a_tag.pdf, abgerufen am: 26.01.2021.
- [3] Eggers, A., Ott, J., Schießler, M., Peldschus, S.: How to consider test scatter for model validation in a Virtual Testing procedure (Part 1), automotive CAE Grand Challenge 2021. Hanau, Germany 2021.
- [4] Schneider, L. W.: Development of anthropometrically based design specifications for an advanced adult anthropomorphic dummy family. Volume 1, UMTRI-83-53-1, 1983.
- [5] Plaschkies, F., Vaculin, O., Schumacher, A.: Assessment of the Influence of Human Body Diversity on Passive Safety Systems. A State-of-the-art Overview. FISITA Web Congress. 2021.
- [6] Reed, M. P., Ebert, S. M.: The Seated Soldier Study: Posture and Body Shape in Vehicle Seats, Technical Report, UMTRI-2013-13, 2013.
- [7] Reed, M. P., Rupp, J. D.: An anthropometric comparison of current ATDs with the U.S. adult population, Traffic Injury Prevention 14 (2013) 7, S. 703–705.
- [8] Rahman, N. I., Dawal, S. Z., Yusoff, N., Kamil, N. S.: Anthropometric measurements among four Asian countries in designing sitting and standing workstations, Sādhanā 43 (2018) 10, S. 1–9.
- [9] Plaschkies, F., Vaculin, O.: Estimation of the Impact of Human Body Variation on its Crash Behavior Using Machine Learning Methods. FISITA Web Congress. 2020.
- [10] Hu, J., Zhang, K., Reed, M. P., Wang, J.-T., Neal, M. O., Lin, C.-H.: Frontal crash simulations using parametric human models representing a diverse population, Traffic Injury Prevention 20 (2019) sup1, 97-105.
- [11] Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Verleysen, M., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., Duchesnay, E.: Scikit-learn: Machine Learning in Python, Journal of Machine Learning Research 12 (2011), S. 2825–2830.
- [12] Plaschkies, F.: Minimal Demonstrator Calibrator Learning, [Quellcode], 2021. <https://car-gitlab.rz.fh-ingolstadt.de/-/snippets/2>, abgerufen am: 19.10.2021.

Highly immersive driving simulator for scenario based testing of automated driving functions

Prof. Dr.-Ing. **G. Prokop**, Dr.-Ing. **Th. Tüschen**,
Technische Universität Dresden;
Dipl.-Ing. **N. Eisenköck**,
AMST-Systemtechnik GmbH, Ranshofen, Österreich;
Dipl.-Ing. **J. Bönninger**,
FSD Fahrzeugsystemdaten GmbH, Dresden

Zusammenfassung

Die Absicherung automatisierter Fahrfunktionen (SAE Level 2 bis Level 4) muss künftig szenarienbasiert erfolgen. Die simulations- und testbasierten Methoden erfordern neuartige Werkzeuge, insbesondere Fahrsimulatoren. Heute gebräuchliche Schienen- und Hexapod-basierte Fahrsimulatoren bieten für viele Szenarien keine ausreichenden Bewegungsräume für realistische Bewegungsdarstellung. Ein selbstfahrender Fahrsimulator verbindet die Vorteile großer Bewegungsräume mit hoher Bewegungsdynamik. Damit werden die Störr Wahrnehmungen in allen Raumrichtungen bis unter die menschlichen Wahrnehmungsschwellen reduziert. Die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle kann methodisch und systematisch erfolgen. Für Homologation und technische Überwachung werden daraus Anforderungen abgeleitet. Forschungsseitig wird die Entwicklung menschlicher Verhaltensmodelle vorangetrieben. Außerdem entstehen neue Möglichkeiten der Eigenschaftsobjektivierung in Fahrdynamik, Fahrkomfort und Fahrbarkeit.

Abstract

Validation of automated driving functions (SAE level 2 to level 4) has to be done scenario-based in the future. Simulation and test-based methods need newly designed tools, particularly driving simulators. Today's driving simulators based on parallel and hexapod kinematics do not provide enough motion space for many test scenarios. A wheel based driving simulator combines the advantage of a large working space with high motion dynamics. This allows to reduce false cues below the human perception thresholds in all spatial directions. With this tool the design of human-machine-interfaces can be done methodically and systematically. Requirements for homologation and technical inspection can be derived. Research on human

behavioral models can be pursued (e. g. [5], [6], [7]). Finally, new opportunities arise in terms of attribute objectification in handling, ride comfort, and driveability.

Introduction

Connected and automated driving (CAD) functions intervene in driving operations in a safety-relevant manner. Automation functions of SAE levels 2 to 4 (partly automated to highly automated) must actively return the driving task to the driver in certain situations; they interact with the driver. Therefore, in design, homologation, and technical inspection an improved understanding of the human-machine-interaction in sequential and parallel operating modes is necessary, particularly for critical situations and accident scenarios [9].

Today's high performance driving simulators consist usually out of hexapod platforms with underlying parallel kinematics systems. Due to their concept, they do not offer the fidelity needed to create a realistic sensory perception of the test person, especially in critical situations and mitigation scenarios. The perception of linear acceleration and rotational motion particularly cannot be sufficiently represented in today's state-of-the-art systems due to their unfavorable ratio of motion space and moving mass.

Driving simulator features

These simulators have a disadvantage determined by their motion system: they are very limited in their motion space. Even hexapods with long cylinders have a plane motion space of only up to 1-2 meter. To compensate this limited motion space, a technique called Tilt-Coordination is used in driving simulators. By tilting the driver, a transformation of the gravity vector leads to a horizontal perceived motion [2]. Unfortunately, the Tilt-Coordination is very limited by the humans' perception, which often leads to a misperception in the simulator up to simulator sickness [8]. Since the vehicle motion simulation by using only a hexapod does not comply with the recent requirements, the dynamic driving simulators are often upgraded with a single or double slide system, e.g. [4], [11]. Depending on the concept, it is thereby possible to present an additional longitudinal/lateral motion. But even these systems are still very limited in their motion space and simulation quality [8].

On this foundation, the Technische Universität Dresden independently designed a novel wheel-based driving simulator (WBDS) concept. The simulator is currently under construction and will do its first test drives in 2022. In general, the WBDS concepts consist of two main parts:

1. A simulation dome (containing a hexapod and the cockpit mock-up mounted on top) that is capable of rotational and translational motion, which is very similar to common simulator concepts.
2. The wheel-based, self-propelled, omnidirectional and unbound motion platform that represents the key difference to current concepts.

The main idea of a WBDS is to be unbound and independent from any external source. Hence, it is possible to use the WBDS on any sufficient level surface. Thus, in contrary to a sled system, the motion space of the system is theoretically unlimited.

The objective of the Dresden concept, which is developed in a partnership between TU Dresden, AMST-Systemtechnik, and FSD Fahrzeugsystemdaten (Fig. 1), is to build a full-scale driving simulator using a projection dome. The motion platform (1) contains the accumulator and control system. Mounted to the motion platform are four driving units (2) with an independently steerable and propelled wheel. On top of the motion platform, a yaw bearing (3) is installed, enabling the simulator to perform yaw and lateral motion separately. Additionally, a hexapod (4) is used for tilting and high frequent lateral motion of the dome (5), which is installed on the hexapod. The projection dome has a screen size of $225^\circ \times 80^\circ$. In addition, a complex mockup with a freely programmable HMI (three touch displays; force feedback elements; steering wheel with hands-on detection; motorized seat belt) is used. To close the vertical frequency gap between the hexapod and the motion platform, a shaker is installed beneath the driver's seat.



Fig. 1: Driving Simulator TU Dresden ©AMST-Systemtechnik GmbH

The simulation architecture (Fig. 2) is a distributed system, where each computer has its own optimal specification regarding the linked modules. In general, the real-time computer, as the core unit of the whole system, controls the connected computers via network and ensures error-free data exchange. Here, the basic configurations are set up in the simulation framework and are being matched to the network module interfaces. Due to its real-time clock, the Driver-in-the-Loop receives the vestibular and haptic stimuli via the interfaces from the underlying real-time-operating vehicle model.

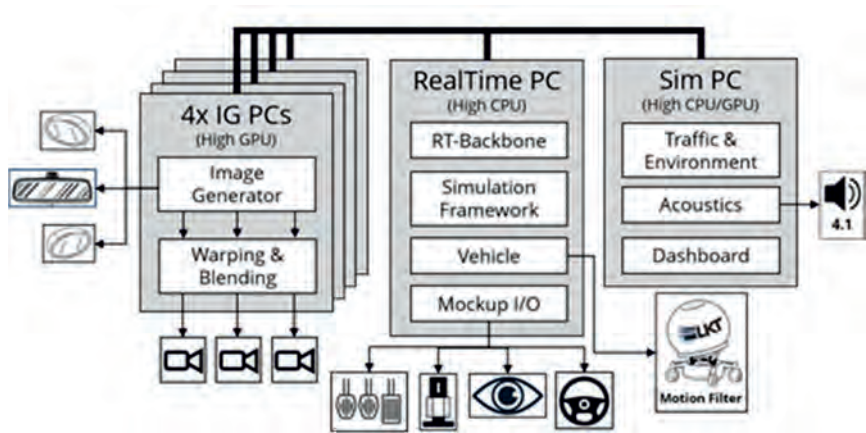


Fig. 2: Simulation Environment [1]

The visualization of the environment is performed by an image generation system (IG), consisting of one IG per projector and one IG for all mirror views. Thus, it will be possible to render the scenery in 4K-resolution at 120 Hz frame rate on each projector. While the mirror views can be directly sent to their respective display, the IG views have to be warped and blended onto the dome screen.

Table 1: Specifications of TU Dresden WBDS

		TU Dresden WBDS
Motion plat- form (3 DOF*) * active	$\ddot{x}; \ddot{y} \text{ (m/s}^2\text{)} / \ddot{\psi} \text{ (}^\circ\text{/s}^2\text{)}$	9; 9 / 206
	$\dot{x}; \dot{y} \text{ (m/s)} / \dot{\psi} \text{ (}^\circ\text{/s)}$	14; 14 / 320
	$x; y \text{ (m)} / \psi \text{ (}^\circ\text{)}$	inf; inf / inf
Yaw Bearing (1 DOF)	$\ddot{\psi} \text{ (}^\circ\text{/s}^2\text{)}$	180
	$\dot{\psi} \text{ (}^\circ\text{/s)}$	220
	$\psi \text{ (}^\circ\text{)}$	inf
Hexapod (6 DOF)	$\ddot{x}; \ddot{y}; \ddot{z} \text{ (m/s}^2\text{)} /$ $\ddot{\phi}; \ddot{\theta}; \ddot{\psi} \text{ (}^\circ\text{/s}^2\text{)}$	6; 6; 9 / 300; 300; 500
	$\dot{x}; \dot{y}; \dot{z} \text{ (m/s)} /$ $\dot{\phi}; \dot{\theta}; \dot{\psi} \text{ (}^\circ\text{/s)}$	0.45; 0.45; 0.42 / 50; 50; 45
	$x; y; z \text{ (m)} /$ $\phi; \theta; \psi \text{ (}^\circ\text{)}$	0.15; 0.15; 0.13 / 17; 17; 15
Seat shaker	$\ddot{z} \text{ (m/s}^2\text{)}$	10
Dimension (m × m × m)		4.4 x 4.4 x 4.6
Mass (kg)		~ 4700
Amount of wheel modules		4
Accumulator Energy (kWh)		22
Visualization system		3 projectors
Tire size		315/35 R20

Technical challenges

On the one hand, the design of a WBDS offers many advantages, allowing a new dimension of immersion, but on the other hand, it poses three main challenges to the development. All three challenges in this regard are based on the fact that the system is wheel-based and thereby unbound [1].

Tire dynamics

Contrary to cylinder or sled actuated systems; a WBDS needs to deal with the tire as a non-linear force transmission element that has two major adverse limiting characteristics: non-holonomic constraints and relaxation behavior.

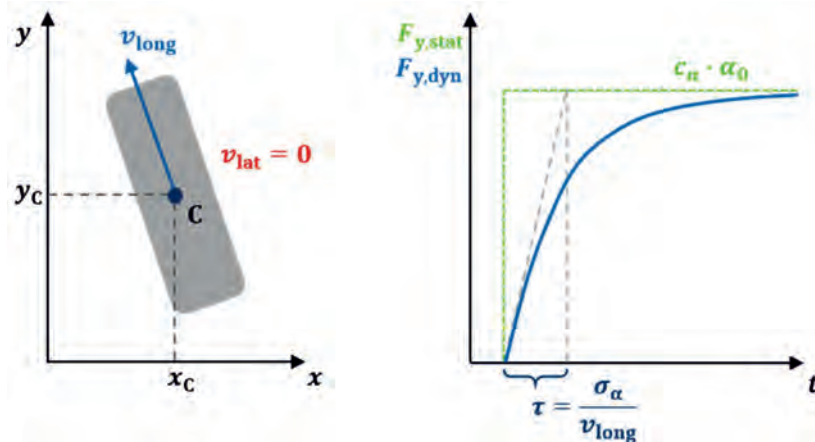


Fig. 3: Non-slip rolling wheel (left) ([10], p.241) and temporal development of the lateral force for a slip angle step (right) ([3], p.67)

Due to the non-holonomic constraints, the tire is fully defined in its location degree of freedom – in Fig. 3 (left), the wheel center is defined by x_C , y_C and the rotation around the z -axis – but it is constrained in its velocity degree of freedom. It has a longitudinal velocity v_{long} but cannot provide lateral velocity v_{lat} without slip angle ([10], p.241). In order to rotate and accelerate in its transverse direction, the tire initially has to be steered in the desired direction. This leads to potential latencies in force transmission as well as to a high shear load in a standing still tire. Furthermore, the tire shows a delay in its force transfer due to the relaxation behavior. As shown in Fig. 3 (right), a slip angle step α_0 with the tire specific, load dependent slip angle stiffness c_{α} leads to a steady-state lateral force $F_{y,\text{stat}}$ ([3], p.64):

$$F_{y,stat} = c_{\alpha} \cdot \alpha_0 \quad (1)$$

The dynamic lateral force $F_{y,dyn}$ corresponds to a simplified 1st order delay and can be represented by the exponential function (2) ([3], p.67).

$$F_{y,dyn}(t) = c_{\alpha} \cdot \alpha_0 \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{v_{long}}{\sigma_{\alpha}} t\right)}\right) \quad (2)$$

The relaxation length σ_{α} corresponds to the distance the tire rolls before the dynamic lateral force $F_{y,dyn}$ reaches approx. two-thirds of the steady-state force. It is defined in (3) and is depending on the lateral stiffness c_y . The latency τ (4) results from the relaxation length and the longitudinal velocity of the tire v_{long} . ([3], p.67)

$$\sigma_{\alpha} = \frac{c_{\alpha}}{c_y} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{\sigma_{\alpha}}{v_{long}} \quad (4)$$

Both the relaxation length and the resulting latency are thus dependent on the speed, but in particular also on the wheel load, which is shown in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

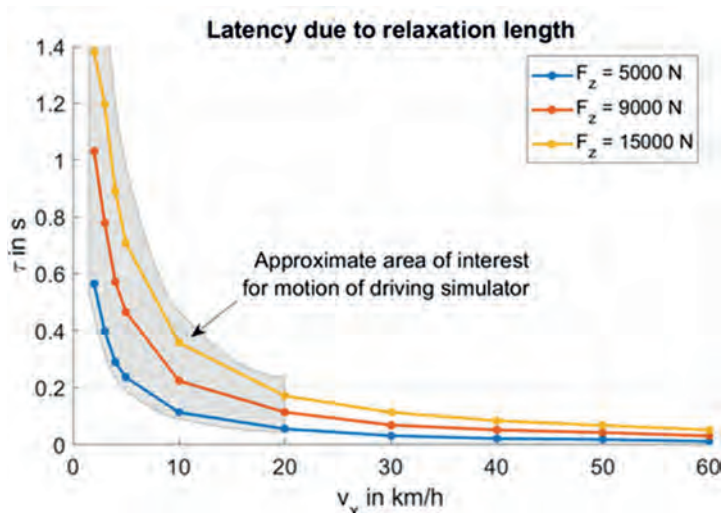


Fig. 4: Latency due to relaxation length depending on velocity and wheel load [1]

The diagram results from own measurements of a commercial tire with the specification 315/35 R20. It shows the dependency of the latency on the velocity for varying wheel loads. Additionally, the motion velocity of the simulator differs from the simulated car. For instance, while the simulated car is driving at a constant speed, the simulator is in stand-by and resting at a defined position. To be able to still react to a sudden driver input (e.g. lane change) it is crucial to avoid the delay in the response time. To address the issue of the situation dependent dynamic phase delay induced by the relaxation length, it is necessary that either the rolling-speed remains above a minimum level; or the steering of tires (worst case is 90°) can react in an infinitive short time. In the WBDS concept, this is enabled by the redundant yaw DOF and a very potent steering system. By rotating the motion platform and simultaneously counter-rotating the simulation dome, the driver remains in the same orientation while the wheels still have a defined speed. It is also possible to have a yaw motion and a horizontal motion in superposition. In this way it is possible to adjust the wheel rotation to a defined speed, independently from the horizontal motion of the simulator. Hence, the dynamic phase delay can be reduced to a nearly static delay. Additionally, as a fall-back solution the tire can be steered in the desired position in about 100ms.

NVH

Due to the self-driving concept, road unevennesses will be transmitted to the subject. In addition, interactions from the propulsion distribution lead to kinematic effects such as jacking-forces as well as pitch/roll movements that excite the system. Another significant disturbance results from the rather untypical usage of the tire at low speeds, high loads and unusual motions, controlled by the Motion Cueing Algorithm (MCA). To assure an optimum immersion, the hexapod, as part of the simulator motion, must not be influenced by the wheeled base under each circumstance. Hence, to decouple the suspect from disturbances and maintain the immersion, the suspension system plays a key role.

According to recent investigations, each excitation requires, depending on its frequency, another optimum damping-setup: A quarter-car model (3-masses) was excited by the road and vertical excitations by the dome. Next, an optimization was conducted regarding minimum dynamic wheel-loads (handling) and minimum motions of the base (comfort). As depicted in Fig. 5 the best setup for one criterion within the entire frequency range leads to a deterioration at other criteria. Furthermore, the optimum within the full spectrum does not necessarily mean the best setup within a small local frequency range.

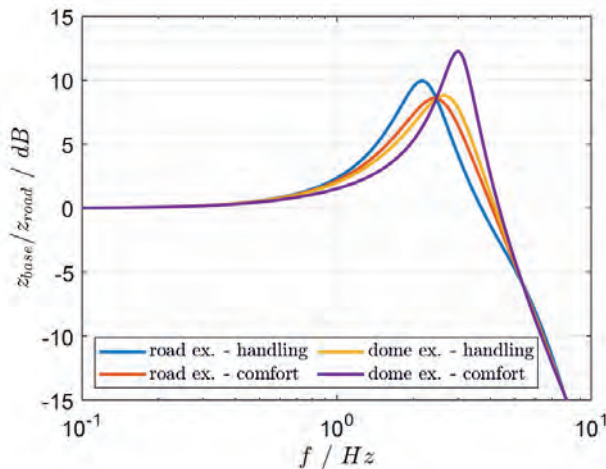


Fig. 5: NVH investigation

The main challenge is the linkage between the support of the hexapod and suppression of any disturbances without significantly affecting the MCA or overwhelming the system's energy resources. To solve the conflict, an active excitation-based damping-control is used. Furthermore, a counter motion of the hexapod will compensate remaining low-frequency disturbances.

Safety System

In contrast to conventional driving simulators, the WBDS does not have a mechanical limitation of its range of motion, there are no end stops as a fallback level in case of failure. This is an advantage for the simulation on the one hand but increases the need for safety measures to ensure that the prescribed range of motion is maintained, and that the environment is protected at any time. Furthermore, there is no wired data connection to the control terminal. The driving simulator must therefore have a fail-safe architecture independent of the control terminal to protect against hazardous situations.

The system safety of such an unbound system is built on the structural integrity, the Safety System and the fact, that a proven method is applied. This method was developed during the decades of building special training simulators for jet-pilots and helicopter pilots for high-G training, spatial disorientation training, hypoxia training and flight simulation. The procedure starts with the definition of the intended use, a comprehensive system definition, a system

description and the definition of stakeholder requirements. The applied standards are derived from the machine directive (EN ISO 12100, EN ISO 13849) and as there are no dedicated standards existing for such simulators a third party is consulting and approving the application of standards and the whole safety system. For the elaboration of the performance level the selection of safety functions a system FMEA and the risk analysis is applied.

One key issue for a safe system is the structural integrity. It starts with dimensioning guidelines at the very beginning of the project which are then distributed and applied to all engineering disciplines and partners. The dimensioning guidelines define the loads, utilization, critical components and the application of standards and guidelines for the finite element analysis and fatigue calculations.

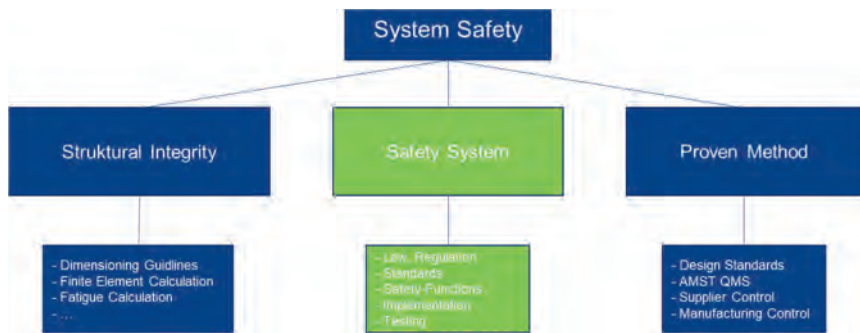


Fig. 6: 3 columns of System Safety

The independent safety system is designed according to the mentioned procedure. The rights architecture and selection of proper safety functions and its implementation is essential. Important factors for the unbounded system of the self-driving simulator are the actual position and speed, stop variants for operation and emergency and the safety integrated programmable logic control. All functions must be validated and verified during the commissioning and testing phase.

Status of the project

As emphasized in the introduction of the paper this concept of a WBDS is not only a study or scaled to an experimental size but will be a professional simulator which shall be used for the development of systems for assisted and automated driving. The development and build were contracted to AMST-Systemtechnik GmbH (AMST). The client is TU-Dresden and the main

partners are IAMT for the chassis and the energy management and LZS for the light-weight structure of the dome.

AMST's professional project management team and its experienced people ensure that all challenges can be mastered. All applied processes at AMST and the project team are highly developed and well proven. Highly motivated experts at TU-Dresden, AMST and its partners are working for two years in the Innovation Partnership which is a suitable vehicle for this complex project. The project also benefits from the established supplier network and the systems of a professional purchasing department. In challenging times like we had these years only such a setup can guide the ship through the rough seas. The WBDS project is on track heading to a successful completion.

The current project status is at the state of assembling of the main subassemblies Mock-up, Dome, intermediate motion platform and main motion platform.

What cannot be shown here is the software development. The low-level control software is in the verification phase of single tests. Controlled motion of all actuators is working, the next step is the integration of all systems to enable the controlled manipulation via a remote control. The high-level software contains the control and all models needed for prediction and observer and generates the driver controls answer and the visual cue. The challenges mentioned earlier shall be resolved there. This software is in progress and will be developed during the next year. The complete carbon dome structure with the implemented welded steel part, for the stiff interface to the hexapod is manufactured, painted and already approved. The current work items are the finishing of the screen surface, which is a quit complex topic. The surface must be smooth, free of any distinguishing items, but with the least amount of paint and filler to keep the weight as low as possible. The installation of the electrical parts inside the dome, the communication technic on the top and the adjustment of the visual (color matching, warping, blending...) are the open but no more high complex work packages for the dome.

The intermediate motion platform of the simulator, which includes the hexapod and the yaw bearing is finally installed and already tested. The next steps are performance tests with a payload dummy and afterwards the test with the installed dome on the hexapod. The payload dummy is design, so that the COG and the inertia matches with the fully equipped dome.

The installation of the main motion platform at IAMT is also ongoing, the corner modules are nearly installed. The assembling of center main motion platform with the electrical components makes a good progress. The battery packages are being completed by the supplier and installed from IAMT and at the end shipped to AMST.

The complete simulator will be installed at the ASMT facility to be able to perform all the necessary tests. Also, the mock up, which is currently in the assembly phase, will be implemented

by the mock up structure in our facility. The mock up structure is currently in the structural optimization. The stiffness and the lightweight design are also important for this small part, compared to the remaining structural parts. It is one of the parts with the highest COG.



References

- [1] Albrecht T.; Ottensmeier M.; Chen X.; Plaettner S.; Lutwitz M.; Roßmeier W.; Zöller C.; Tüsch T.; Winner H. and Prokop G. Rolling out a new Driving Simulator Concept - Design and Challenges of Wheeled Mobile Driving Simulators In: Proceedings of the Driving Simulation Conference 2021 Europe VR, Driving Simulation Association, Munich, Germany, 2021, pp. 123-130
- [2] Fischer, Martin. Motion-Cueing-Algorithmen Für Eine Re-alitätsnahe Bewegungssimulation. Braunschweig: DLR, 2009. Print.

- [3] Heissing B. et al. Fahrwerkhandbuch, Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden, Germany, 2007.
- [4] Murano, Takahiko, Takashi Yonekawa, Masami Aga, and Sueharu Nagiri. "Development of High-Performance Driving Simulator." SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst. 2.1 (2009): 661-69.
- [5] Prokop G.: Modeling human vehicle driving by model predictive online optimization - Vehicle System Dynamics 35(1), 2001, pp. 19-53.
- [6] Prokop G., Mai M., Weller G., Heyne F.: Fahrerhaltensmodell zur prospektiven Effektivitätsbewertung der aktiven Sicherheit - Hannover, 16. Technischer Kongress des VDA (20.–21.3. 2014)
- [7] Mai M., Tüschchen T., Prokop G.: A physiological based Driver Model for longitudinal Vehicle Guidance and its Challenges in Validation - Proceedings of Future Active Safety Technology Towards zero traffic accidents (FASTzero), 2015, pp. 175-182.
- [8] Tüschchen, T. Konzeptionierung eines hochimmersiven und selbstfahrenden Fahrsimulators, TU Dresden Dissertation, 2018.
- [9] Tüschchen T, Prokop G: Der hochimmersive Fahrsimulator als Werkzeug zur Absicherung und Bewertung von Assistenzfunktionen und automatisierten Fahrfunktionen - Haus der Technik, 2018.
- [10] Woernle, C. Mehrkörpersysteme Eine Einführung in die Kinematik und Dynamik von Systemen starrer Körper, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, Germany, 2016.
- [11] Zeeb, Eberhard. "Daimler's new full-scale, high-dynamic driving simulator – a technical overview". Actes INRETS (2010): 157-165.

Konzept eines gebremsten Crashtestschlittens mit Bild der PreCrash-Phase zur Analyse des Insassenschutzes bei alternativen Sitzpositionen

Concept of a self-braking crash sled for analysing occupant safety during the pre-crash and testing alternative seating positions

Marie Meincke, M.Sc., Dr.-Ing. Gerd Müller,
Prof. Dr.-Ing. **Steffen Müller**, Technical University Berlin

Kurzfassung

Das autonome Fahren bietet in Zukunft neue Freiheiten für die Gestaltung des Innenraumes von Fahrzeugen und damit auch für die Fahrzeitnutzung der Insassen. Die zukünftig möglichen alternativen Sitzpositionen reduzieren maßgeblich das Schutzpotential standardmäßiger Rückhaltesysteme oder verhindert gänzlich ihre Wirkung. In diesem Beitrag soll ein Konzept eines gebremsten Crashtestschlittens vorgestellt werden, welcher die PreCrash- und Crash-Phase samt alternativer Sitzpositionen abbilden kann. Mittels dieses neuentwickelten Versuchsträgers können bestehenden Rückhaltesysteme adaptiert und neue Konzepte untersucht werden. Neben den direkten Auswirkungen dieser Systeme während des PreCrashes auf den Insassen, kann anschließend die neu entstandene Umgebung während eines Crashes im Hinblick auf den Insassenschutz untersucht werden.

Abstract

The development of autonomous driving comes along with the opportunity to take new alternative seating positions for driver and occupants. With this new freedom in using the traveling time comes also new challenges in occupant safety. The known restraint systems will not work as used to or will be even useless for some positions. The investigation of new adaptive restraint systems or completely new concepts requires a self-braking crash sled which can represent the pre-crash and crash stage. After testing the impact of restraint systems for alternative seating positions it is also possible to examine the safety potential of the resulting interior and occupant arrangement.

Alternative Sitzpositionen in autonomen Fahrzeugen

Das autonome Fahren rückt mehr und mehr in den Fokus der zukunftsorientierten Fahrzeugentwicklung. Automatisierte Systeme aus Level 1 und 2 [1] sind seit einigen Jahren auf deutschen Straßen im Einsatz und auch Systeme aus Level 3 haben bereits die Zulassung in Deutschland erhalten. Höhere Automatisierungsstufen sind in Europa noch nicht zugelassen. Neben der Ausfallsicherheit, dem Schutz vor Cyberangriffen und dem fehlenden Vertrauen der Bevölkerung in autonom agierende Fahrsysteme, spielen dabei auch die neuen Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit eine entscheidende Rolle.

In zukünftigen autonomen Fahrzeugen sind mehr Freiheitsgrade der Sitzkonfiguration und damit mehr Freiheiten in der Innenraumgestaltung geplant. So gibt es Konzepte der führenden Automobilhersteller, in denen Insassen diverse Sitzpositionen einnehmen können. Dabei handelt es sich nicht nur um die Insassen im hinteren Teil des Fahrzeuges, sondern auch um den Beifahrer und, die maßgebliche Neuerung des autonomen Fahrens in diesem Zusammenhang, den Fahrer. In den meisten Konzepten ist eine mögliche Liegeposition, eine entspannte Arbeitsposition und eine 180°-Drehung der vorderen Sitze zur Kommunikation mit den hinteren Insassen, dem Lounge-Modus, vorgesehen. [2] [3] [4] [5]

In der Untersuchung von alternativen Sitzpositionen auf einem gebremsten Crashtestschlitten sollen im ersten Schritt Positionen der Automatisierungslevel 3 nach SAE J3016 [1] betrachtet werden. Dieses Level ist seit 2017 gesetzlich auf deutschen Straßen zugelassen. Dabei handelt es sich um Assistenzsysteme, welche die Fahraufgabe in bestimmten Einzelsituationen übernehmen können, jedoch jederzeit die Übernahme des Fahrers fordern können. Dazu zählt als präsendes Beispiel der Staupilot, welcher bei Geschwindigkeiten bis zu 60 km/h die Fahraufgabe übernimmt, sodass sich der Insasse anderen Aufgaben zuwenden kann. [6] [7] Sobald das System zur Verfügung steht, wird der Fahrer von der Fahraufgabe für einen gewissen Zeitraum entbunden und kann sich anderen Beschäftigungen zuwenden. In diesen Situationen wird es ihm ermöglicht eingeschränkte alternative Sitzpositionen einzunehmen, die seine Tätigkeiten unterstützen. Dabei kann es sich um den Arbeitsmodus handeln, in dem eine komfortable Entspannungspositionen eingenommen oder die Möglichkeit zum Arbeiten, Lesen oder Nutzen des mobilen Endgerätes gegeben wird. Entscheidend ist dabei, dass die Fahraufgabe jederzeit und unverzüglich übernommen werden kann. [7] Aus diesem Grund ist das Einnehmen der Liegeposition (Lehnenneigung 60° zur Vertikalen) oder eine 180°-Drehung des Sitzes ausgeschlossen. Einige Systeme der Level 3-Automatisierungsstufe überprüfen außerdem die Aufmerksamkeit des Fahrers über dessen Augenbewegung, sodass ein Wegdrehen aus dem Frontscheiben-Sichtfeld in diesem Fall nicht umsetzbar ist. [8]

Diesen Ansprüchen wird der Arbeitsmodus gerecht. Dabei kann eine Lehnenneigung von 40° gegenüber der Vertikalen eingenommen werden, was eine 15°-Absenkung gegenüber dem Standard-Fahrmodus aus Frontal-Crashkonfigurationen (25° zur Vertikalen) bedeutet. [8] Dieser Modus muss in Fahrtrichtung eingenommen werden. Zur weiteren Erhöhung des Komforts kann die Sitzfläche um einige Grad angekippt werden, sodass ein für den Insassen angenehmer Beckenwinkel erreicht wird. Der Sitz darf dabei nicht in longitudinaler Richtung soweit zurückgeschoben werden wie es die Konzepte aus Komfortgründen vorsehen, da das Lenkrad schnellstmöglich erreichbar sein muss.

Neben den genannten alternativen Sitzpositionen, welche an aktuell mögliche Konfigurationen angelehnt sind oder diese erweitern und erstmals für den Fahrer und Beifahrer ermöglichen, besteht auch die Möglichkeit der stufenlosen Sitzdrehung in den Kommunikationsmodus. In diesem werden die Sitze des Fahrers und Beifahrers so zu einander ausgerichtet, sodass eine Kommunikation mit Blickkontakt ermöglicht wird. Dabei gibt es unterschiedliche Konzepte der Hersteller welche maximale Verdrehung eingenommen werden kann. Während manche Konzepte eine Verdrehung bis 15° oder 30° [9] vorsehen, stellen einige eine größere Verdrehmöglichkeit bis 45°, 60° oder 90° [10] dar.

Bei der Begrenzung des Verdrehwinkels spielen mehrere Aspekte eine Rolle. Einerseits ist für die Automatisierung Level 3 eine Rückdrehung innerhalb kürzester Zeit erforderlich und der Fahrer muss noch so nah an der Ausgangsstellung sein, dass er auch ohne Verdrehung des Sitzes am Lenkrad und der Pedalerie eingreifen kann. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass eine Studie, welche sich mit dem Empfinden von Insassen bei unterschiedlichen Verdrehpositionen befasst ergeben hat, dass im Bereich der bis 90°-Drehung die Position 30° von 50% der Probanden akzeptiert wird, während die 60°-Drehung nur von 14,29% als angenehm empfunden wird. Die 90°-Drehung wurde mit 42,86% der Stimmen als akzeptabel bewertet. [11] Unter Berücksichtigung der Auflage geringer Drehwinkel, aufgrund der Levelbedingungen, ergibt sich ein präferierter Drehwinkel für den Kommunikationsmodus von maximal 30°.

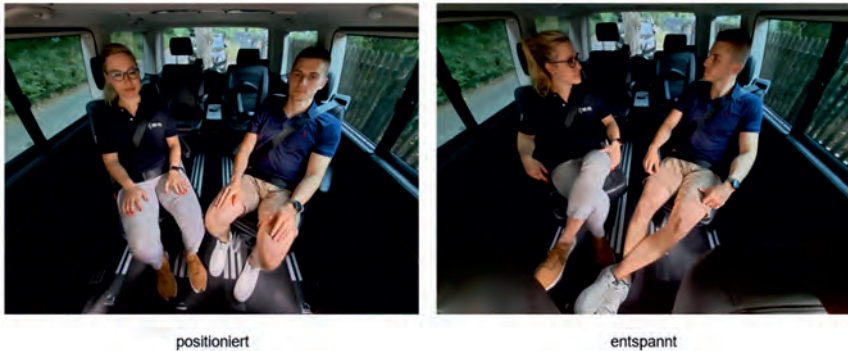


Bild 1: Kommunikationsmodus mit einem Drehwinkel von 30° und aufrechter Lehne in einem Volkswagen T6 (Baujahr 2015)

Ein weiterer Bewertungspunkt für ist der Raumbedarf. In Bild 1 ist der Raumbedarf beim Kommunikationsmodus mit einer 30°-Drehung beider Sitze zu einander und aufrechter Lehne dargestellt (25° zur Vertikalen). Als Fahrzeug wurde ein Transporter gewählt, welcher eine longitudinale Verschiebung der hinteren Sitze und eine 180°-Drehung gewährleistet. Zu erkennen ist, dass der Raumbedarf nur auf dieser Höhe des Schienensystems ausreichend für diese Sitzkonfiguration ist, da die Aussparungen in den Türen eine solche Drehung ermöglichen. Eine offene Kommunikation kann mit dieser Sitzanordnung gewährleistet werden, wobei sich die Fußräume der Insassen überschneiden und bei einer positionierten Sitzhaltung Körperkontakt entstehen kann. Vor allem bei größeren Menschen kann dieses Problem entstehen (die dargestellten Personen sind 1,72m und 1,80m groß). Die Bild zeigt die Sitzkonfiguration im hinteren Teil des Fahrzeuges. Für den Fahrer und Beifahrer können weitere Einschränkungen durch den Mitteltunnel (je nach Antriebsart) und die Armaturentafel entstehen. Letztere wird bei einem Level 3-Fahrzeug mit allen gängigen Instrumenten bestehen bleiben. Eine weitere denkbare Konfiguration ist der Kommunikationsmodus mit geneigter Rückenlehne (40° zur Vertikalen) zur Entspannung oder für Nebentätigkeiten. Bei dieser Anordnung erhöht sich der Raumbedarf soweit, dass ein Schließen der Türen im in Bild 2 dargestellten Fahrzeug nicht mehr möglich ist. Außerdem überschneiden sich die Beinbereiche der Insassen durch die weniger aufrechte Haltung noch mehr als bei aufrechter Lehne und es kommt zu Körperkontakt. Die liegende Haltung ermöglicht des Weiteren keine zueinander gewandte Kommunikation. Diese Anordnung, Zusammenführung aus Arbeits- und Kommunikationsmodus, ist für aktuelle Fahrzeuge ungeeignet und stellt damit keinen sinnvollen Verwendungszweck dar.



Bild 2: Kommunikationsmodus mit einem Drehwinkel von 30° und geneigter Lehne (40° zur Vertikalen, Arbeitsmodus) in einem Volkswagen T6 (Baujahr 2015)

Es ist davon auszugehen, dass sich die Abmaße der zukünftigen autonomen Fahrzeuge vergrößern werden und durch den Wegfall einiger Instrumente und der völlig neuen Innenraumkonzepte mehr Raumangebot für die Insassen entsteht. Aber auch dieser Trend ist durch die maximalen äußeren Abmaße eines Fahrzeuges begrenzt.

Für die Untersuchung des Insassenschutzes in autonomen Fahrzeugen mit einer Level 3-Automatisierung sind der Arbeits- und der Kommunikationsmodus folglich getrennt voneinander zu untersuchen. Es ergeben sich die Konfigurationen:

- Modus 1: Arbeitsmodus: Ausrichtung in Fahrtrichtung – Lehnenneigung max. 40° zur Vertikalen
- Modus 2: Kommunikationsmodus Fahrer: Drehung um max. 30° zur Fahrtrichtung in Richtung Beifahrer – aufrechte Lehnenneigung (25° zur Vertikalen)
- Modus 3: Kommunikationsmodus Beifahrer: Drehung um max. 30° zur Fahrtrichtung in Richtung Fahrer – aufrechte Lehnenneigung (25° zur Vertikalen)

Modus 1 gilt gleichermaßen für den Fahrer und Beifahrer. Beim Kommunikationsmodus muss zwischen diesen beiden unterschieden werden, da die Gurtführung bei der entsprechenden Sitzverdrehung und einer Verzögerung durch Bremsen oder Crash beim Fahrer und Beifahrer zu unterschiedlichen Drehimpulsen führt. In zukünftigen Untersuchungen sind höhere Automatisierungslevel und damit weitere Anordnungen und Sitzkonfigurationen zu untersuchen.

Insassenschutz autonomer Fahrzeuge

Heutige passive Sicherheitssysteme sind auf die standardisierte Sitzkonfiguration in Fahrtrichtung mit aufgerichteter Lehne (25° zur Vertikalen) ausgelegt. Diese sind bei abweichenden Sitzpositionen stark hinsichtlich ihrer Schutzwirkung eingeschränkt oder sogar gänzlich unwirksam. [3] Für autonome Fahrzeuge ist folglich eine Weiter- oder Neuentwicklung der Rückhaltesysteme notwendig. Für die stark geneigte Rückenlehne im Arbeits- oder Liegemodus können beispielsweise adaptive Airbagsysteme verwendet werden, welche bei geneigter Lehne ein größeres Volumen zur Verfügung stellen. [12] Auch weitere, zwischen Insassen eingesetzte Airbags können wohlmöglich ein Defizit seitens des Insassenschutzes ausgleichen.

Ein ganz anderer Ansatz ist es, bei einem drohenden Aufprall den Sitz automatisiert in die Ausgangsstellung zurückzubringen, sodass die standardisierten Sicherheitssysteme ihre volle Wirkung entfalten können. So ist keine Neuentwicklung von adaptiven und zusätzlichen Rückhaltesystemen notwendig. Höher automatisierte Fahrzeuge verfügen stets über einen Notbremsassistenten und entsprechender Umfelderkennung. Diese können einen bevorstehenden Aufprall je nach Crashkonfiguration zu unterschiedlichen time-to-collision (TTC) vorhersagen.

Eine Studie, die den point of no return (PONR) von 1.000 Heckaufprallen ausgewertet hat, hat gezeigt, dass bei einer TTC von 300 ms bereits über 98% der Heckaufprall-Unfälle unvermeidbar sind. Die Daten beziehen sich auf reale Unfalldaten aus der GIDAS Datenbank. Aus der Studie geht ebenfalls hervor, dass die Mehrheit der Unfälle mit Heckaufprall bei einer TTC von 500 ms – 1000 ms bereits unvermeidbar gewesen sind. [13]

Ausgehend davon, dass die Umfelderkennung und die automatisierten Systeme des Fahrzeuges zu diesem Zeitpunkt den bevorstehenden Aufprall erkennen, kann eine Sitzdrehung in die Ausgangsstellung eingeleitet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass es nicht zu unnötigen Eingriffen kommt, wenn ein Unfall noch vermieden werden kann, da die Drehung eine körperliche und geistige Belastung für den Insassen darstellen kann und nur im Notfall eingeleitet werden sollte.

Ausgehend von dieser Studie kann mit einer sehr hohen Sicherheit bei einem bevorstehenden Heckaufprall eine Sitzdrehung bei einer minimalen TTC von 300 ms eingeleitet werden. Innerhalb dieser Zeit muss für eine Level 3-Konfiguration eine Sitz-Rückdrehung von 30° bzw. eine Lehnaufrichtung von 15° durchgeführt werden. Auch größere Zeitfenster sind denkbar, insbesondere, wenn es bei anderen Sitzeinstellungen zu größeren Winkeländerungen kommt. Ebenfalls ist zu beachten, dass vor der Drehung unter Umständen Sicherheitssysteme wie ein

Gurtstraffer eingesetzt werden und für dessen Aktivierung entsprechend Zeit zur Verfügung stehen muss.

Schlittenkonzept

Die beschriebenen Szenarien können auf konventionellen Crashtest-Schlitten nicht untersucht werden. Standardmäßige Schlitten bilden mittels unterschiedlicher Bremssysteme die Crashphase ab und verfügen dabei nicht über ein sekundäres Bremssystem, welches die Pre-Crash-Phase abbilden kann. Des Weiteren werden für gesetzliche oder Verbraucherschutztests starre, einheitliche Bänke oder Sitzabwandlungen verwendet. Diese sind für einige Fragestellungen der PreCrash-Phase ungeeignet. Neben dem oben beschriebenen Ansatz der Sitzverdrehung und Lehnenaufrichtung, gilt es in Zukunft noch weitere Sicherheitssysteme zu untersuchen. So werden neue adaptive Rückhaltesysteme entwickelt, welche sich auf die individuelle Sitzposition und -konfiguration der Insassen einstellen. Diese und weitere zukünftige Systeme, müssen neben Simulationen und numerischen Untersuchungen nach wie vor auch mit praktischen Versuchen auf einer Crashtestbahn geprüft und zertifiziert werden. Dies ist die Motivation für das in dieser Untersuchung vorgestellte Schlittenkonzept zur Bild der PreCrash-Phase und Analyse des Insassenschutzes bei alternativen Sitzpositionen.

Um solche Fragestellungen zu untersuchen müssen an einem bestehenden Schlitten einige Änderungen vorgenommen werden. Eine vollständige Neukonstruktion wäre ebenfalls denkbar, ist aus wirtschaftlicher Sicht jedoch nicht zu bevorzugen. Aus dem Ansatz des Umbaus eines bestehenden Systems entsteht wiederum der Nachteil, dass die Zusatzsysteme reversibel verbaut sein müssen oder so ausgelegt sind, dass sie für Standardcrashversuche keine Nachteile oder Beeinflussung der Ergebnisse zur Folge haben.

Verzögerung

Crashbahnen sind in den meisten Fällen mit einer low- μ -Oberfläche ausgeführt, da dies bei einigen Seitencrashversuchen gefordert wird. Die Oberfläche der Bahn wird dafür an den Laufflächen mit einem Kunstharz übergossen und so Oberflächenreibungswerte von circa $\mu = 0,7$ in trockenem Zustand erzielt. Dieser Wert sollte für eine möglichst realitätsnahe Bild der Pre-Crash-Phase erhöht werden.

In Bild 3 ist ein solcher Verzögerungsverlauf des Crashtestschlittens exemplarisch dargestellt. Der Ausschlag der Verzögerung bei $t = 110$ ms ist auf das Auftreffen des Schlittens auf den Triggerauslöser zurückzuführen.

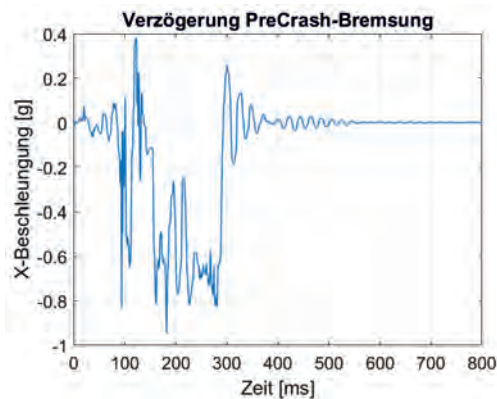


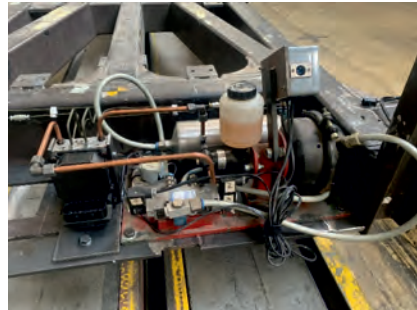
Bild 3: Verzögerungsverlauf des Schlittens in X-Richtung einer PreCrash-Bremung auf der TU Berlin-Crashbahn

Auch wenn das Reibwertpotential zwischen Reifen und Fahrbahn optimal genutzt wird, können die geforderten Verzögerungen für eine Gefahrenbremsung nicht erreicht werden. Es wird daher notwendig die Oberflächenbeschaffenheit der Crashbahn selbst anzupassen. Ein sehr aufwendiges und kostenintensives Verfahren ist die Neubeschichtung der Laufflächen mit einem grobkörnigen Kunstharz. Dieser Vorgang ist jedoch dauerhaft und wirkt sich negativ in den Reibeigenschaften bei Seitencrash-Konfigurationen aus. Eine weitere, reversible Möglichkeit ist es die Laufflächen mit Klebestreifen einzudecken, welche im Straßenverkehr für die Fahrbahnmarkierung verwendet werden. Diese weisen eine grobporige Oberfläche auf und können den Reibwert erhöhen. Bei Bedarf können Sie ausgetauscht oder entfernt werden.

Die PreCrash-Bremung soll, auch unter Verwendung eines Crashtestschlittens statt eines Vollfahrzeuges, einen möglichst realitätsnahen Verzögerungsverlauf abbilden. Dafür eignet sich daher am besten eine konventionelle Radbremse aus einem Serienfahrzeug (siehe Bild 5). Diese bildet eine Bremsung unter realen Bedingungen auf der Straße ab und kann über den Bremsdruck appliziert werden. Dafür sind am Schlitten die in Bild 4 dargestellten Zusatzaggregate wie Druckspeicher, Ausdehnungsbehälter, Steuereinheit, Bremskraftverstärker und ein Hauptbremszylinder von Nöten. Diese müssen auf dem Schlitten mitgeführt und mit einer Batterie versorgt werden. Für den Crashfall sollte auf eine stationäre Energieversorgung mit mitgeschlepptem Kabel zurückgegriffen werden.



Bild 5: Anbindung Radbremse

Bild 4: Geberplatte mit Zusatzaggregaten
zur Speisung der Radbremse und
ABS-Modul

Die Radbremse wird mit einem ABS-Modul (Anti-Blockier-System-Modul), inkl. Steuergerät und Steuereinheit, und notwendigen Sensoren ausgestattet. Bei Versuchen ohne Reibwerterhöhung des Untergrundes neigen die Räder aufgrund des geringen Reibwertes der Laufflächen stärker zum Blockieren. Das ABS-Modul wird ebenfalls aus einem Serienfahrzeug verwendet und bietet die Vorteile der Spurstabilität und optimaler Ausnutzung des Reibwertpotentials bei Geradeausfahrt. Des Weiteren bildet es eine realitätsnahe Gefahrenbremsung auf der Straße ab.

Führung

Bei Versuchen auf einer Crashbahn mit PreCrash-Phase wird der Schlitten wie gewohnt durch das Zugsystem beschleunigt und anschließend von diesem entkoppelt, sodass der Schlitten frei rollt und eine unabhängige Bremsung vollziehen kann. Anschließend wird der Schlitten durch eine Crashbremse, am Fachgebiet Kraftfahrzeuge der TU Berlin eine Biegeblechbremse, bis zum Stillstand verzögert und damit ein Frontcrash simuliert. Während des Freilaufens und der PreCrash-Bremsung muss der Schlitten in der Spur gehalten werden, um anschließend die Crashbremse passgenau anzusteuern. Diese Führung wird durch vier am Schlitten montierte Reibflächen aus Messing realisiert, welche in den Außenrillen der Crashbahn-Zuganlage entlanggleiten (siehe Bild 6). Die Belastung des Führungssystems wird durch die erhöhte Spurstabilität durch das ABS-Systeme möglichst geringgehalten.



Bild 6: Führungssystem am Crashtestschlitten

Versuchskonfiguration

Dieses Schlittenkonzept bietet die Möglichkeit adaptive und neuartige Insassenschutzsysteme zu evaluieren und in Hardware zu testen. Bei all diesen Untersuchungen sollte im Anschluss auch das Verhalten im Crash untersucht werden, um eine Aussage über das Schutzpotential treffen zu können. Daher muss auf der Crashbahn sowohl die PreCrash-, als auch die anschließende Crash-Phase abgebildet werden.

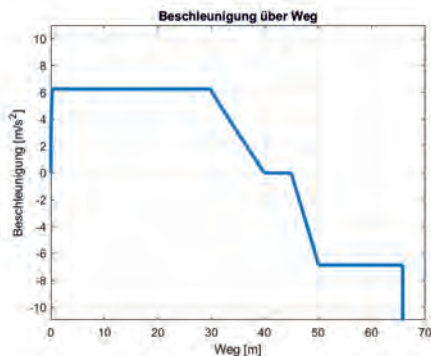


Bild 7: Möglicher Beschleunigungsverlauf mit PreCrash- und Crash-Phase

Auf der Crashbahn der TU Berlin kann der Schlitten mit einer maximal Zugkraft von 10 kN beschleunigt werden. Bei einem Schlittengewicht inklusive Aufbau von $m = 1,6 \text{ t}$, einer Bremsverzögerung von $a = 0,7g$, einer kurzen Konstantfahrt zur Entkopplung und einer resultierenden Crashgeschwindigkeit von $v_{\text{Crash}} = 50 \text{ km/h}$, angelehnt an Zertifizierungsversuche,

ergibt sich anhand der Bahnlänge ($l = 70 \text{ m}$) eine erforderliche Startgeschwindigkeit von $v_{\text{Start}} = 75 \text{ km/h}$. Dieser Vorgang ist als Beschleunigungsverlauf in X-Richtung über dem Weg in Bild 7 dargestellt.

Aufbau

Mit Hilfe dieses weiterentwickelten Crashtestschlittens soll es unter anderem auch möglich sein das Konzept der Sitzverdrehung in der PreCrash-Phase zu untersuchen. Für diesen Ansatz muss auch ein völlig neuer Aufbau entwickelt werden. Dieser soll es sowohl ermöglichen den gesamten Sitz samt Passagier in die Ausgangslage zu verdrehen, als auch die Lehne automatisiert in die Ausgangsstellung aufzurichten. Für die Drehung entsteht zeitabhängig ein sehr hoher Leistungsbedarf. Bei einer Drehung um 90° innerhalb von 300 ms muss eine Leistung von rund $P_D = 23 \text{ kW}$ zur Verfügung gestellt werden, wenn von einem zu verdrehenden Aufbaugewicht von rund 230 kg und einem HIII 95%-Dummy ausgegangen wird. Bei der eingangs beschriebenen Konfiguration im Kommunikationsmodus mit 30° -Sitzverdrehung entsteht ein Leistungsbedarf von $P_D = 2,5 \text{ kW}$ und ein Drehmoment von $M_D = 29 \text{ Nm}$. Für die Neigungsverstellung ergeben sich wesentlich geringere Anforderungen. Bei einer Aufrichtung von der Liegeposition (60° zur Vertikalen) zur Ausgangsposition (25° zur Vertikalen) ergibt sich ein Leistungsbedarf von $P_N = 1,6 \text{ kW}$ wohingegen eine Aufrichtung vom Arbeitsmodus in die Ausgangsposition (Lehnenwinkeländerung von 15°) eine Leistung von $P_N = 0,2 \text{ kW}$ bedarf. Je nach Schwerpunktlage, Gewicht des Dummies, Fahrzeugsitz, Schwerpunktlage des Gesamtaufbaus, Drehzeitraum und abzubildende Winkeländerung variieren diese Werte.

In Bild 8 ist ein mögliches Konzept eines Aufbaus auf einem Crashtestschlitten dargestellt. Die Grundplatte wird erweitert um den Fußraum abzubilden. Die Anbindungen der Motoren und Getriebe sind ebenfalls dargestellt und die konstruktiven Einschränkungen durch die vorgegebene Ausführung des Schlittens sind zu erkennen. Der dargestellte Aufbau kann durch zu untersuchende Bauteile wie Airbag-Systeme, neuartige Gurtsysteme, andere Insassenschutzsysteme oder Karosserieteile eines Fahrzeuges erweitert werden. Eine simulative Bild des Konzeptes zur Auslegung der Einzelkomponenten, Variation der Testkonfigurationen und Validierung wird parallel durchgeführt.



Bild 8: Konzept eines Aufbaus zur automatisierten Sitzverstellung während einer Pre-Crash-Phase auf einem Crashtestschlitten [15]

Zusammenfassung

Mittels dieses neuentwickelten gebremsten Crashtestschlittens und dem vorgestellten Aufbau ist es möglich Insassenschutzsysteme vor der Crashphase auch in der PreCrash-Phase zu evaluieren. Damit kann der Insassenschutz in autonomen Fahrzeugen auch bei alternativen Sitzpositionen erforscht und daraus resultierend möglichst erhöht werden. Neben dem Konzept der Sitzdrehung und -aufrichtung während der PreCrash-Phase können auch unabhängig davon andere adaptive Rückhaltesysteme untersucht werden. Das gleiche gilt für Systeme höherer Automatisierungslevel. Dabei wird sowohl die Wirksamkeit im PreCrash, als auch die Auswirkungen im Crashfall abgebildet. Mittels Untersuchungen auf einem solchen Versuchsträger können neben dem Generieren von direkten Ergebnissen auch numerische Insassenschutzmodelle validiert werden. Die Umsetzung eines solchen Schlittenkonzeptes ist folglich notwendig, um die Fahrzeugsicherheit in autonomen Fahrzeugen zu untersuchen.

Quellen

- [1] S. International, „Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles,“ in *J3016_201806*, 2018.
- [2] F. Laakmann, L. Zink und M. Seyffert, „Neue Innenraumkonzepte für den Insassenschutz in hochautomatisierten Fahrzeugen,“ *Automobiltechnische Zeitschrift*, pp. 54-59, 22 März 2017.
- [3] K. Golowko, V. Zimmermann und D. Zimmer, „Automatisiertes Fahren - Einflüsse auf die Rückhaltesysteme,“ *Automobiltechnische Zeitschrift*, pp. 26-33, 5 Juli 2017.
- [4] V. Sieber, „Vehicle Seat“. Germany Patent 102018108488, 10 April 2018.
- [5] Adient. [Online]. Available: <https://www.adient.com/advancements/ai18>. [Zugriff am 30 September 2021].
- [6] K. Zeeb und M. Meyer, „Systemübergänge vom automatisierten zum assistierten Fahren,“ *Automobiltechnische Zeitschrift*, pp. 52-57, 21 September 2018.
- [7] BMVI, *Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes - Gesetz zum autonomen Fahren*, 2021.
- [8] ADAC. [Online]. Available: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/technik-vernetzung/autonomes-fahren-staupilot-s-klasse/>. [Zugriff am 4 Oktober 2021].
- [9] UN/ECE, „Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeuge hinsichtlich des Schutzes der Insassen bei einem Frontalaufprall - R94,“ 2010.
- [10] L. Jakobsson, A. Fornells, A.-L. Köhler und C. Mayer, „Test Case Matrix and selecting Demonstrator Tests Cases,“ *OSCCAR*, 2021.
- [11] X. Jin, H. Hou, M. Shen, H. Wu und K. Yang, „Occupant Kinematics and Biomechanics with Rotatable Seat in Autonomous Vehicle Collision: A Preliminary Conecept and Strategy,“ in *IRCOBI*, Athen, 2018.
- [12] A.-L. Köhler, F. Prinz, L. Wang und J. Becker, „How Will We Travel Autonomously? User Needs for Interior Concepts and Requirements Towards Occupant Safety,“ in *28th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*, Aachen, 2019.
- [13] C. Birkner und N. Shirur, „Passive safety test system requirements for future mobility,“ in *Crash.Tech*, Ingolstadt, 17.-18. März 2021.

- [14] F. Spitzhüttl, H. Liers und S. Babisch, „Influence of emergency steering maneuvers on the point of no return (PONR) in real-world accidents,“ in *Crash.Tech*, Ingolstadt, 17.-18. März 2021.
- [15] S. Szalajski, Konstruktion eines Schlittenaufbaus für Sicherheitsuntersuchungen im autonomen Fahrzeug (Masterarbeit), Berlin: Technische Universität Berlin, Fachgebiet Kraftfahrzeuge, 2021.

Validation Procedure for a Vehicle Environment Simulation Model to be used for HBM-based Virtual Testing

Validierungsverfahren für ein Simulationsmodell der Fahrzeugumgebung zur Verwendung für Menschmodell-basiertes Virtuelles Testen

Dr.-Ing. **Andre Eggers**, **Matthias Schießler**, M.Sc.,

Dipl.-Ing. (FH) **Julian Ott**,

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Referat Passive Fahrzeugsicherheit, Biomechanik, Bergisch Gladbach;

Dipl.-Ing. (FH) **Christian Mayer**,

Mercedes-Benz AG, Integral Safety & Biomechanics, Sindelfingen;

Prof. Dr. **Steffen Peldschus**, Ludwig-Maximilians-Universität München, Biomechanik und Unfallforschung, Institut für Rechtsmedizin, München

Kurzfassung

In diesem Beitrag werden Vorschläge aus dem EU-Projekt OSCCAR (Future Occupant Safety for Crashes in Cars) vorgestellt für einen Prozess zur Zertifizierung von Simulationsmodellen einer Fahrzeugumgebung für die Verwendung in einem Menschmodell-basierten virtuellen Prüfverfahren zur Bewertung der Insassensicherheit. Eine vorläufige Version des Vorschlages für ein virtuelles Testverfahren wurde auf der VDI-Konferenz Fahrzeugsicherheit 2019 gezeigt. Dieser Beitrag knüpft daran an und erläutert im Detail notwendige Anforderungen an eine validierungsbasierte Zertifizierung des Modells der Fahrzeugumgebung, die erfüllt sein müssen, bevor das Modell für virtuelles Testen zugelassen werden kann.

Anforderungen an ein „Validation Device“ bzw. „Validierungswerkzeug“, das den Fahrzeuginsassen in diesem Prozess repräsentiert, werden detailliert erläutert. Dieses Validierungswerkzeug muss dem Menschmodell einerseits in Bezug auf Insassenbelastung und Interaktion mit der Fahrzeugumgebung ähnlich sein, andererseits aber auch praxisnahe Anforderungen erfüllen wie Robustheit oder Wiederholbarkeit in Validierungsversuchen.

Die Anwendung des Validierungsverfahrens auf ein Fahrzeugumgebungsmodell wird am Beispiel eines OSCCAR-Testlastfalls demonstriert, bei dem es sich um einen Frontalaufprall mit einem durchschnittlichen Insassen in zurückgelehnter Sitzposition handelt. Der untersuchte Validierungslastfall ist ein Schlittentest mit dem Dummy THOR-50M.

Es werden Ideen und Konzepte diskutiert, wie Streuung berücksichtigt werden kann, um sinnvolle Zulassungskriterien für Simulationsmodelle zu definieren. Es werden Vorschläge aufgezeigt, wie Streuungen aus dem realen Testverfahren selbst und dem Validierungswerkzeug sowie den Fahrzeugumgebungs-komponenten berücksichtigt werden können. Es wird ein zweistufiger Akzeptanzansatz für die Fahrzeugumgebungszertifizierung vorgestellt sowie dessen Anwendung für einen Validierungslastfall aus dem OSCCAR-Projekt.

Die in diesem Beitrag vorgestellten Konzepte und Empfehlungen sollen als Grundlage genutzt werden für zukünftige Standardisierungsaktivitäten und virtuelle Testverfahren in Regelugen oder Verbraucherschutztests.

Abstract

The main objective of this paper is to present proposals developed within the EC-funded project OSCCAR (FUTURE OCCUPANT SAFETY FOR CRASHES IN CARS) to define a process to admit vehicle environment simulation models to be used in an HBM-based VT (Virtual Testing) procedure for assessment of occupant safety.

A preliminary version of a proposed VT procedure was presented at the VDI conference vehicle safety 2019. This paper follows up to explain the necessary elements for the vehicle environment model validation-based certification, which needs to be fulfilled before a vehicle environment simulation model can be admitted to VT.

Requirements for an appropriate validation device representing the occupant within this validation process are identified and explained in detail. The validation device representing the occupant HBM needs to be on the one hand similar to the assessment tool (HBM) in terms occupant loading and interaction with the vehicle environment compared, on the other hand it also needs to fulfil practically oriented requirements like robustness or repeatability in validation real testing.

The application of the vehicle environment model validation procedure is demonstrated in the OSCCAR homologation test case, which is a frontal impact load case with an average occupant in a reclined seating position. The investigated validation load case is a sled test in this loading condition with a THOR-50M ATD.

Ideas and concepts how to address scatter to define reasonable simulation model admittance criteria are discussed. Proposals are shown how to consider scatter originating from the real test procedure itself and the validation device as well as the vehicle environment components. A two-stage acceptance approach for vehicle environment certification is presented. The application is demonstrated for a validation load case from the OSCCAR project.

The concepts and recommendations provided in this paper can serve as foundation for future standardization activities and implementation in regulatory or consumer testing.

1. Introduction

Due to increasing requirements for occupant safety in the context of more complex crash configurations related to automated driving vehicles also considering user diversity new assessment methods are needed. Real testing with ATDs (Anthropomorphic Test Devices) will eventually be complemented and in the long-term maybe even replaced by Virtual Testing (VT) with HBMs. For new VT occupant safety assessment procedures with HBMs there will be a need for vehicle environment simulation models that are sufficiently validated to ensure a similar level of trust in results like in a real testing-based procedure. As an intermediate step VT with simulation models of ATDs would also be possible addressing other limitations of physical testing like limited number of load cases, which can be tested physically due to limited effort. Within the EC-funded project OSCCAR a validation procedure was developed considering the results from the EU project IMVITER. This procedure is outlined in a flowchart consisting of three phases. A preliminary version was presented at the VDI conference vehicle safety 2019 [2]. Based on expert workshops and application of the procedure to pilot cases a refined updated version of this was developed (Fig. 1).

This procedure is outlined in a flowchart consisting of three phases:

1. Development of the vehicle environment simulation model, done by the vehicle manufacturer
2. An official validation procedure to demonstrate that the environment model correctly represents the real vehicle
3. A new VT based homologation (or assessment) load case including an HBM suitable and certified for this new load case

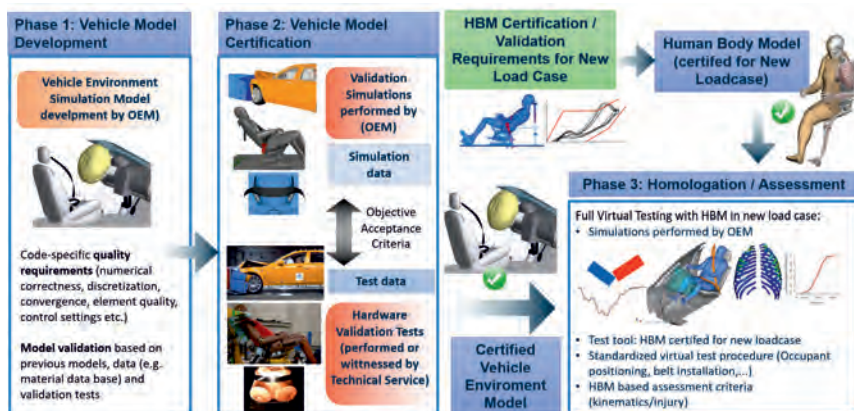


Fig. 1: Flowchart OSCCAR HBM-based virtual testing procedure.

This paper follows up to explain in more detail the necessary elements of the 2nd phase, the vehicle environment model validation, which needs to be fulfilled before the model can be admitted to HBM-based VT. The main aspects of this procedure and the application, which were done within the OSCCAR project are outlined in this paper. Further information can be found in the OSCCAR deliverable 5.1 [1].

2. Vehicle environment model validation-based certification procedure

To choose the appropriate validation load cases for Phase 2 including the validation device a detailed review of the new load case defined in Phase 3 should be the starting point. It should also be considered which safety systems or restraint concepts will be motivated or adapted in the case of the new requirements defined in Phase 3. New safety concepts might result in different interaction of the HBM with the vehicle environment which have to be considered for the definition of validation tests.

Selection of appropriate validation tests and validation device

The objective of the validation tests is to prove (within an official process opened after Phase 1) the validation of all components of the vehicle environment interacting with the occupants in the new load case. For these components, key focus should be given on the body regions and phenomena that are most relevant for the injury assessment.

To validate the vehicle environment, the components of the vehicle environment should be loaded in a similar way as by the HBM in the assessment or homologation load case. To enable this, a validation device (VD) is needed that represents the loading as similar as possible to the HBM. The applicability of a standard ATDs as validation device might be questionable as they are not designed for these new load cases.

The general requirements for a VD are listed below:

- Representative resulting loading between vehicle environment and HBM in the new assessment load case (including possible new restraint concepts), which is to be achieved most easily by the VD incorporating:
 - In terms of anthropometry as similar as possible to the occupant represented by the HBM in the new load case
 - In the new load case realistic human-like (HBM-like) occupant kinematics considering the principal direction of loading (e.g. front, side, rear, ...)
- Robust, repeatable, reproducible, re-usable in real testing
- Corresponding CAE model applicable in new (validation) load case

For more complex load cases involving new assessment criteria, a new VD more representative of the HBM in terms of shape and kinematics in the relevant loading conditions might be needed. An example for this, is a VD developed within the VIVA II project. To validate a seat model to be evaluated with a 50-percentile female HBM (Fig. 2) no corresponding rear impact

validation device in terms of using a standard ATD is available. All available rear impact dummies for real testing are representing an average male occupant. For a new HBM-based VT procedure with a 50-percentile female HBM a new VD (Fig. 3) whose design focusses on the interaction between test tool and the seat could be used for validation of the vehicle environment simulation model.



Fig. 2: 50-percentile female neck model
(Source: Östh et al., IRCOBI 2017,)



Fig. 3: Validation device 50-percentile female rear impact seat evaluation tool VIVA II (Source: <http://crashscene.se/f50flogard>)

Selection of validation channels

The objective of the extended model validation is to ensure the virtual components (e.g. belt, airbag) are loading the HBM in the correct way reflecting the loading and interaction with the HBM like the real vehicle components. Thus, the relevant validation measurements that have to be compared between test and simulation should be in the first place the loads (e.g. belt loads) acting between these components and the occupant. Also, more advanced measurements like pressure distribution between the validation device and the vehicle components could be considered in the future for a more robust validation.

By the validation procedure it has to be assured that the interaction between occupant and restraint (e.g. belt sliding) and resulting load distribution within the occupant is correct. For this purpose, the following measurement might also be needed in the validation procedure:

- internal ATD measurements (e.g. IR-TRACCS, clavicle loads)
- tracking of belt movement
- load / pressure distribution measurements

The focus should be placed on the body regions that will be of main interest for the HBM-based injury assessment. Body regions that are not used for the HBM-based injury assessment should also be considered, but only with the focus of correct load transmission.

Furthermore, kinematic measurements should be considered, if it is feasible to take the measurements during the test. If possible, target tracking should be evaluated. Alternatively, the whole-body kinematics could also be assessed by the accelerations of relevant body parts.

For each selected validation device and validation channel, it can be discussed if only the relevant loading direction or resultant has to be considered. For example, in a frontal impact load case only some of the x-direction ATD signals might be relevant whereas in an oblique load case also the lateral direction of ATD signals might have to be considered.

Workflow and responsibilities of involved parties in a vehicle environment model certification process

The objective of the certification procedure (Phase 2) as shown in Fig. 1 is to ensure that the simulation model of the vehicle environment is sufficiently validated to be used for Virtual Testing with a human body model in the new load case. To ensure a similar level of trust in the whole VT procedure compared to a real testing-based procedure the definition of a clear work flow and responsibilities of the involved parties is necessary.

Option A: A very strict procedure would follow these steps in sequential order:

- 1.) The OEM sets up and subsequently improves the simulation model also by calibrating to internal hardware tests on sled and component level up to a status that it is sufficiently validated to be used for Virtual Testing. At this stage the model status must be frozen. It has to be assured that exactly this version of model will later be also used in the homologation/assessment simulation (Phase 3). With this model all defined validation load cases should be carried out by the OEM with the simulation model. The detailed simulation results for all validation load cases should be provided in an agreed data format. Together with the data a report could be provided to show the level of validation.
- 2.) In a next step a technical service or an accredited consumer testing lab would carry out all or selected hardware validation tests. Another option could be witnessed tests, which are carried out by the OEM or an accredited lab.
- 3.) In a third step, based on an objective acceptance procedure, the validation status of the vehicle environment model should be confirmed by clearly defined criteria. After that the environment model can be labelled by a consumer testing organization (NCAP) or technical service/type approval authority as certified for use in Phase 3 of the VT procedure.

If boundary conditions (e.g. dummy position or crash pulse) differ significantly between simulation and hardware testing, the validation simulations with adjusted boundary condition might be repeated. However, it has to be assured that the vehicle model itself is not changed.

Option B: To reduce the effort for the consumer testing organization/technical service/type approval authority and to simplify the procedure, it could also be proposed to certify the vehicle environment model based on a validation report summarizing the internal validation work done by the OEM during the vehicle model development (Phase 1). In Phase 2 the technical service or expert at a consumer testing organization would check the validation report and confirm the certification of the model for VT testing based on the report. Technically, this is somewhat

comparable to what is called self-certification in the sphere of responsibility of NHTSA. However, this procedure would allow less credibility and trust compared to the previously described approach.

Another possibility is also to go for Option B in general, but on a case by case decision keep open the possibility to carry out validation tests by the technical service or consumer testing lab (as described in Option A) to confirm the results presented in a validation report. However, for this approach also clear pass or fail criteria would be needed.

Model version control

Currently (following the IMVITER proposal and Euro NCAP approach) the vehicle environment model as well as the HBM, will not be shared outside the companies. In this kind of VT process the quality and validity of the models will be checked and finally approved for further use for VT by a certification procedure. For the vehicle model this will be based on a validation testing-based procedure described within this report. After certification of the vehicle model it has to be made sure, that the same model is used in the whole validation process and eventually for VT-based assessment or type approval.

This can be done or is currently done on a basis of trust and based on OEM internal documentation systems. However, if HBM-based Virtual Testing will be used in a homologation of type approval process also an IT-based level of "labelling" (such as check sum, encryption or similar) might be needed. The models could get a kind of "certified" label and the vehicle manufacturer has to guaranty that exactly this model will be used within the whole virtual consumer test or homologation procedure.

Different options to ensure this requirement should be further investigated. After a model (HBM or vehicle/interior) is certified it could be encrypted or "locked" in a way that it cannot be further modified without permission which might result in a re-certification or update of the certification report. Another option could be that the model receives a unique labelling. All simulation results (output data/plots/reports) which are generated with exactly that model would automatically carry that label. It might be also possible to automatically generate some kind of "hash" code from simulation input file, which is always provided together with outputs/results and reports.

Acceptance criteria for validation-based certification considering test scatter

As explained before the reliability of the validation procedure in a VT-based homologation process is crucial. Failure within the validation process is no option for the OEM, because there is no RT-based backup option.

This leads to the following requirements for a validation-based certification procedure for a vehicle model to be used in an HBM Virtual Testing process:

- Pass/fail criteria needed to objectively distinguish between valid and a non-valid model
- The criteria should be stringent to assure the correct validation of vehicle environment to guarantee the same level of trust in a full VT procedure like in a RT-based procedure

- At the same time the procedure has to be achievable to make sure it is possible to pass the criteria of the vehicle environment validation with reasonable efforts.

A realistic validation procedure should consider the test scatter. Three main sources of test scatter in validation tests were identified:

- (1) Scatter in real test procedure (pulse, dummy positioning, belt routing, ...)
- (2) Variation in validation device (hardware dummy variation)
- (3) Variation in vehicle components

Proposal for acceptance criteria considering scatter in validation test procedure and validation device

R&R (Repeatability and Reproducibility) studies should be used to identify the test scatter that can be expected in a Phase 2 validation test. Thereby, for each validation channel, the reproducibility should be calculated based on an objective evaluation methodology (e.g. CORA or ISO/TS 18571) and multiple test series, ideally conducted in different laboratories. The rating provided by the objective evaluation methodology of any validation channel comparing the response of the model to one validation test is expected not to be better than the reproducibility (scatter) of the corresponding channel in the hardware test. From this perspective, the reproducibility in the hardware test is the maximum quality that can be expected from a validation channel. Since this requirement can rarely be fulfilled, adjustment considering the identified scatter should be applied.

Based on the reproducibility and adjustments considering the achievable predictability of the simulation model (-20%), an Objective Acceptance Criterion (OAC) is proposed:

$$OAC_{Channel} = (1 - 0.2) \cdot Reproducibility_{Channel}$$

The following two-stage objective acceptance criterion, based on the rating from an objective evaluation methodology (e.g. CORA or ISO/TS 18571) and calculated from the validation simulation and corresponding hardware validation test as reference, is proposed:

- 1) For acceptance, the objective evaluation value of each validation channel has to be above the previously determined $OAC_{Channel}$
- 2) Channels that do not fulfil this criterion have to be reviewed
 - a) Channels with an objective evaluation value below the $OAC_{Channel}$ but above the threshold of 0.58 might be acceptable. However, justification is necessary.
 - b) Channels with an objective evaluation value below the threshold of 0.58 are not acceptable unless detailed justification is provided (e.g. problems in hardware testing, shortcomings in the model of validation device not affecting the interaction of the HBM with the vehicle environment).

Proposal how to consider scatter in vehicle component response

In real testing-based type approval and assessment procedures the vehicle manufacturer takes the vehicle component scatter into account by a robust design including a safety margin with respect to some specific requirements (e.g. ATD injury reference values). Even a vehicle with a worst-case performance of the relevant component would have to fulfil the requirements. To ensure the same in a full VT procedure, the following process is proposed (see Fig. 4). For the simulation of the validation load cases, an upper and a lower setting of relevant vehicle environment component parameters should be used. If in best case available, a distribution of input parameters could be used in a stochastic simulation.

A corridor should be provided based on simulations for (combinations of) upper and lower outputs (or output distribution) of validation channels. The corresponding output channel from the real validation test would not have to match exactly one deterministic simulation output, but be within the corridor to be accepted as validated. The same upper lower and lower parameters would also have to be used in the vehicle environment model in homologation/assessment simulation (Phase 3).

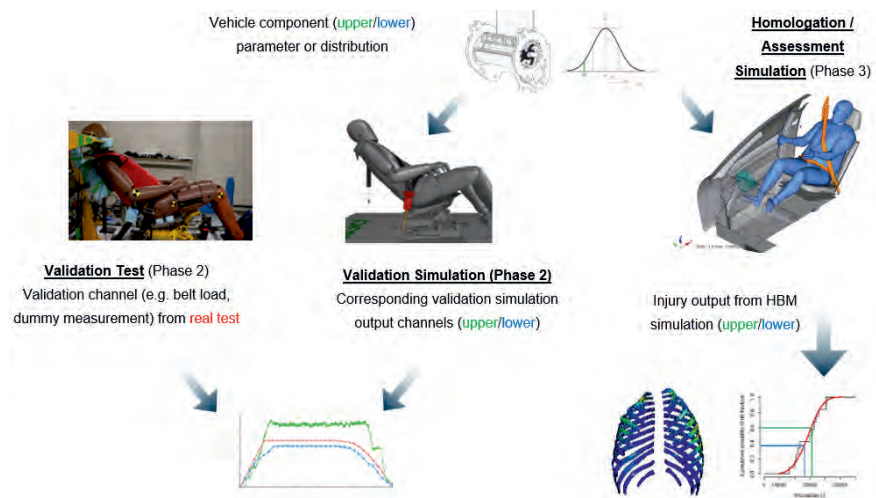


Fig. 4: Proposal how to consider scatter in vehicle components in VT with exemplary upper and lower parameter values

Application to OSCCAR homologation test case

The OSCCAR homologation test case includes a test setup with a highly reclined seating position resulting in a thoracic angle of 48°. The crash configuration is a full-frontal loading direction with a 50 km/h deceleration pulse. For assessment an HBM representing a 50%ile male occupant is used (see Fig. 5). CORA [3] with standardized parameters was chosen as objective evaluation methodology.

Validation load cases and validation device for OSCCAR homologation test case

For the OSCCAR homologation test case sled tests with a THOR-50M as validation device were proposed as validation load case (Fig. 6). The applicability of THOR in sled tests for validation of a highly reclined position implies certain limitations. In any case the biofidelity of internal ATD measurements in a reclined position is questionable. Thus, the measurement signals of the ATD will be used only as a validation device in comparison to the virtual ATD, but not for the injury assessment, which will be done with the HBM.

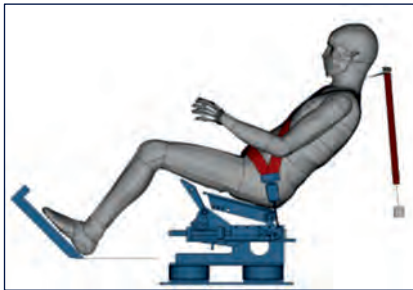


Fig. 5: OSCCAR homologation demonstrator

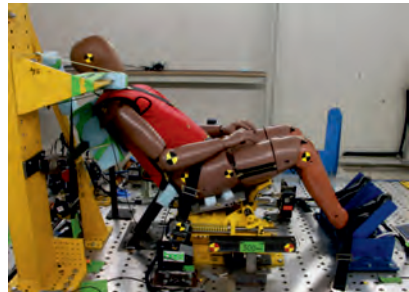


Fig. 6: Sled test setup with THOR-50M in reclined seating position (Thorax angle: 48°)

Selection of validation channels

Table 1 shows a list of channels that were considered suitable and relevant for the validation of the vehicle environment model for HBM-based VT in the OSCCAR homologation test case. Four repeated tests were conducted that should serve as basis for calibration of the CAE model. To assess the validation status of the calibrated model and certify it for VT one additional test was carried out later. To assess the suitability of a validation channel the CORA value between the mean of the four repeated correlation tests and the certification test and was calculated for each channel. The suitability of each channel was assessed according to the following criterion: $0.8 \cdot \text{Reproducibility}_{\text{Channel}} > 0.58$

One channel (T1 Acc. X) had to be removed as no test data was available. Another six channels T12 FX and FZ as well as all four clavicle forces were removed from the validation procedure as the test scatter was considered too high based on the above suitability criterion.

Table 1: Channels were considered suitable and relevant

▪ Restraint System	$F_{B3} - F_{B6} - D_{B1}$
▪ Head C.o.G.)	$AC_X - AC_Y$
▪ Upper Neck	$F_X - F_Z - M_Y$
▪ Thoracic Spine (T1)	$AC_X - AC_Y$
▪ Thoracic Spine (T4)	$AC_X - AC_Y$
▪ Lower Thoracic Spine (T12)	$AC_X - AC_Y - F_X - F_Z - M_Y$
▪ Chest Deflection	$UL_{Res} - UR_{Res} - LL_{Res} - LR_{Res}$
▪ Right Clavicle	$F_{X_{clavicle}} - F_{Z_{clavicle}} - F_{X_{trachea}} - F_{Z_{trachea}}$
▪ Pelvis	$AC_X - AC_Y - AN_Y - \text{Submarining}$
▪ Iliac	$F_{X_{left}} - M_{Y_{left}} - F_{X_{right}} - M_{Y_{right}}$
▪ Femur	$F_{Z_{left}} - F_{Z_{right}}$

Application of the proposed Objective Acceptance Criteria for Environment Certification

The above-mentioned procedure was applied to simulation results for the OSCCAR validation pilot case and results of one test that was conducted within the OSCCAR project for validation to demonstrate its applicability to Phase 2 of the VT certification procedure (Fig. 1).

- 1) For acceptance, the objective rating has to be above the $OAC_{Channel}$
21/27 channels (78%) passed the 1st stage certification procedure
- 2) Channels that do not fulfil this criterion have to be reviewed
 - a) Channels with a CORA-value below the $OAC_{Channel}$, but above the threshold of 0.58 might be acceptable. However, justification is necessary:
4 out of 27 channels failed the acceptance criteria (see Table 2), however, the CORA-rating was above the threshold of 0.58. For example, the Upper Neck (Mo. Y) had similar time-history curves, however, deviations in the peak values were observed.
 - b) Channels with a CORA-value below the threshold of 0.58 are not acceptable unless detailed justification is provided:
Two channels showed a CORA-value below 0.58 (see Table 2). The lower right (LR) Chest Deflection was reviewed and decided to be uncritical. For the Left Iliac Moment, the pelvis-to-belt interaction was not predicted correctly, as the position of the belt on the ASIS load cell was different. However, as this issue is a well-known limitation of the simulation model and the submarining was predicted correctly, it was decided that the whole simulation model should not be rejected due to this.

Table 2: Channels failing the 1st stage of the objective acceptance criteria

Channel	Val. Test	Validation Simulation for Certification		
	OAC _{Channel}	CORA	CORA > OAC	CORA > 0.58
Upper Neck (Mo. Y)	0.769	0.715	✗	✓
T1 (Acc. Z)	0.639	0.622	✗	✓
T4 (Acc. X)	0.704	0.608	✗	✓
UL Chest Deflection (Displ. Res.)	0.729	0.679	✗	✓
LR Chest Deflection (Displ. Res.)	0.778	0.556	✗	✗
Iliac left (Mo. Y)	0.688	0.298	✗	✗

In summary it was decided that the vehicle environment model is sufficiently validated and considered certified for use for VT in Phase 3 within OSCCAR research project applications. However, this decision was taken considering the following limitations that should be addressed before applying this approach in a respective procedure for e.g. consumer testing or even VT-based type approval:

- The THOR ATD was not developed for reclined seating positions. Further investigations regarding the suitability of THOR as appropriate validation device are necessary
- The semi-rigid seat is stiffer in the vertical direction than most production seats resulting in an overestimation of the lower thoracic spine z-forces
- Further improvement of the pelvis-to-belt interaction in simulations are necessary:
 - In the CAE model a new pelvis geometry based on the seated dummy should be used
 - Bending stiffness should be added to belt webbing in LS-DYNA and the corresponding material card should be updated to avoid folding of the belt
- More test data is needed to evaluate and improve method and acceptance criteria

3. Conclusions

Following the distinction of several phases in a Virtual Testing process as proposed within IMVITER, HBM-based VT as the only means of homologation/assessment should involve three phases. While the first phase serves internal model development by the OEM (which is comparable to what is done without VT), the second phase focuses on providing prove of the validity of the models. Calibrating models is not acceptable in this phase. With a successful completion of Phase 2, the models can then be admitted to Phase 3, in which they serve as the only base for assessing the protection offered to the occupant. Even if, on a global level, this HBM-based VT is only complementing existing physical testing, there is no fall-back option for the specifically addressed (sub-) load case, which creates high requirements to be checked for in Phase 2.

The selection of appropriate validation tests, requirements to choose or define an appropriate validation device, were proposed including the specification of relevant validation channels. The proposal was discussed related to the OSCCAR homologation test case, which consists

of an occupant in a reclined seating position. For this new load case a validation procedure based on sled testing with the available THOR ATD was analysed and discussed. A set of validation channels was also proposed. The selection procedure for validation channels can also be applied to other HBM load cases in the future.

First ideas and concepts how to address scatter to define reasonable admittance criteria were developed. Proposals were made how to address scatter in a validation procedure. Based on that, an objective two-stage acceptance approach for vehicle environment certification is proposed. This approach was successfully applied to the OSCCAR validation load case.

The concepts shown in this paper will need further evaluation and refinement. Eventually, they should serve as a basis for future VT related activities and implementation in regulatory or consumer testing.

4. Acknowledgement



The research leading to the results of this work has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 768947. This paper is partly based on OSCCAR D5.1.

5. References

- [1] Eggers, Andre et al. (2021). OSCCAR Deliverable D5.1 - Standardised procedure for validating a vehicle environment for VT, www.osccarproject.eu
- [2] Eggers, Andre; Mayer, Christian; Peldschus, Steffen (2019). Validation procedure for simulation models in a virtual testing and evaluation process for the passive safety of highly automated vehicles. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit 2019, Berlin.
- [3] Gehre, C.; Gades H. and Wernicke, P. (2009). Objective Rating of Signals Using Test and Simulation Responses, 21st ESV Conference, Stuttgart, Germany, 2009.

Predictive Safety: Activation of a Pre-Crash System with Fallback Option

Exemplary system analysis by STAMP/STPA for a Pre-Crash Side Protection system to support safety guided design and SOTIF

Dr. rer. nat. **Bernhard Grotz**, Dr.-Ing. **Philipp Straßburger**,
M.Eng. **Stefan Heiß**, M.Eng. **Lena Amann**, Dipl. Ing. (FH) **Marco Wahl**,
ZF Group, Friedrichshafen & Alfdorf

Zusammenfassung

Die voranschreitende Entwicklung von Hochleistungsrechnern, Sensorsystemen und Softwarelösungen bereitet das Feld für den Einsatz von prädiktiven Sicherheitssystemen, wodurch die Aktivierungspfade für aktive und passive Sicherheitssysteme in späteren Ausbaustufen vereinheitlicht werden können. Dabei sind die Anforderungen für ein Gesamtsystem (see, think, act) so komplex, dass sie mit bestehenden Methoden nicht mehr effektiv entwickelt werden können. In besonderem Maß gilt das für die funktionale und operationale Sicherheit (Safety), die vor zahlreiche neue Herausforderungen gestellt wird, beispielsweise dem Sprung von „fail safe“ nach „fail operational“. Die Absicherung neuer Sensoren mit intrinsischen Performance-Limitationen (Safety Of The Intended Functionality, SOTIF) macht es nahezu unmöglich zwischen „safety“ und „non-safety“ zu trennen wenn die Gesamtfunktion „safety“-relevant ist. Aus diesem Grund muss die Safety von Anfang an in die Systementwicklung voll integriert werden. In diesem Beitrag wird am Beispiel der prädiktiven Aktivierung eines Seitenairbagsystems mit Rückfallebene ein Ansatz vorgestellt, der durch Anwendung von STAMP/STPA (Systems-Theoretic Accident Model and Processes/Systems-Theoretic Process Analysis) in einer frühen Konzeptphase zu einem „Safety guided Design“ führt.

Abstract

The advancing development of high-performance computers, sensor systems and software solutions paves the way for the introduction of predictive safety systems. Here, the currently separated activation paths of active and passive safety systems can be unified in later development stages. The requirements for a complete system (see, think, act) are complex and can't be developed effectively by standard methods. In particular functional and operational

safety is challenged, e.g. by the transition from “fail safe” to “fail operational”. The validation of new sensors with intrinsic performance validations (Safety Of The Intended Functionality, SOTIF) make it almost impossible to separate “safety” from “non-safety” for safety-relevant functions. Hence, safety must be fully integrated into system development from the beginning. This paper presents an approach for the application of STAMP/STPA (Systems-Theoretic Accident Model and Processes/Systems-Theoretic Process Analysis) to the predictive activation of an exemplary side airbag system with fallback option at an early concept stage which leads to a safety guided design.

1. Introduction: Predictive Safety and Pre-Crash Systems

Currently, the field of vehicle safety is divided into two separate domains: active safety systems like emergency braking or emergency steering are triggered by evaluating the external situation for crash avoidance while crash mitigation is provided by passive safety systems like airbags and seatbelts, which are activated by crash pulse detection. Combining these up to now separated domains to enable an optimized reaction to critical traffic situations helps promise further improvement of road safety. Predictive Safety describes the vision of holistic safety intervention strategies based on a systemic integration of active (avoidance) and passive (mitigation) safety technologies (see Fig. 1), mainly driven by emerging sensor and software capabilities related to automated driving and new vehicle hardware and software architectures.



Fig. 1: Predictive Safety Pyramid – Holistic Top-Down Safety Systems Engineering based on enhanced perception techniques (IMS: Interior Monitoring System).

Functionalities at the intersection of both traditional fields become possible, e.g. by using the few milliseconds before a potential crash is about to happen for enhanced mitigation (pre-crash systems, [1]), or also pre-conditioning of the occupant or vehicle interior facilitated by internal sensing [2].

2. Pre-Crash System: Challenges and Side Airbag System

Pre-crash systems in particular have the potential to enhance the current level of occupant safety by an early activation of e.g. seatbelt or airbag systems before a crash has happened [1]. A first example of conventional restraint system deployment assisted by available sensor technologies is the detection of underride scenarios for frontal load cases. For side crashes, the introduction of pre-crash technologies represents the opportunity to gain a few crucial milliseconds in absence of a crumple zone or, alternatively, the activation of an external airbag [3]. Another actuator which might be utilized by such a system is an internal pre-crash airbag which is initiated prior to the crash while the conventional side airbag is activated in-crash. Both are required for an optimal effect on the occupant: activation of the pre-crash airbag allows for occupant pre-conditioning while the conventional airbag ensures in-crash performance and acts as a fallback if required. Pre-crash activation is facilitated by external sensing and perception while in-crash activation can rely on standard airbag control unit logic (see Fig. 2).

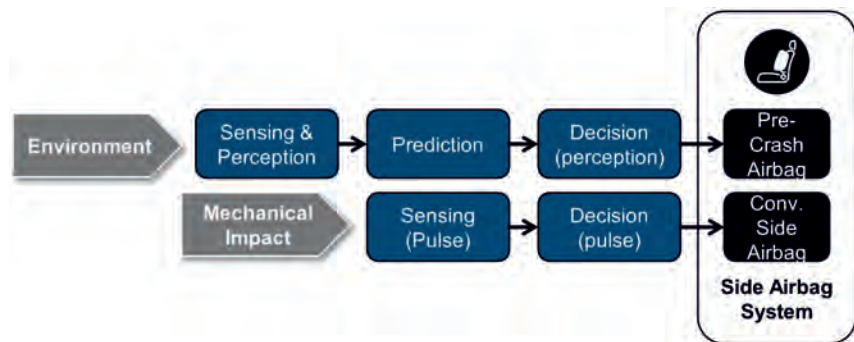


Fig. 2: Functional Principle of the Side Airbag System: Separate activation paths for pre-crash airbag (perception-based activation) and conventional side airbag (pulse-based activation).

We want to point out here that initial stakeholder requirements for pre-crash activation are hard to elicit as there are currently no standard systems on the market and, hence, no rating protocols exist. In addition to purely technical questions also legal, homologation and customer aspects must be considered.

3. Systems Engineering: From System Level to Activation Decision Requirements

Systems Engineering provides a methodology to organize system development holistically according to international standards and procedures (INCOSE, ref. [4]). The development stages can be conveniently represented within a V-model (see Fig. 3). Use cases are derived from initial stakeholder requirements ("What shall the system do?"), followed by the derivation of system requirements and architectural design on the system level (left branch). This serves as input for the technology domains. Here, the development of the respective individual components occurs which are later to be integrated, tested, and validated within the right branch. Of central importance for the whole process are correct and comprehensive system requirements which act as a focal point for the system design including functional safety, validation ("How good?") and (sub-)systems realization. Developing a general methodology and deriving these requirements requires both input and collaboration from all relevant stakeholders to answer two basic questions: When is the system considered safe and when is the system considered good enough?

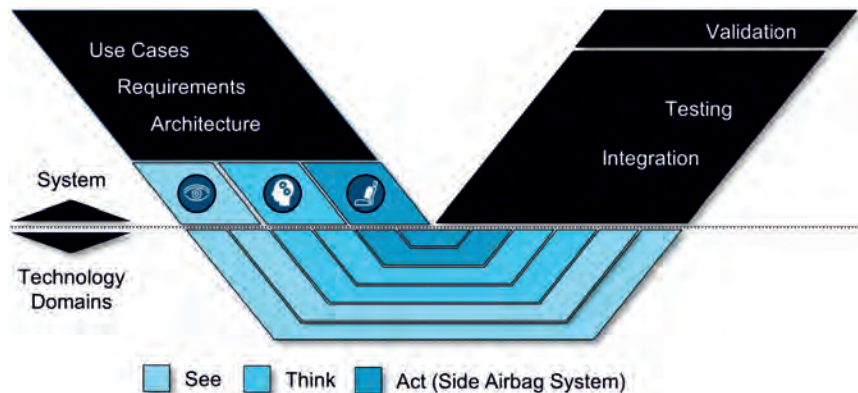


Fig. 3: Airbag System Development in V-Model: See: sensor set and perception, Think: function logic and hardware architecture, Act: side airbag system.

All requirements lead to the activation decision for the side airbag system, split in two paths of activation for pre-crash and conventional side airbag as mentioned before (see Fig. 2). We want to point out that there is an increased level of complexity in realizing the pre-crash activation. While the conventional system can mostly rely on established technologies and procedures mainly centered around load cases and misuse events, the situation for a predictive system is more complex in terms of activation, unintended activation (false positives) and the question when not to activate (false negatives) can become difficult to answer due to limited sensor and perception capabilities. As the whole system is safety-relevant, this situation is further challenged by SOTIF and fail operational difficulties.

4. Safety as a System Property: From Functional Safety to Safety Guided Design

Perception-based activation of safety critical actuators requires fail operational systems that also fulfill upcoming SOTIF requirements. This goes beyond the scope of the established ISO 26262 standard and requires new methods like, e.g. System Theoretic Process Analysis, STPA [5] which we evaluate in this paper. To understand this problem, it is convenient to go back to the historic origins of functional safety which can be traced back to failures (reliability) of individual mechanical components. This is reflected in standard work procedures, e.g. ISO 26262 which considers the development of electronic, electrical and programmable components for vehicles up to 3,500kg: An initial hazard analysis and risk assessment (HARA) is used to identify potential hazards and assesses them based on exposure, controllability and severity to derive safety goals with associated Automotive Safety Integrity Levels (ASIL). These are linked to respective system and safety requirements and provide the basis for a safety concept as an aggregate of all safety requirements. In practice this means that a particular ASIL level is complied with individual system components which are developed, tested, and, if needed, modified individually to meet these requirements which are verified as last step. This methodology is established and works well for systems with clearly defined boundaries between and limited interactions of individual components. For complex systems however, this approach leaves crucial gaps as unsafe scenarios which lie outside the world of component failures in the domain of operational safety are not covered.

“You think because you understand ‘one’ you must understand ‘two’ because ‘one and one’ makes ‘two’. But you forget you must also understand ‘and’”.

– Rumi

For systems which employ environmental perception with associated specification insufficiencies, performance limitations and (foreseeable) misuse an international standard for the automotive system domain is close to being released, commonly referred to as Safety Of The Intended Functionality (SOTIF), ISO/PAS 21448. This new standard considers the specific system functionality (at least partially) as safety relevant and hence, requires new analysis methods. Based on a system definition (sensor, function, actuator), an intended function is specified. In the following, system hazards, caused by the specific functionality, are identified, and analyzed for triggering events. Measures are introduced to minimize the risk balance and a validation and verification strategy is defined to demonstrate safety for known and unknown use cases based on existing knowledge and statistics. While SOTIF, ISO/PAS 21448 explicitly defines what new analysis methods shall be delivered, it does not define how to conduct such an analysis in practice. We see STAMP/STPA and the associated approach, currently discussed in the automotive industry, as a promising candidate for this purpose (see Fig. 4).

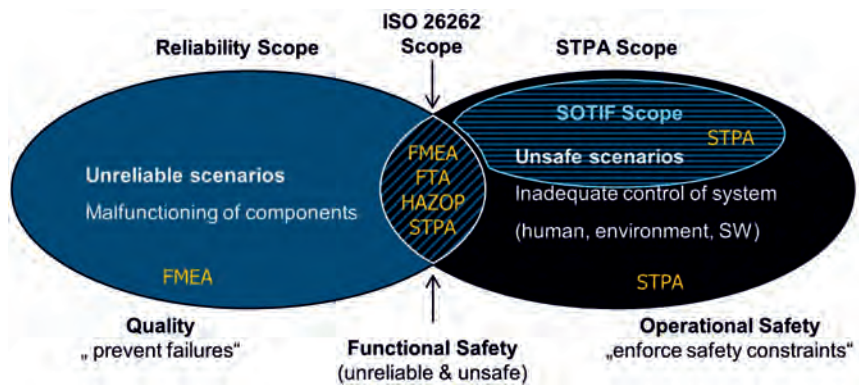


Fig. 4: Safety Analysis Methods: STPA: System Theoretic Process Analysis, FMEA: Failure Mode and Effects Analysis, FTA: Failure Mode and Effects Analysis, HAZOP: Hazard and Operability, (adapted from ref. [7]).

This approach is based on a combination of system theory and control theory (System-Theoretic Accident Model and Processes, STAMP [6]). A system theoretic process analysis (STPA, [5]) can help to analyze and later optimize system behavior by modeling and analyzing the specific system function within a control structure. Thereby linking unsafe scenarios to inadequate system control and hence enhancing the domain of operational safety by en-

forcing safety constraints on the system. Additionally, STPA provides the opportunity to be directly integrated into early conceptual system design decisions in contrast to conventional safety analysis methods, which can be applied only in later development phases, when system design is fixed (see Fig. 5). In concept phase, high impact design changes are comparably easier and less cost intensive. The subsequent function development can directly consider the established safety constraints which can be traced back via requirements and system design to the underlying safety rationale. In such a process, safety is no longer separated from the actual function and system development focusing only on unreliable or unsafe component malfunctions but is integrated into the development process itself and takes the key role in establishing a safety guided system design.

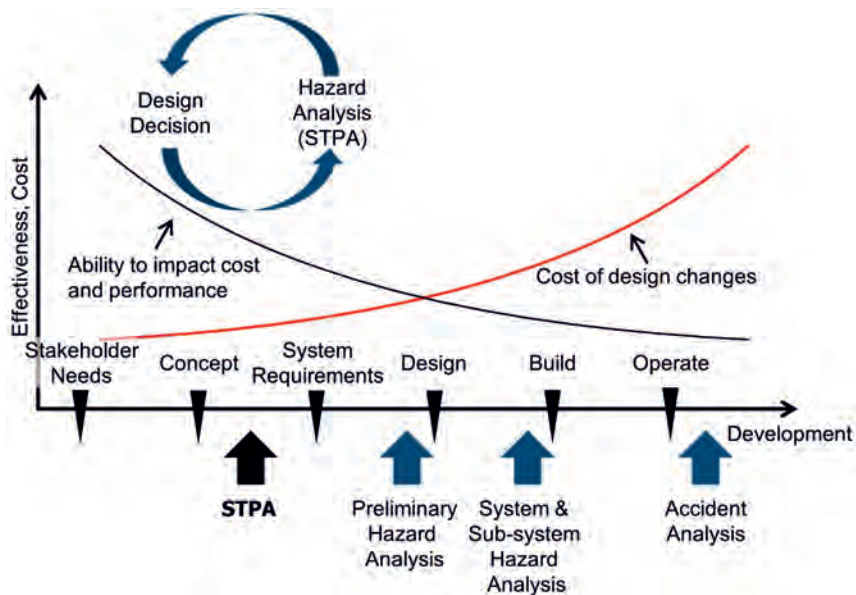


Fig. 5: Development Process for Safety Guided Design (adapted from ref. [8]). Early introduction of STPA analysis (thick black arrow) into development process, in comparison to later stages of HARA analysis (thick blue arrows).

5. STPA: Methodology & Application to Side Airbag System

Pre-crash systems are complex systems which consist of several components with underlying performance limitations like e.g. a camera blinded by sun light or a probabilistic crash

prediction. Unsafe scenarios arise not only by individual component failures but rather by the interplay of several components or the system design itself. System theory which takes a holistic view can help to analyze these emergent system challenges. The underlying theoretical groundwork which combines system theory with control theory was outlined in 2012 by Nancy Leveson [5] as System-Theoretic Accident Model and Processes (STAMP). Here, safety is treated as a dynamic control problem which leads to hierarchical control structures, process models and safety constraints. A basic control structure consists of a process which is affected by a controller (can also be a human) which monitors the state of the process by a sensor. Safety constraints (physical, human, or social) are imposed on the system to regulate system behavior and enforce safety. This provides the basis for System Theoretic Process Analysis (STPA, [6]) which looks for hazards and losses. A loss is the result from a system behavior which is unacceptable for a stakeholder like loss of life, property damages or any further impact and is not linked to individual components or specific circumstances. A system level hazard is a system state or set of pre-conditions which leads to a loss if certain environmental conditions are fulfilled. In contrast to losses, system hazards are within the system boundaries and can be eliminated or mitigated with appropriate system design.

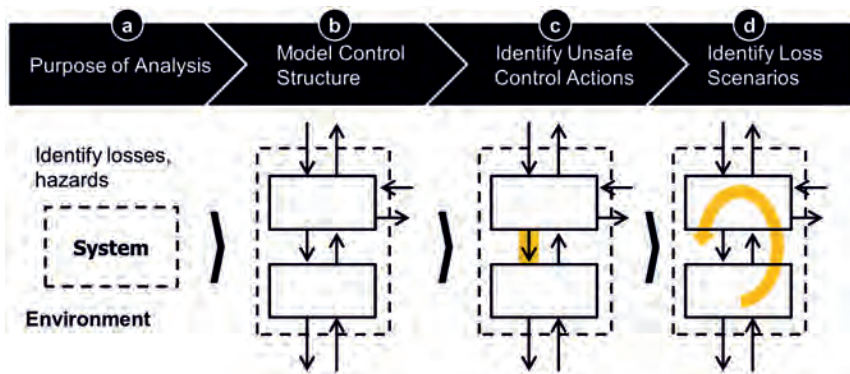


Fig. 6: STPA Methodology (adapted from ref. [7]): a) Define the purpose of the analysis (identify losses and hazards), b) Model the control structure, c) Identify unsafe control actions (orange), and d) Identify loss scenarios (full system).

STPA is done in four steps (see Fig. 6):

- a) Purpose of analysis: Definition of system boundaries and identification of losses and hazards.
- b) Model control structure: Hierarchical control structure which models system behavior by feedback loops enforcing system constraints (see Fig. 7).
- c) Identify unsafe control actions (UCAs): Each control action is tested for unsafe scenarios, which are linked with respective hazards and associated controller constraints.
- d) Identify loss scenarios: The control structure is tested and analyzed for causes of unsafe control actions and the occurrence of loss scenarios: why they occurred and why control actions didn't work or couldn't be initiated.

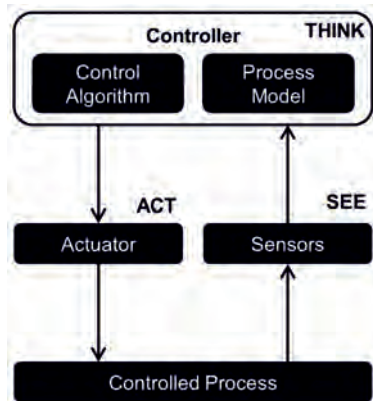


Fig. 7: Exemplary control structure.

The results of the analysis are then used to derive measures to enforce the system with the intention of not violating safety constraints. The following steps show how this process is applied for the pre-crash airbag.

Step a): Purpose of Analysis for Pre-Crash Airbag

As mentioned in section 2, the side airbag system consists of two parts: a pre-crash airbag is inflated before the crash while a conventional side airbag is used for in-crash performance and as a fallback option. We will limit our description and analysis in the following to the pre-crash airbag as the activation decision for the additional side airbag is already covered by standard techniques. An exemplary loss which is associated with this system is:

L-1: Loss of life or injury to people.

System hazards must be identified which can lead to this loss for specific system states or if certain pre-conditions are met. In our case this can be:

H-1: Pre-crash system activates airbag when vehicle is not hit by an object. [L-1]

Due to the fallback option, we do not consider a missed activation as safety relevant. So, in this system scope there is no hazard regarding missed activation. As a last step, system level safety constraints are derived from the hazard definition which specify system states or behavior to prohibit hazards and resulting losses. Such a system constraint is:

SC-1: Pre-crash system must not activate airbag when vehicle is not hit by an object. [H-1]

Step b): Model Control Structure

A control structure is established as a functional model which consists of a controller which monitors and controls the current state (see Fig. 8).

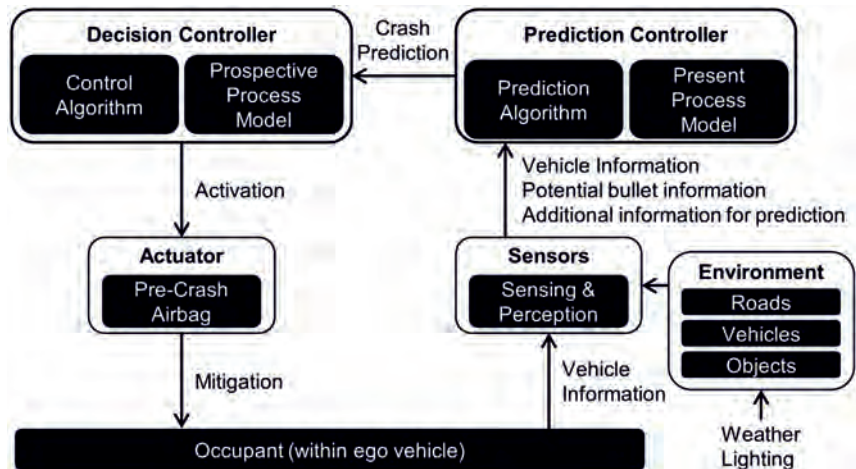


Fig. 8: Control Structures for Pre-Crash Airbag.

Here, we see a difference between a classical system like a conventional restraint system with airbag control unit, and a predictive system. For a system which predicts future system behavior, decisions are taken based on a predicted future system state. This means that the current state must be transformed by a second controller for this additional prediction task. For the activation decision of the pre-crash airbag, external sensors have to monitor the driving environment as completely as possible and make a prediction for potential objects based on information data which is influenced by environmental effects like e.g. weather conditions or friction coefficients.

Step c): Identify Unsafe Control Actions (UCA)

STPA formalizes and systematizes the UCA identification process by using a set of keywords: If {control action} is {keyword} in {context} then {hazard}. Keywords for our system are: Not provided when required/expected, provided when not expected/required, provided too early, and provided too late. Next step is to identify which control actions are potentially unsafe. In our control structure (Fig. 7) this is referred to as the "Decision Controller" regarding an unsafe activation of the pre-crash airbag. The control action that could lead to hazard 1 is:

UCA-1: Pre-crash airbag control provides activation command when no crash occurs. [H-1]

Step d): Identification of Loss Scenarios

As a last step in analysis, the whole system (control structure) is analyzed for scenarios that lead to unsafe control actions. The underlying causes must be identified why these UCAs occurred. For our pre-crash system we see three distinctive areas in the control structure which must be analyzed individually. Each area is targeted by specific standard question grids which cover purely technical aspects (component failures) but also generic aspects like gaps or missing specifications, e.g. for the decision controller (see Fig. 9). Exemplary questions for specification gaps are given in the following.

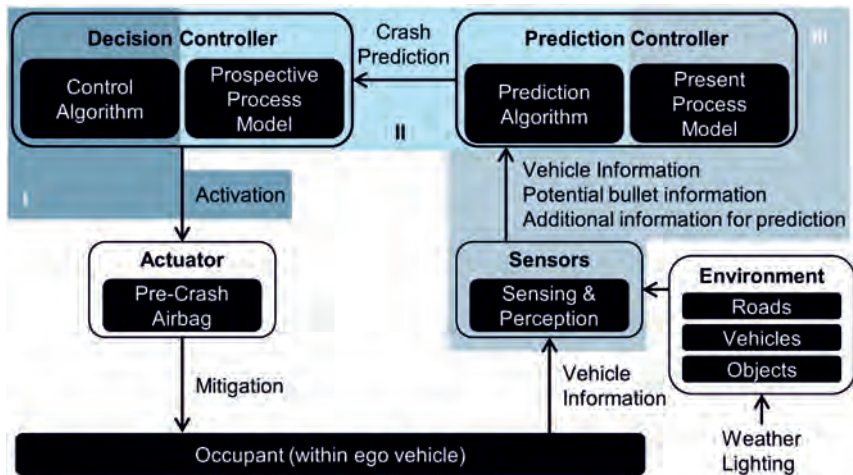


Fig. 9: Control structure to identify loss scenarios within three areas (I, II, III).

Area I: Is it possible to specify sufficiently when (not) to activate crash mitigation system?

Example scenario: The decision controller sends an activation request when the crash prediction correctly predicts a "collision" with an object height of 29 cm but ego vehicle runs over the object without collision.

Cause: The control algorithm was specified for standard vehicles where ground clearance is always < 25 cm and did not include special circumstances. The ego vehicle is an SUV with extreme high ground clearance to overrun these 29 cm.

Measure: Specification must regard ego specific height.

Area II: Is it possible to specify sufficiently how to predict crashes from current driving situations?

Scenario: The Prediction algorithm predicts a crash with 100% probability but in the real situation, bullet and ego miss each other.

Cause: The prediction assumed a constant speed or deceleration (braking) for the target vehicle, but the target vehicle accelerated to avoid the collision.

Measure: Specification must regard all possible maneuvers for ego vehicles.

Area III: Do we know what information (incl. accuracy) we need for prediction and decision?

Scenario: Process modeling considers a maximum steering angle for all vehicles within prediction. Based on this assumption, a collision is inevitable, but the specific target provides a larger steering angle and avoided the crash.

Measures: a) Information about specific steering angle must be provided, b) always assume all physical possible steering angle variants, including worst cases.

Comparable scenarios and questions can be found for the quality of the sensor data (insufficient or missing feedback), which helps to develop detailed sensor and perception requirements. In general, this analysis reveals safety constraints violations in system concept and design. Hence, the measures and additional resulting requirements ensure the compliance with safety constraints. If this is mapped to system design (safety guided design), the architectural system design intrinsically reduces hazards and eliminates unsafe control actions to ensure operational safety. As of today, certain properties of potential targets like e.g. mass or stiffness cannot be predicted precisely or only up to a certain margin of error. While STPA is not going to solve these problems, it can help to systematically collect corresponding scenarios, hazards, and losses.

6. Conclusions & Outlook

We have outlined the exemplary execution of STPA for the perception-based activation decision of a pre-crash airbag. The outlined process helps to analyze hazards and losses. While it cannot replace missing stakeholder requirements, measures derived from this analysis can affect system requirements and thereby be incorporated into system design (safety guided design) or as specifications to reduce or minimize losses. The initial steps outlined in this paper are promising and this method is currently applied to the development of advanced pre-crash systems.

Acknowledgements

The authors want to thank the ZF development and simulation team (in alphabetical order): Kiran Balasubramanian, Hans-Peter Bausch, Joachim Cichy, Markus Feil, Kilian Hachmann, Julian Hay, Angelica Knöß, Jürgen Metzger, Arun Muthu, Parthasarathy Nadarajan, Emma Nagel, Dr. Nenad Ocelić, Lars Schories, Peter Weidmann.

References

- [1] Grotz, B., et al. (2021): Predictive Safety – Perception-based Activation of Pre-crash Systems.- ATZ worldwide: 123(1), pp. 18-25, Wiesbaden
- [2] Russ, P., et al. (2021): A Watchful Eye on the Interior.- ATZelectronics worldwide 16, pp. 46-49, Wiesbaden
- [3] Halsdorf, G., et al. (2018): PROSIP: Proactive Side Impact Protection System – Insight into a Scenario Driven Top Down Development Approach.- International Symposium and Accompanying Exhibition on Sophisticated Car Occupant Safety Systems AIRBAG
- [4] Walden, D. D., et al. (2015): INCOSE Systems Engineering Handbook, 4th edition: 604p., John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA
- [5] Leveson, N. G.; Thomas, J. P. (2018): STPA Handbook: 188p.
- [6] Leveson, N. G. (2012): Engineering a Safer World: 560p., MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [7] Abdulkhaleq, A. et al. (2017): Using STPA in Compliance with ISO 26262 for Developing a Safe Architecture for Fully Automated Vehicles.- Automotive - Safety & Security 2017 - Sicherheit und Zuverlässigkeit für automobile Informationstechnik. Gesellschaft für Informatik, pp. 149-162, Bonn.
- [8] Strafaci, A. (2008): What does BIM mean for civil engineers?- CE News, Transportation: 2008: 20(9), pp. 62-65; Chicago, USA

Analyse des Vermeidungspotentials von schweren Lkw-Unfällen mittels Reibwertwarnung

Dr.-Ing. **Gerd Müller**, Fachgruppe Kraftfahrzeuge,
Technische Universität Berlin;

Prof. Dr. **Manfred Thüring**, **Sandra Becker**, M.Sc.,
Institut für Psychologie und Arbeitswissenschaft, Fachgruppe
Kognitionspsychologie & Kognitive Ergonomie,
Technische Universität Berlin;

Dr.-Ing. **Heiko Johannsen**, Dipl.-Ing. **Michael Jänsch**,
Verkehrsunfallforschung, Medizinische Hochschule Hannover

Zusammenfassung

Im Laufe dieses von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) finanzierten Projekts wurde untersucht, welchen Nutzen eine Warnung über geringe Fahrbahnreibwerte für Güterkraftfahrzeuge hat. Mittels einer Probandenstudie im Fahrsimulator der TU Berlin ließen sich Fahrverhalten feststellen, bei denen eine Warnung positive Auswirkungen im Falle eines glättebedingten Unfalles hätten.

Basierend auf einer umfassenden Literaturstudie zu idealen Warnstrategien und zur optimalen Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen war es möglich, zusammen mit einer Expertenrunde und Vorstudien eine wissenschaftlich fundierte Warnstrategie zu konzipieren, die aus akustischen Signalen, Sprachausgaben und grafischen Anzeigen auf einem Head-Up-Display bestehen.

Parallel dazu wurde mittels einer Analyse von Unfällen von schweren Lkw mit vermindertem Kraftschluss ein Überblick über die Unfallsituation von N3-Lkw erarbeitet. Dazu wurden die Daten der GIDAS-Unfalldatenbank (einer repräsentativen Zufallsstichprobe von Verkehrsunfällen mit Personenschaden) untersucht und es wurde ein Subsample der Unfälle, bei denen Kraftschlussminderung eine Rolle gespielt haben könnte, erstellt. Zwei Szenarien wurden hierbei betrachtet: Auffahrunfälle, bei denen der Lkw auf ein Fahrzeug auffährt, sowie Fahrnfälle, bei denen der Lkw-Fahrer die Kontrolle über sein Fahrzeug verliert.

Diese Unfallanalyse bildete die Basis für die Szenariengestaltung der anschließenden Probandenstudie im Fahrsimulator. In der Studie durchfuhren Berufskraftfahrer die präparierten Simulationen, wobei die Experimentalgruppe die Glättewarnung erhielt und eine Kontrollgruppe die gleiche Simulation ohne Warnung durchfuhr. Die Hauptfragestellungen, die sich stellten, waren, ob die Fahrer mit Warnsystem ihr Verhalten (insbesondere ihre Geschwindigkeit) an

den Zustand der Fahrbahn anpassen und ob die Fahrer mit Warnsystem eine bessere Fahrleistung in Gefahrensituationen im Vergleich zu Fahrern ohne Warnsystem zeigen. Zusammenfassend zeigte die Studie, dass die Probanden mit Warnung ihr Fahrverhalten besser an die Glättesituation anpassten als Probanden ohne Warnung.

Im Schlussteil dieses Projektes wurde der Nutzen eines Glättewarnsystems bei Lkw in Bezug auf das Unfallgeschehen analysiert. Mit der Kenntnis der Auswirkung eines Glättewarnsystems auf das Fahrverhalten der Lkw-Fahrer, konnten die Lkw-Unfälle aus der GIDAS-Datenbank durch eine Vorwärtsrekonstruktion simuliert werden, um zu ermitteln, welchen Einfluss das Glättewarnsystem auf den Unfall gehabt hätte. Die Analyse zeigte, dass bei einer angenommenen mittleren Reduktion der Fahrgeschwindigkeit der Lkw-Fahrer um 9,6 km/h bei Tempo 80 aufgrund der Glättewarnung nahezu 30 % der Kollisionen bei Alleinunfällen oder Unfällen mit Beteiligung eines anderen Fahrzeugs sowohl bei den Lkw als auch bei den Kollisionsgegnern vermieden worden wären.

1. Einleitung

Die Überschreitung des möglichen Reibwertpotentials zwischen Fahrbahn und Reifen stellt nach wie vor ein großes Sicherheitsrisiko dar. Während sich mittlerweile Systeme in der Entwicklung befinden, die das aktuelle Reibwertpotential recht verlässlich schätzen können, stellt sich die Frage, auf welche Weise diese Information am besten dem Fahrer zu übermitteln ist. Im hier vorgestellten Forschungsprojekt wurden dafür Warnstrategien entwickelt, welche anschließend in einer Probandenstudie getestet wurden. Dazu wurde zunächst eine umfassende Analyse der GIDAS¹-Datenbank von Unfällen mit N3-Fahrzeugen durchgeführt, um die Umstände von Unfällen bei und durch Glätte genauer zu untersuchen. Gleichzeitig wurde ermittelt, zu welchem Zeitpunkt eine Warnung hätte erfolgen müssen, damit der Fahrer² die Möglichkeit einer adäquaten Reaktion gehabt hätte.

Als Ergebnis des Forschungsprojekts entstand eine Warnstrategie, die in Abhängigkeit des aktuell geschätzten Reibwertpotentials eine zeitlich gestaffelte Warnung ausgibt. Anschließend wurde diese Warnstrategie exemplarisch auf repräsentative Unfälle angewendet, um mittels geeigneter Simulationen das Unfallvermeidungspotential abzuschätzen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden zunächst folgende Projektzwischenschritte benötigt:

¹ German In-Depth Accident Study

² In diesem Paper wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Dabei werden weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.

- Es wurden Erkenntnisse aus umfangreichen Literaturrecherchen über Assistenzsysteme sowie der aktuelle Stand der Warngestaltung gesammelt und in eine Warnstrategie umgesetzt.
- In einer Fokusgruppe mit Experten unterschiedlicher Disziplinen (Ingenieure, Designer und Psychologen) wurde die Warnstrategie vorgestellt und diskutiert. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden für eine optimierte Version des Warnkonzepts eingesetzt, die dann im Fahrsimulator getestet wurde.
- Des Weiteren musste für die Studie die Simulationsumgebung sowie die überarbeitete Warnstrategie in den Fahrsimulator einprogrammiert werden.
- Probanden, Berufskraftfahrer mit den Lkw Führerscheinklassen C1E, C oder CE, mussten akquiriert und eingeladen werden, damit die Studie durchgeführt werden konnte.

2. Warnstrategie

Die Warnstrategie wurde aus einer Literaturrecherche, einem Expertenworkshop und verschiedenen Vorstudien abgeleitet. Sie besteht aus drei Komponenten: einem akustischen Signal, einer Sprachausgabe und einem Glätte-Icon (siehe Abbildung 1).

Das akustische Signal soll die Aufmerksamkeit auf die Warnung lenken, die Sprachausgabe den Grund für die Warnung und Handlungsempfehlungen nennen und das Glätte-Icon eine persistente Information über den aktuellen Glättestatus bieten. Die Warnstrategie gliedert sich außerdem in drei Phasen. Die Vorwarnung wird 500 m vor dem Glättegebiet dargeboten und bereitet den Fahrer auf die bevorstehende Straßenglätte vor. Die eigentliche Warnung erfolgt zu Beginn des Glättegebiets und informiert über die akute Glätte. Die Entwarnung wird präsentiert, sobald das Glättegebiet durchquert wurde. Während der Warnton und die Sprachausgabe nur zu Beginn einer neuen Phase erscheinen, bleibt das Icon als persistente Information während der gesamten Vorwarnungs- und Warnungsphase bestehen, verschwindet aber 200 m nach Verlassen des Gefahrengebiets. Die Wirksamkeit dieser Warnstrategie wurde in der anschließenden Probandenstudie untersucht.

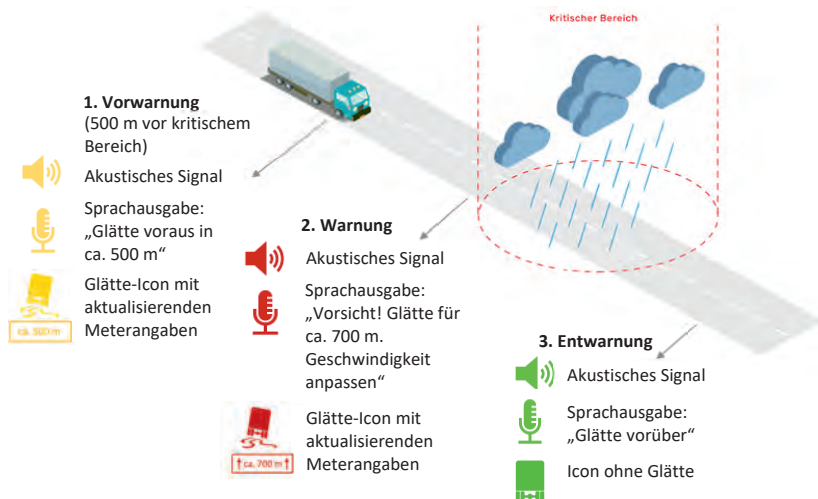


Bild 1: Warnstrategie

3. Probandenstudie

Simulationsumgebung

Der verwendete Fahrsimulator besteht aus einem Echtfahrzeug als Mockup, einer echtzeitfähigen Fahrdynamiksimulation und einer Visualisierungssoftware (SILAB), welche die Fahrbilder auf eine 180°-Leinwand projiziert (Abbildung 2). Als Basisfahrzeug stand ein Pkw zur Verfügung, dessen grundsätzliche Fahreigenschaften an die eines Lkw angepasst wurden. Das betrifft zum einen die Fahrdynamik, zum anderen den Blickwinkel des Fahrers auf die Fahrbahn. Damit konnte ein lkw-ähnliches Fahrgefühl erzeugt werden. Der Fahrer reagiert auf die Umwelteindrücke der Visualisierung und betätigt Lenkrad und Pedalerie. Lenkrad- und Pedalstellungen werden von dem Fahrdynamikmodell in Fahrzeugreaktionen übersetzt und so an den Fahrer zurückgegeben.



Bild 2: Der Fahrsimulator

Die simulierte Strecke bestand aus einer zweispurigen Kraftfahrstraße mit Gegenverkehr. Simuliert wurden drei verschiedene, kritische Streckentypen: S-Kurve (Kurvenradius von 380 m auf 200 m Streckenlänge), Bergkuppe (Steigung: 4 %) und 90°-Kurve mit Nebel (Kurvenradius von 330 m auf 400 m Streckenlänge).

Die Auswahl der 90°-Kurve mit Nebel ermöglichte die Variierung zweier Merkmale von kritischen Straßentypen: starke laterale Bewegungen (Kurven) und Sichteinschränkung (Nebel bzw. Kuppe). Die S-Kurve hat eine starke laterale Bewegung aber wenig Sichteinschränkung. Die Bergkuppe hat Sichteinschränkung aber keine laterale Bewegung, während bei der 90°-Kurve mit Nebel beide Eigenschaften vorhanden sind.

Außerdem wurden die Wetterbedingung und damit Straßenzustand sowie Reibwert in drei Stufen variiert. Bei trockener Fahrbahn lag ein Reibwert von $\mu_{\text{trocken}} = 1$ vor. Bei Regen war die Fahrbahn sichtbar nass, es waren Regentropfen zu sehen und zu hören und der Reibwert lag bei $\mu_{\text{Regen}} = 0,5$. Bei Starkregen war die sichtbare Fahrbahnnässe stärker ausgeprägt als in der Regenbedingung. Auch hier waren Regentropfen sichtbar und hörbar; der Reibwert lag bei $\mu_{\text{Starkregen}} = 0,3$. Die Unterschiede in den Wetterbedingungen waren sowohl visuell und akustisch wahrnehmbar, als auch in der Fahrdynamik spürbar. Bei niedrigerem Reibwert geriet das Fahrzeug leichter ins Rutschen als bei hohem Reibwert.

Methode

Die Wirksamkeit der Warnstrategie wurde in einer Fahrsimulator-Studie mit 20 Lkw-Fahrern untersucht. Dazu wurden die Probanden randomisiert zwei Gruppen zugewiesen: der Experimentalgruppe (EG) wurde die Warnstrategie bei Vorliegen von Glätte präsentiert, während die Kontrollgruppe (KG) keine Warnung erhielt. Die Probanden beider Gruppen durchfuhren unterschiedliche, kritische Strecken (S-Kurve, 90°-Kurve im Nebel, Bergkuppe). Außerdem wurde das Wetter und damit der Straßenzustand bzw. der Reibwert μ variiert. Das Versuchsdesign ist in Tabelle 1 dargestellt. Am Ende der Fahrt erlebten alle Probanden der Studie eine Fahrsituation mit erhöhtem Unfallrisiko (Bergkuppe mit Stauende und Starkregen), die der Untersuchung der Fahrleistung diene. Die Fahrleistung beschreibt an dieser Stelle das Ausmaß, zudem der Fahrer das Handlungsziel einer sicheren und fehlerfreien Fahrt erreichen konnte und ist u.a. abhängig vom Fahrverhalten und der jeweiligen Fahrsituation.

Tabelle 1: Versuchsdesign

Kritischer Streckentyp	Warnung			Ohne Warnung		
	Wetterbedingung			Wetterbedingung		
	trocken $\mu = 1$	Regen $\mu = 0.5$	Stark-regen $\mu = 0.3$	trocken $\mu = 1$	Regen $\mu = 0.5$	Stark-regen $\mu = 0.3$
S-Kurve						
Bergkuppe		EG			KG	
90°-Kurve mit Nebel						
Bergkuppe mit Stauende und Starkregen	EG			KG		

Als abhängige Variablen wurden sowohl objektive als auch subjektive Messgrößen eingesetzt. Als objektives Maß für das Fahrverhalten diente die Geschwindigkeitsreduktion, als objektive Maße für die Fahrleistung wurden die Unfallhäufigkeit, die Häufigkeit von Notausweichmanövern und die minimale Time-to-Collision zum Stauende im letzten Teil des Experiments verwendet. Subjektive Maße waren die vom Fahrer beurteilte Kritikalität, die über ein Single Item nach jeder Fahrsituation erfasst wurde, und die Bewertung der Warnstrategie hinsichtlich Zufriedenheit und Nützlichkeit mithilfe des Akzeptanz-Fragebogens von Van der Laan [1997]. Im Rahmen der Fahrsimulator-Studie sollten folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Passen Fahrer mit dem Warnsystem ihr **Verhalten** (insbes. ihre Geschwindigkeit) besser an den aktuellen Zustand der Fahrbahn an als Fahrer ohne das Warnsystem?
- Zeigen Fahrer mit dem Warnsystem eine **bessere Fahrleistung** als Fahrer ohne das Warnsystem, wenn sie mit einer Gefahrensituation (Stauende hinter einer Bergkuppe) konfrontiert sind?
- Wie schätzen Fahrer die **Kritikalität** der Fahrsituation in Abhängigkeit von den Wetterbedingungen und dem Vorhandensein bzw. Fehlen der Warnstrategie ein?
- Wie fallen **Fahrerbewertungen** der Warnstrategie bzgl. Zufriedenheit und Nützlichkeit aus?

Versuchsablauf

Nach einer Begrüßung und einem Briefing zur Studie absolvierten die Probanden ein kurzes Fahrtraining im Fahrsimulator. Dabei machten sich die Fahrer auf einer Übungsstrecke zunächst mit dem Fahrsimulator vertraut (Lenken, Beschleunigen, Bremsen). In der anschließenden Testphase wurden die Probanden instruiert, dass sie nun auf einer simulierten Kraftfahrstraße fahren werden, auf der sie als Lkw-Fahrer 80 km/h fahren dürfen. Es erfolgte keine Instruktion zu den Wetterbedingungen oder zur Warnstrategie. Die Testphase bestand aus drei Durchgängen mit je 3 kritischen Fahrsituationen (Kombination aus kritischem Streckentyp und Wetterbedingung). Kritische Streckentypen und Wetterbedingungen wurden randomisiert dargeboten. Zuletzt erlebten alle Probanden die Fahrsituation mit erhöhtem Unfallrisiko (Bergkuppe mit Stauende). Nach jeder Fahrsituation wurde die subjektive Kritikalität verbal erhoben. Die Probanden schätzten dabei die Kritikalität auf einer Skala von 1 (gar nicht kritisch) bis 10 (sehr kritisch) ein. Nach der Testphase im Fahrsimulator füllten die Probanden mit Warnung einen Akzeptanzfragebogen zur Warnstrategie aus. Zum Schluss folgten ein Interview, das Ausfüllen eines demografischen Fragebogens und ein Debriefing.

Ergebnisse der Fahrsimulatorstudie

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Probanden in der Gruppe mit Warnung ihr Fahrverhalten besser an die Glättesituationen anpassten als Probanden in der Gruppe ohne Warnung. In der Experimentalgruppe wurde die Geschwindigkeit früher und deutlich stärker reduziert als in der Kontrollgruppe. Bezogen auf die Fahrleistung zeigte sich ein Trend in Richtung einer Verbesserung durch die Warnstrategie. Zukünftige Studien sollten den Einfluss von

Glättewarnungen auf die Fahrleistung mit einer höheren Anzahl an Probanden genauer untersuchen, um diesen Trend zu verifizieren.

Bezüglich der subjektiven Kritikalitätsbewertung der Fahrsituationen zeigte sich kein Unterschied zwischen den Gruppen. Fahrsituationen mit Regen oder Starkregen werden jedoch als kritischer empfunden als dieselben Fahrsituationen mit trockener Fahrbahn.

Die aus dem Fragebogen und dem Interview gewonnenen Daten belegen, dass die Warnstrategie als sehr nützlich, hilfreich und zufriedenstellend bewertet wurde. Die Kombination der drei Komponenten Sprachausgabe, Warnton und Icon wurde von der großen Mehrheit der Probanden als sinnvoll erachtet. Eine mögliche Einschränkung der Nützlichkeit könnte in einer potenziellen Informationsüberladung und Ablenkungsgefahr bestehen. Bezüglich der visuellen Komponente äußerten mehrere Probanden, dass die Darstellung des Icons in einem Head-Up-Display sehr sinnvoll war, da keine Aufmerksamkeitsabkehr von der Straße nötig war, um das Symbol wahrzunehmen.

Zusammenfassend hat die Studie gezeigt, dass die entwickelte Warnstrategie zu angemessenem Fahrverhalten in Glättesituationen führt und von Lkw-Fahrern als positiv und hilfreich bewertet wird. Glättewarnungen haben also das Potenzial, auch außerhalb des Labors akzeptiert und genutzt zu werden und die Sicherheit im Verkehr zu erhöhen.

4. Unfallvermeidungspotential

Im Rahmen dieses Kapitels wird der Nutzen eines Glättewarnsystems für schwere Lkw hinsichtlich der Vermeidung von Unfällen bzw. der Minderung der Unfallschwere analysiert.

Die Analyse des Nutzens einer Glättewarnung erfolgt mit Hilfe der 444 schweren Lkw (N3-Fahrzeuge oder Sattelzugmaschinen), die an 393 Unfällen beteiligt waren, bei denen eine Kraftschlussminderung vorhanden war. Diese machen einen Anteil von 26,4 % an allen 1.486 Unfällen mit Beteiligung von schweren Lkw der GIDAS Datenbank der Jahre 1999-2019 aus. Durch eine Auswahl der Unfalltypen, bei denen eine Glättewarnung - und die damit einhergehende Verringerung der Fahrgeschwindigkeit - einen positiven Einfluss auf die Unfallschwere haben kann, verbleiben 175 Unfälle. So wurden z.B. Unfalltypen, bei denen das Übersehen eines anderen Verkehrsteilnehmers wahrscheinlich ist, nicht weiter berücksichtigt. Somit haben 12 % aller Unfälle mit schweren Lkw das Potential durch eine Glättewarnung positiv beeinflusst zu werden.

Im nächsten Schritt wurden durch die Fahrsimulatorversuche 2 Reduktionen der Fahrgeschwindigkeiten der Probanden als Reaktion auf eine Glättewarnung bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von ca. 80 km/h für die weitere Analyse ausgewählt: Die maximale Geschwin-

digkeitsdifferenz der Experimentalgruppe zur Kontrollgruppe (18,4 km/h) und die durchschnittliche Geschwindigkeitsdifferenz der Experimentalgruppe zur Kontrollgruppe im Glättbereich (9,6 km/h). Diese in den Fahrsimulatorversuchen bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h ermittelten Geschwindigkeitsdifferenzen wurden für die weitere Analyse der Realunfälle relativ zur realen Ausgangsgeschwindigkeit v_0 benutzt. Die resultierenden Reduktionen errechnen sich somit wie folgt:

$$\text{Reduktion}_{\text{mittel}}(v_0) = 9,6 \text{ km/h} * v_0 / 80 \text{ km/h}$$

$$\text{Reduktion}_{\text{max}}(v_0) = 18,4 \text{ km/h} * v_0 / 80 \text{ km/h}.$$

Um den Einfluss einer Glättewarnung auf das Unfallgeschehen auszuwerten, wurden Unfälle der MHH-Unfallforschung mit der Annahme, dass die Fahrzeugführer der Lkw vor dem Unfall ihre Fahrgeschwindigkeit entsprechend der maximalen und der durchschnittlichen Geschwindigkeitsreduktion verringert hätten, simuliert. Von den relevanten 175 Unfällen waren 108 Unfälle aus Hannover (und standen damit der MHH zur Simulation zur Verfügung). Hiervon waren bei 91 Unfällen alle nötigen Fallinformationen für eine Simulation vorhanden.

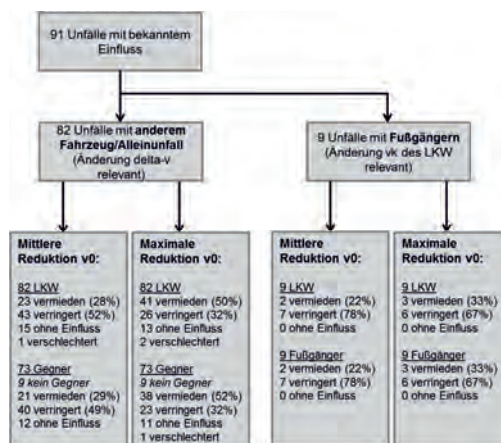


Bild 3: Analyse des Nutzens von Glättewarnungen bei ausgewählten (relevanten) Lkw-Unfällen

Davon waren 82 Unfälle Alleinunfälle oder Unfälle mit einem anderen Fahrzeug, (siehe Abbildung 3). Neun Unfälle waren Unfälle mit einem Fußgänger. Die Fußgängerunfälle wurden getrennt betrachtet, da hier die resultierende Änderung der Kollisionsgeschwindigkeit (v_k) des

Lkw ausschlaggebend für die Verletzungsschwere des Fußgängers ist, während bei den Alleinunfällen und den Kollisionen mit einem anderen Fahrzeug die stoßbedingte Geschwindigkeitsänderung (Δv) ausschlaggebend für eine Änderung der Unfallschwere ist.

Ergebnisse der Simulation

Bei den Alleinunfällen bzw. den Unfällen mit einem anderen Fahrzeug wurden bei angenommener mittlerer Reduktion der Fahrgeschwindigkeit 28 % der Kollisionen der Lkw und 29 % der Kollisionen der Unfallgegner vermieden. Weiterhin wurden bei 52 % der Alleinunfälle bzw. bei 49 % der anderen Kollisionen die Kollisionsschwere vermindert. Bei angenommener maximaler Reduktion der Fahrgeschwindigkeit steigt der Anteil der vermiedenen Kollisionen sogar ungefähr auf die Hälfte der Fälle.

Bei den Unfällen mit Fußgängern wurden 22 % der Kollisionen (mittlere Reduktion) bzw. 33 % der Kollisionen (maximale Reduktion) vermieden. Die verbliebenen Kollisionen wurden zumindest hinsichtlich der Kollisionsgeschwindigkeit des Lkw reduziert.

Im nächsten Schritt wurde bei jenen Beteiligten, bei denen sich die Kollisionsschwere verringerte, mittels Verletzungsrisikokurven ausgewertet, wie sich die maximale Verletzungsschwere der Fahrzeuginsassen verringern würde. Hier zeigte sich, dass selbst die mittlere Reduktion der Fahrgeschwindigkeit auch bei Fällen mit ursprünglich schweren Verletzungen häufig mit hoher Wahrscheinlichkeit keine ernsthaften Verletzungen (< MAIS 2) zur Folge gehabt hätte. Bei den Fußgängerunfällen konnte aufgrund unzureichender Daten keine sinnvolle Analyse der Verletzungsreduzierung der Fußgänger durchgeführt werden. Hier scheint die Abhängigkeit der Verletzungsschwere von der Kollisionsgeschwindigkeit des Lkw im Gegensatz zu Kollisionen zwischen Pkw und Fußgängern nicht ausreichend stark ausgeprägt zu sein. Erwartungsgemäß wurden die an Fußgängerunfällen beteiligten Lkw-Fahrer in keinem der ausgewerteten Fälle verletzt, so dass hier eine Analyse der Verletzungsschwerereduktion nicht durchgeführt wurde.

Zusammengefasst zeigt die Analyse, dass eine Glättewarnung für Lkw bei 12 % aller Unfälle einen positiven Effekt immer Sinne der Unfallvermeidung bzw. der Schwereminderung gehabt hätte. Bei einer angenommenen mittleren Reduktion der Fahrgeschwindigkeit der Lkw-Fahrer (um 9,6 km/h bei Tempo 80) aufgrund der Glättewarnung wären in dieser Gruppe nahezu 30 % der Kollisionen bei Alleinunfällen oder Unfällen mit Beteiligung eines anderen Fahrzeugs sowohl bei den Lkw als auch bei den Kollisionsgegnern vermieden worden. Ferner hätten mehr als die Hälfte der Lkw und der Kollisionsgegner geringere Kollisionsschweren (Δv) gehabt. Mittels Verletzungsrisikokurven konnte gezeigt werden, dass durch die geringeren Kollisionschweren das Risiko, ernsthafte oder schwerere Verletzungen zu erleiden, deutlich gesunken

ist. Bei den Lkw Unfällen mit Fußgängern wären von 9 analysierten Unfällen 2 vermieden worden.

Quellen:

[Van der Laan, 1997] Van der Laan, J.D.; Heino, A.; De Waard, D.: A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1997, 5. Jg., Nr. 1, S. 1-10.

Danksagung:

Die Autoren bedanken sich bei der Bundesanstalt für Straßenwesen für die angenehme und stets konstruktive Zusammenarbeit bei diesem Forschungsprojekt, dessen Durchführung unter Pandemiebedingungen nicht immer einfach war.

Dieser Präsentation liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE-Nr. 82.0733/2019 durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein bei den Autoren.

This presentation is based on parts of the research project carried out at the request of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, represented by the Federal Highway Research Institute, under research project No. 82.0733/2019.

The authors are solely responsible for the content.

Warnstrategien für automatisiertes Fahren aus einer nutzerzentrierten Perspektive

Eine Untersuchung von Frontal-Collision-Warning und Take-Over-Request mittels multimodaler Warnstrategien

Dr.-Ing. **Lisa Diwischek**,
Joyson Safety Systems Aschaffenburg GmbH, Berlin

Zusammenfassung

Automatisiertes Fahren wird über eine längere Zeitspanne durch Fahrzeuge geprägt sein, die verschiedene Automationslevel simultan anbieten. Höhere Level (SAE Stufe 3 oder 4) werden weiterhin abschaltbar bleiben und der Fahrer soll auf Wunsch in der Lage sein, das System abzuschalten. Dadurch ergibt sich die Schwierigkeit, verschiedene Warnstrategien für die unterschiedlichen Automationslevel optimal auszulegen: Insbesondere die Möglichkeit, sich bei höherer Automation von der Fahraufgabe und damit vom Lenkrad ab- und Sekundäraufgaben zuzuwenden, stellt andere Anforderungen an ein Warnkonzept als eine Situation, bei der der Fahrer idealerweise beide Hände am Lenkrad hat. Es gibt mittlerweile ein breites Portfolio von diversen Einzellösungen, aus denen sich die jeweiligen Automobilhersteller ihre multimodalen Warnstrategien zusammenstellen können. Eine offensichtliche Schwierigkeit ergibt sich dabei in der Abstimmung der diversen Warnmodalitäten miteinander, aber auch auf das jeweilige Automationslevel.

In dieser Studie wird eine Untersuchung zu multimodalen Warnstrategien mit unterschiedlichen Warnungsträgern vorgestellt. Die Versuchsträger sind reale Mensch-Maschine-Schnittstellen im Fahrzeug und werden folgendermaßen umgesetzt: Eine Versuchsbedingung ohne Warnung, eine Bedingungen Warnung im Lenkrad mittels einer sogenannten Lightbar im oberen Lenkradkranz (11-1 Uhr-Position), eine Kombination aus Lightbar mit neuartigen vibrotaktilen Aktuatoren am Lenkrad und eine Kombination aus Lightbar und gurtbasierten vibrotaktilen Warnungen (Motorized Seatbelt, MSB) wurden in Vortests auf ihre jeweiligen Optima analysiert und ausgelegt. In der Hauptstudie wurden die oben genannten Warnkombinationen während manueller und automatisierter Fahrt untersucht.

Somit kann für verschiedene Szenarien und ihren daraus resultierenden Anforderungen die optimale Warnstrategie abgeleitet und für die Auslegung von Systemen mit mehreren möglichen Automationsleveln umgesetzt werden.

Abstract

Automated driving will be characterized over a longer period of time by vehicles that offer different automation levels simultaneously. Higher levels (SAE level 3 or 4) will remain disengageable and the driver should be able to switch off the system at the driver's request. This raises the difficulty of optimally designing different warning strategies for different automation levels: In particular, the possibility of turning away from the driving task and thus from the steering wheel to secondary tasks in the case of higher automation places different demands on a warning concept than a situation in which the driver ideally has both hands on the steering wheel. There is now a broad portfolio of various individual solutions from which the respective automobile manufacturers can put together their multimodal warning strategies. An obvious difficulty arises in the coordination of the various warning modalities with each other, but also with the respective automation level.

In this study, an investigation on multimodal warning strategies with different warning carriers is presented. The test carriers are real human-machine interfaces in the vehicle and are implemented as follows: A test condition without warning, a condition warning in the steering wheel by means of a so-called lightbar in the upper steering wheel rim (11-1 o'clock position), a combination of lightbar with novel vibrotactile actuators on the steering wheel and a combination of lightbar and belt-based vibrotactile warnings (Motorized Seatbelt, MSB) were investigated and designed for their respective optima in pre-tests. In the main study, the above warning combinations were investigated during manual and automated driving.

Thus, the optimal warning strategy can be derived for different scenarios and their resulting requirements and implemented for the design of systems with several possible automation levels.

1. Einleitung

Eine Reihe von Gründen spricht für die Automatisierung von bestimmten Fahraufgaben; nicht zuletzt die Reduktion von durch menschliche Fehler verursachten Unfällen. Bekanntermaßen wird dadurch jedoch eine ganze Anzahl von neuen Fehlerursachen erzeugt. Zahlreiche Untersuchungen zu *Clumsy Automation*, *Supervisory Control*, *Situation Awareness*, *Automation Bias*, *Trust in Automation* und *Complacency* [1] gibt es sowohl in der Fahrzeugdomäne als auch in der Luftfahrt oder den Untersuchungen zu Leitwarten, in denen Automatisierung sehr viel früher stattgefunden hat. Im Fokus stehen bei ersterem häufig die sogenannten Take-over-Requests (TOR), bei denen die Automation an ihre Systemgrenzen gelangt und die Fahraufgabe an einen mehr oder weniger bereiten Fahrer zurückgibt. Solange es jedoch techni-

sche und nutzerbedingte Anforderungen gibt, die weiterhin eine manuelle Steuerung des Fahrzeugs in bestimmten Situationen erfordern, wird es auch weiterhin konventionelle Warnungen im manuellen Fahren geben müssen, wie beispielsweise Forward-Collision-Warning oder Spurverlassenswarnung. Idealerweise können hierbei Synergieeffekte genutzt werden, um Kosten und technischen Aufwand zu reduzieren. Ziel der vorliegenden Studie ist es, verschiedene Warnkombinationen hinsichtlich ihrer Eignung für manuelles und automatisiertes Fahren zu untersuchen.

2. Theoretischer Hintergrund

Multimodale Warnstrategien haben in einer Vielzahl von Anwendungen mit hohen visuellen Anforderungen ihren Nutzen erwiesen [2]–[5]; der Fahrzeugkontext ist einer davon. Mehrere Faktoren spielen dabei eine kritische Rolle: die Ein- oder Mehrstufigkeit der Warnung (von Information zu Vorwarnung, Warnung und akuter Warnung, s. [6], der Warnzeitpunkt, und die Modalitätenkombination). Die am häufigsten verwendete Modalitätskombination stellt dabei die eines visuellen Reizes in Kopplung mit einem akustischen Warnsignal dar; allerdings werden zunehmend auch vibrotaktile Warnungen eingesetzt (s. [7]). Wenn lediglich eine Modalität genutzt wird, entstehen spezifische Nachteile: komplexe Informationen können vorrangig über visuelle Anzeigen oder Sprachinformationen transportiert werden [8], die jedoch vergleichsweise langsam verarbeitet werden können. Eine schnellere Reaktion rufen akustische oder vibrotaktile Warnungen hervor [9]; sie können dafür wenig semantische Information transportieren und damit zu Orientierungsreaktion führen. Multimodale Warnungen sollen demgegenüber die verschiedenen Aspekte einer Gefahrensituation aufzeigen, Redundanzen erzeugen und eine größere Menge an Informationen transportieren [10]. Ein weiterer wichtiger Aspekt von multimodalen Warnungen ist die angemessene Wahl des Warnortes. Komplexe visuelle Informationen werden deshalb in der direkten Sichtlinie des Fahrers dargestellt, während im peripheren Blickfeld Bewegung, Helligkeitsänderungen und neu erscheinende Objekte besonders gut wahrgenommen werden. Akustische Warnungen werden üblicherweise über die Lautsprecher des Infotainmentsystems transportiert; bei vibrotaktilen Warnungen bieten sich Lenkrad, Sicherheitsgurt, Pedale oder der Sitz an. Am häufigsten finden sich in Literatur und in der Praxis vibrotaktile Warnungen am Lenkrad, da hier die Sensitivität besonders hoch ist¹; den häufigsten Anwendungsfall stellen dabei Spurverlassenswarnungen dar [12]. [13] untersuchten in einer Fahrsimulatorstudie Forward-Collision-Warning durch Vibration des Lenkrads und

¹ Für einen Überblick über verschiedene Charakteristika eines vibrotaktilen Reizes und seiner Optimierung s. [11].

des Sicherheitsgurts und fanden heraus, dass vibrotaktile Warnungen im Vergleich zu keiner Warnung zu kürzeren Reaktionszeiten und weniger Kollisionen führen und von den Benutzern gut akzeptiert werden. [14] hat verschiedene Technologien vibrotaktile Warnungen am Lenkrad untersucht und dabei Vor- und Nachteile der vibrotaktile Aktuatoren festgestellt. Dabei konnten insbesondere Vorteile für den Anwendungsfall einer früheren, ggf. mehrstufigen, Warnung für die in der vorliegenden Studie ebenfalls verwendeten vibrotaktile Aktuatoren gezeigt werden.

Während die Reduktion von Ablenkung bereits bei der Gestaltung eines unimodalen Warnhinweises wichtig ist, wird sie mit einer zunehmenden Anzahl kombinierter Modalitäten noch wichtiger. Der Benutzer sollte niemals durch eine höhere Anzahl von Warnhinweisen irritiert oder im schlimmsten Fall so aus dem Konzept gebracht werden, dass der Warnhinweis ablenkt und somit eher schadet als nützt. Die DIN EN ISO 14915, Teil 3: 2002 bietet eine klare Reihe von Gestaltungsprinzipien, indem sie postuliert, dass Kombinationen von Modalitäten eine thematische Kongruenz, eine überschaubare Informationslast und sich gegenseitig ergänzende Schwerpunkte haben sollten, um Konsistenz und Redundanz zu unterstützen; aber dies ist eine Norm, die sich eher mit Software als mit Warnungen beim Fahren beschäftigt.

Auch die Benutzerakzeptanz muss berücksichtigt werden. [15] verwendeten in einer Simulatorstudie ein taktiles Warngerät am Fahrersitz, das besser funktionierte als akustische oder visuelle Warnungen. Da diese Art von Warnung für die Probanden ungewohnt war, war die Nutzerakzeptanz niedrig. Eine Vielzahl von Faktoren muss also berücksichtigt und evaluiert werden, wenn multimodale Schnittstellen untersucht werden.

3. Methodik

In der vorliegenden Studie wurden aus dem Produktportfolio der Vorentwicklung von Joyson Safety Systems drei verschiedene Warnschnittstellen evaluiert: die Lightbar, ein RGB LED-Band im oberen Lenkradkranz zwischen 11 und 1 Uhr – Position; zwei simultan geschaltete Vibrationsaktuatoren an den Lenkradspeichen in der 3 und in der 9 Uhr – Position; und Vibrationsaktuatoren am Sicherheitsgurt, der sogenannte Motorized Seatbelt (MSB). Alle drei Produkte sind in der Lage, Warnungen zu übermitteln; die Lightbar in der visuellen Modalität, die Vibrationsaktuatoren in der vibrotaktile. Ziel der Studie war es, verschiedene Warnstrategien als Kombinationen dieser drei Warnträger in einer Fahrsimulatorstudie zu untersuchen. Diese Kombinationen bestanden dabei aus Lightbar und MSB, Lightbar und Lenkradvibration, und Lightbar ohne zusätzliche Vibrationen. Alle drei Warnstrategien wurden mit einer Baselinebedingung verglichen.

Hauptfragestellung der Untersuchung ist die klassische Definition der Usability nach [16]: das Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen. Effektivität wurde in der vorliegenden Studie durch Fahrdaten, Effizienz durch Brems-, Loslassen des Gaspedals-, und Lenkeingaben-Reaktionszeit sowie mentalen Workload operationalisiert. Die Nutzerzufriedenheit wurde mittels einer subjektiven Akzeptanz-Einschätzung [17], eines Präferenzratings und qualitativem Feedback gemessen.

Die Versuche fanden im Februar und März 2021 statt. Durch die Covid-19-Situation konnten keine externen Probanden, sondern nur Mitarbeiter von Joyson Safety Systems getestet werden. Insgesamt wurden 32 Versuchspersonen getestet, davon waren sechs weiblich. Eine Ausbalancierung der Altersgruppen hinsichtlich [18] wurde zwar initial angestrebt, konnte aber durch rein interne Probanden nicht realisiert werden. Alle Teilnehmer waren im Besitz eines Führerscheins und hatten keine Einschränkungen in akustischer oder vibrotaktiler Wahrnehmungsfähigkeit. Unterschiedliche jährliche Fahrleistungen werden durch das Probandenkollektiv abgedeckt; 25 Studienteilnehmer haben Erfahrung mit Fahrsimulatoren.

Das experimentelle Design ist Within-Subjects, jeder Proband ist also jede Bedingung einmal gefahren, um Ermüdungs-, Reihenfolge- oder Lerneffekte abzumildern oder möglichst auszuschließen. Der Fahrsimulator nutzt die SILAB-Software [19] als Simulationssoftware mit einem Sichtfeld von 117 ° (horizontal) und 47° (vertikal). Im Fahrsimulator befindet sich eine Viertelkarosse mit angebaute Beifahrersitzplatz und Automatikschaltung. Über die vier Versuchsbedingungen ausbalanciert führen die Probanden vier Strecken mit jeweils 3-5 Minuten manueller Fahrt auf der Landstraße mit einer Forward-Collision-Warning (FCW) und eine 6- bis 8-minütige Fahrt auf der Autobahn mit einer Übernahmeaufforderung bzw. TOR. Zu beachten ist, dass es bei letzterem keine Baseline, also keinen Ausfall der Automation ohne Warnung, gab, aus zwei Gründen: erstens ist es extrem unwahrscheinlich, dass ein System ohne Warnfunktion implementiert wird, und zweitens würden Probanden höchstwahrscheinlich in den Akzeptanzfragen über das Gesamtsystem „automatisiertes Fahren“, dessen unerwarteten Ausfall und nicht eine Warnschnittstelle urteilen; somit wären die verschiedenen Bedingungen inhaltlich nicht vergleichbar.

Nach der Begrüßung unterzeichneten die Probanden eine Einverständniserklärung und füllten einen demographischen Fragebogen aus. Danach wurde eine Nebenaufgabe (1-back-task) und das Fahren im Fahrsimulator geübt. Anschließend wurden die vier Versuchsbedingungen gefahren, wobei nach jeder Fahrt der NASA-TLX [20] für die Workload-Messung und die Akzeptanzfragebögen [17] ausgefüllt wurden. Am Ende wurde ein vollständiger Paarvergleich

[21] über alle Bedingungen hinweg gemacht. Insgesamt dauerte der Versuch pro Proband ca. 90 Minuten.

4. Ergebnisse

Generell wurden alle Daten auf die Voraussetzungen für eine Varianzanalyse geprüft und die Verfahren entsprechend angepasst, wenn eine oder mehrere der Voraussetzungen verletzt war.

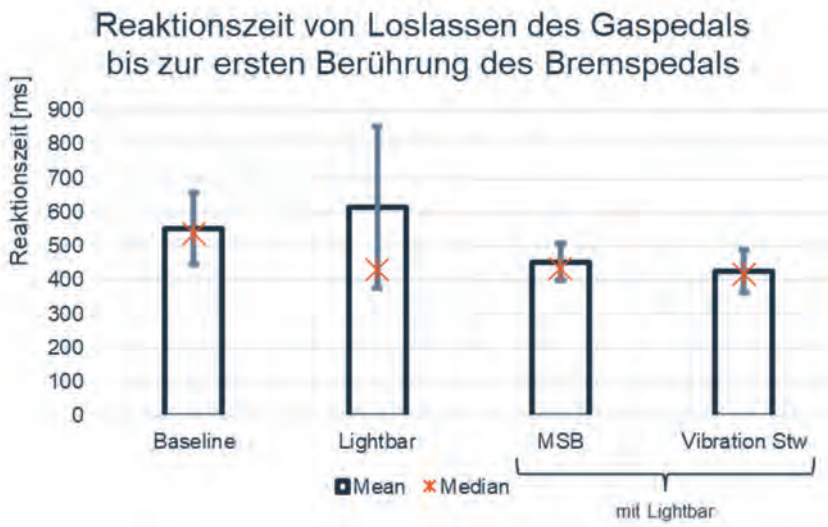


Bild 1: Gesamte Bremsreaktionszeit für FCW.

In den Fahrdaten gab es wenig signifikante Unterschiede, sowohl für das Landstraßen- als auch für das Autobahnszenario mit TOR. Einzige Ausnahme war die Standardabweichung der Geschwindigkeit auf der Landstraße, wo es einen signifikanten Unterschied zwischen Lightbar und MSB mit Lightbar gab, wobei die Lightbar eine leicht niedrigere Standardabweichung hatte. In absoluten Zahlen handelt es sich hier jedoch um 2 km/h, was bei 27,44 und 30,05 einen vernachlässigbaren Wert darstellt. Auch in den Reaktionszeiten zeigen sich keine signifikanten Unterschiede. Auf einer deskriptiven Ebene interessant ist, dass sich sowohl bei der Landstraße als auch bei dem Autobahnszenario der gleiche Trend beobachten lässt: Reaktionen erfolgen schneller bei multimodaler gegenüber unimodaler Warnung, was der bekannten

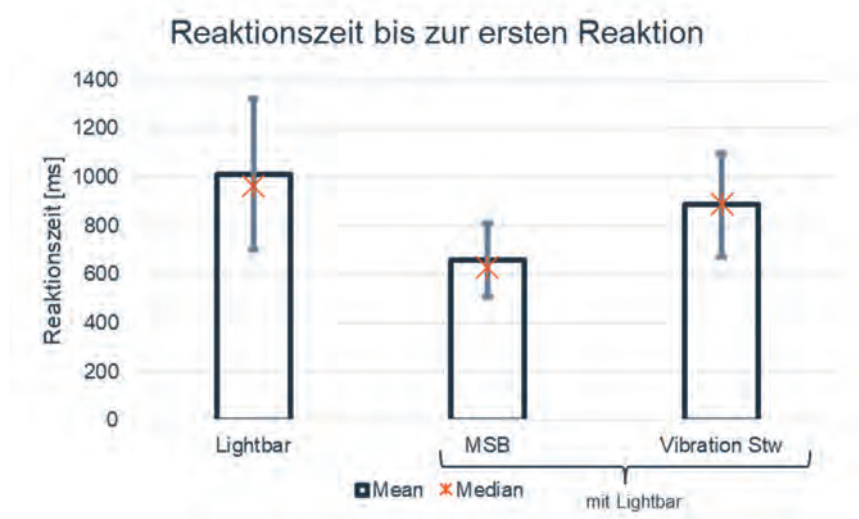


Bild 2: Reaktionszeit für TOR.

Literatur entspricht. Die deskriptiven Unterschiede sind beim TOR zwischen MSB und Vibration Steering Wheel höher als bei der FCW (vgl. dazu Abbildungen 1 und 2). Auch die Art der Reaktion unterschied sich weder bei TOR noch FCW zwischen den verschiedenen Warnungen; insgesamt wurde häufiger zuerst eine Bremsreaktion als eine Lenkkorrektur vorgenommen. Da die Fragebögen für beide Bedingungen (FCW und TOR) zusammen ausgefüllt wurden, treffen die folgenden Daten für beide Bedingungen geltende Aussagen: In den Workload-Daten wurden signifikante Unterschiede mittels einer robusten ANOVA ($F_{1,91,36,24} = 6.38$, $p = .005$) gefunden. Ein robuster Posthoc-Test zeigte, dass der Gesamt-Workload in der Baseline im Vergleich zum MSB signifikant niedriger war ($\psi = -9.12$ [-18.10, -0.14], $p = .008$). In den Subskalen gab es keine signifikanten Unterschiede. Bei der Akzeptanzskala wurde die Gesamtakzeptanz mit einer robusten ANOVA signifikant ($F_{3,57} = 5.24$, $p = .003$), es gab jedoch keine signifikanten Effekte in den Posthoc-Tests. In den Subskalen gab es keine Effekte in der Zufriedenheit, in der Nützlichkeit gab es jedoch signifikante Unterschiede ($F_{2,69,51,06} = 7.88$, $p = .0003$). In den Posthoc-Tests zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen jeweils Baseline ($\psi = 0.59$ [0.12, 10.6], $p = .002$) und MSB ($\psi = -0.68$ [-1.21, -0.15], $p = .001$) gegenüber der Lightbar, die als weniger nützlich bewertet wurde (vgl. Abbildung 3). Im vollständigen Paarvergleich, der über FCW und TOR hinweg konsistent war, wurde MSB mit Lightbar am besten,

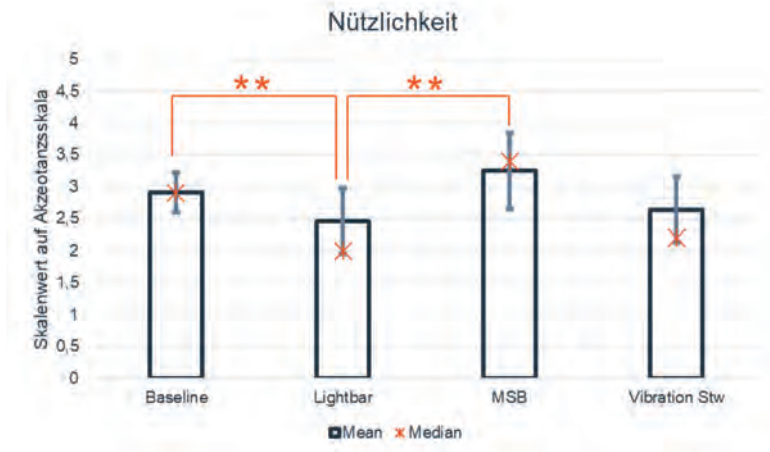


Bild 3: Subskala Nützlichkeit.

als zweites die Lightbar ohne Vibration, als drittes Vibrationsaktuatoren am Lenkrad und Lightbar, und als schlechtestes im FCW-Fall die Baseline bewertet.

In den Kommentaren wurde unter anderem hervorgehoben, dass eine zusätzliche Vibrationswarnung zur Lightbar durchaus wünschenswert sei. Die vergleichsweise starke Vibration am Sicherheitsgurt wurde teilweise als zu stark empfunden; der Vorteil für Hands-off-Situationen wurde jedoch deutlich durch die Probanden gesehen. Komplementär dazu wurde dies als Nachteil für die Vibration am Lenkrad beschrieben, die auch von manchen Probanden als zu schwach empfunden wurde.

5. Diskussion und Ausblick

Ziel dieser Studie war es, Unterschiede zwischen verschiedenen Modalitätenkombinationen von Warnschnittstellen zu untersuchen und festzustellen, ob es Unterschiede hinsichtlich Effektivität, Effizienz und Nutzerzufriedenheit zwischen einer FCW im manuellen Fahren oder einem TOR nach einer automatisierten Fahrt gibt. Zusammenfassend lässt sich über die Effizienz- und Effektivitätsdaten sagen, dass es kaum nennenswerte signifikante Unterschiede gibt, außer dem Unterschied zwischen MSB mit Lightbar und Lightbar ohne vibrotaktilen Feedback, und sich auf dieser Datengrundlage alle drei Warnschnittstellen gleichermaßen für TOR und FCW zu eignen scheinen. Im Bereich der Reaktionszeiten, wo hundert Millisekunden einen wichtigen Unterschied ausmachen können, kann im Einklang mit der bestehenden Literatur festgestellt werden, dass die multimodalen Schnittstellen einer unimodalen bzw. keiner

Warnschnittstelle gegenüber einen Vorteil in schnelleren Reaktionen, zumindest auf deskriptiver Ebene, verbuchen können. In Hinblick auf die subjektiven Ergebnisse sind die Daten nicht eindeutig. Zumindest der MSB hat einen signifikant höheren Workload als die Baseline. Beide werden als signifikant nützlicher als die Lightbar ohne Vibrationswarnung eingeschätzt, was sich auch mit den qualitativen Kommentaren deckt, dass eine zusätzliche Vibrationswarnung zur Lightbar gewünscht wird. Trotz der eher positiven Workload- und Akzeptanzratings belegt die Baseline ohne Warnungen den letzten Platz im Präferenzrating für beide Anwendungsfälle, FCW und TOR. Eine Optimierung der Vibrationswarnung am Lenkrad scheint für den Hands-on – Fall wünschenswert zu sein, da diese Kombination in der Präferenz nur den vorletzten Platz belegt. Trotz des möglicherweise durch die Intensität der Warnung hervorgerufene negative Workloadrating scheint der MSB mit Lightbar die präferierte Warnkombination zu sein, was sich auch mit den deskriptiven Reaktionszeiten und den qualitativen Kommentaren deckt. Die durchgeführte Studie hatte einige Nachteile, die hier erwähnt werden sollten. Die Vergleichbarkeit von MSB und Vibrationsaktuatoren am Lenkrad ist nur sehr bedingt möglich, da es sich um technologisch verschiedene Aktuatoren an verschiedenen Körperstellen mit einer unterschiedlichen Dichte von Sensorzellen handelt. Weder die objektive Aktuatorik noch die subjektive Wahrnehmung, Verarbeitung und Integration sind damit unmittelbar vergleichbar. Um das Signal des Aktuators am Lenkrad stärker und damit für eine dringende Warnung besser geeignet zu machen, wäre weitere Forschung erforderlich. Möglicherweise sind durch das gemeinsame Ausfüllen der Fragebögen nach FCW und TOR gewisse Überlagerungseffekte entstanden, die die Bewertung verzerren. Ein großer Vorteil der Studie ist die Testanlage im Fahrsimulator mit der detaillierten und realistischen Verkehrsumgebungssimulation, die eine hohe ökologische Validität des Experiments gewährleistet, und Untersuchungen ermöglicht, die im realen Straßenverkehr nachzustellen zu gefährlich wären. Es ist dabei zu beachten, dass im realen Fahrzeug andere Schwingungen von der Lenksäule, den Reifen und den Straßenverhältnissen ausgehen, die die Wahrnehmung beeinflussen. Aufgrund der örtlichen Beschränkungen in der Pandemiesituation war es nicht möglich, externe Probanden zu testen, was dazu führte, dass die Tetrichtlinien der NHTSA nicht erfüllt wurden, die eine gleichmäßige Verteilung von Geschlecht und Altersgruppen empfehlen. Mit einem Anteil von nur einem Viertel, waren die unter 25-Jährigen und die über 39-Jährigen in dieser Stichprobe unterrepräsentiert. Dies ist insofern ein Nachteil, als Studien zeigen, dass das Alter einen Einfluss auf die Wahrnehmung von taktilen Warnungen haben kann [21]. Frauen machten nur ein knappes Fünftel der Stichprobe aus und alle Teilnehmer arbeiteten in der Automobilbranche. Eine repräsentativere Stichprobe von Endnutzern hätte zu anderen Ergebnissen führen können. Da

es sich um Angestellte des Unternehmens handelte, könnte dies ihre Einschätzung des Fragebogens hinsichtlich der sozialen Erwünschtheit verstärkt haben und sie könnten die Konzepte generell positiver bewertet haben als externe Personen. Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Optimierung der Vibrationssignale an die Gesamtkonzepte der jeweiligen Anwendungsfälle, insbesondere in Hinblick auf realistische Umgebungsvibrationen.

6. Literatur

- [1] T. Vogelpohl, M. Vollrath, M. Kühn, T. Hummel, und T. Gehlert, „Übergabe von hoch-automatisiertem Fahren zu manueller Steuerung“, *Berl. GDV*, 2016.
- [2] K. A. Latorella, „Investigating Interruptions: Implications for Flightdeck Performance“, Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA, 1999.
- [3] B. J. Brickman, L. J. Hettinger, und M. W. Haas, „Multisensory Interface Design for Complex Task Domains: Replacing Information Overload With Meaning in Tactical Crew Stations“, *Int. J. Aviat. Psychol.*, Bd. 10, Nr. 3, S. 273–290, 2000, doi: 10.1207/S15327108IJAP1003_04.
- [4] M. I. Nikolic und N. B. Sarter, „Peripheral Visual Feedback: A Powerful Means of Supporting Effective Attention Allocation in Event-Driven, Data-Rich Environments“, *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, Bd. 43, Nr. 1, S. 30–38, 2001, doi: 10.1518/001872001775992525.
- [5] Cristy Ho und Charles Spence, „The Multisensory Driver: Implications for Ergonomic Car Interface Design - Chapter one Introduction“, in *Multisensory Driver*, London: Ashgate, 2008, S. 143.
- [6] S. Winkler, J. Kazazi, und M. Vollrath, „How to warn drivers in various safety-critical situations – Different strategies, different reactions“, *Accid. Anal. Prev.*, Bd. 117, S. 410–426, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.01.040>.
- [7] N. B. Sarter, „Multimodal information presentation: Design guidance and research challenges“, *Int. J. Ind. Ergon.*, Bd. 36, Nr. 5, S. 439–445, 2006, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ergon.2006.01.007>.
- [8] N. Fricke, „Gestaltung zeit- und sicherheitskritischer Warnungen im Fahrzeug.“, Dissertation, 2009.
- [9] M. S. Prewett, L. R. Elliott, A. G. Walvoord, und M. D. Coover, „A Meta-Analysis of Vibrotactile and Visual Information Displays for Improving Task Performance“, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, Bd. 42, Nr. 1, S. 123–132, 2012, doi: 10.1109/TSMCC.2010.2103057.
- [10] S. Oviatt, „The human-computer interaction handbook“, J. A. Jacko und A. Sears, Hrsg. Hillsdale, NJ, USA: L. Erlbaum Associates Inc., 2003, S. 286–304. [Online]. Verfügbar unter: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=772072.772093>
- [11] L. Diwischek, „Method generation for the evaluation of virtual buttons with multimodal feedback“, PhD Thesis, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://d-nb.info/1156183634/34>

- [12] K. Suzuki und H. Jansson, „An analysis of driver's steering behaviour during auditory or haptic warnings for the designing of lane departure warning system“, *JSAE Rev.*, Bd. 24, Nr. 1, S. 65–70, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(02\)00247-3](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(02)00247-3).
- [13] J. Chun, I. Lee, G. Park, J. Seo, S. Choi, und S. H. Han, „Efficacy of haptic blind spot warnings applied through a steering wheel or a seatbelt“, *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, Bd. 21, S. 231–241, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2013.09.014>.
- [14] A.-M. Zühlsdorff, „Comparing an Unbalanced Motor with Mechanical Vibration Transducers for Vibrotactile Forward Collision Warnings in the Steering Wheel“, 2021.
- [15] W. Chang, W. Hwang, und Y. G. Ji, „Haptic Seat Interfaces for Driver Information and Warning Systems“, *Int. J. Human–Computer Interact.*, Bd. 27, Nr. 12, S. 1119–1132, 2011, doi: 10.1080/10447318.2011.555321.
- [16] ISO/TC 22, Road vehicles, Subcommittee SC 13, Ergonomics, *DIN EN ISO 09241-11 Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) - Part 11 : Guidance on usability*. S. 28.
- [17] van der Laan, J. D., Heino, A., und Waard, D., „A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics“, *Transp. Res. Part C*, Bd. 5, Nr. 1, 1997.
- [18] National Highway Traffic Safety Administration, *Visual-Manual NHTSA Driver Distraction Guidelines For In-Vehicle Electronic Devices*. 2012.
- [19] H.-P. Krüger, M. Grein, A. Kaussner, und C. Mark, „SILAB – A task oriented driving simulation“, in *Proceedings of the Driving Simulator Conference*, Iowa City, 2005, S. 232–331.
- [20] S. G. Hart und L. E. Staveland, „Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research“, in *Human Mental Workload*, P. A. Hancock und N. Meshkati, Hrsg. Amsterdam: North Holland Press, 1988.
- [21] Bortz, J., Lienert, G. A., & Boehnke. (2008). Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik. Heidelberg: Springer Medizin.
- [22] M. Ahtamad, R. Gray, C. Ho, N. Reed, und C. Spence, „Informative Collision Warnings: Effect of Modality and Driver Age“, Juli 2015. doi: 10.17077/drivingassessment.1590.

Approximation of the overlap for integral safety systems

**Anna-Lena Schlamp, Kilian Schneider, Robert Lugner,
Gerald Sequeira, Thomas Brandmeier,**
C-ISAFE, Technische Hochschule Ingolstadt

Zusammenfassung

Integrale Fahrzeugsicherheit bietet durch vorausschauende Schutzsysteme und Umfeldsensorik das Potenzial, die Vision Zero zu erreichen. Dazu muss die bevorstehende Unfallschwere aus den Umfeldsensordaten vor dem Unfall ermittelt werden. Besonderen Einfluss hat dabei der Überdeckungsgrad zwischen den Fahrzeugen. Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt, welche den Überdeckungsgrad für beliebige Kollisionskonstellationen (360° um das Fahrzeug) detektieren kann. Zunächst werden die bestehenden, uneinheitlichen Berechnungsmethoden aus der konventionellen passiven Sicherheit betrachtet und ihre Eignung und Genauigkeit für eine vorausschauende Überdeckungsberechnung beurteilt. Da jede Methode dabei Stärken und Schwächen aufweist, wurde eine neue Methode mithilfe einer Gewichtungsfunktion entwickelt. Daraus ergibt sich ein ganzheitlicher Ansatz, der für alle möglichen Crasheszenarien den passenden Überdeckungsgrad ableitet.

Abstract

Integral vehicle safety offers the potential to achieve Vision Zero through predictive protection systems and environmental sensor technology. To achieve this, the imminent severity of the crash must be determined from the environmental sensor data before the crash occurs. The overlap ratio between the vehicles has a particular influence. In the following, a method is presented that can detect the overlap ratio for arbitrary collision constellations (360° around the vehicle). First, the existing disparate calculation methods from conventional passive safety are considered and their suitability and accuracy for a predictive overlap calculation are assessed. Since each method has strengths and weaknesses, a new method was developed using a weighting function. This results in a holistic approach that derives the appropriate overlap ratio for all possible crash scenarios.

1. Motivation

In Deutschland stagniert die Zahl der tödlichen Verkehrsunfälle bei ca. 3.000 Unfällen pro Jahr [1]. Als Hauptgrund für die verbliebenen Verkehrstoten ist menschliches Versagen durch

Ablenkung, überhöhte Geschwindigkeit oder Fahren unter Alkoholeinfluss zu nennen. Um die Vision Zero der EU, d. h. bis 2050 keine Verkehrstote mehr in Europa, noch zu erreichen, ist infolge der genannten Stagnation eine Weiterentwicklung heutiger Systeme der Passiven Sicherheit (Unfallfolgen verringern) und der Aktiven Sicherheit (Unfall verhindern) hin zu einem integralen Sicherheitssystem notwendig [2]. Ziel ist es, Airbags und irreversible Rückhaltemittel bereits wenige Millisekunden vor dem eigentlichen Unfall zu aktivieren. Auf diese Weise wird wertvolle Zeit gewonnen, die für größere und weniger aggressive Airbags genutzt werden kann [3]. Notwendig sind dafür Pre-Crash-Algorithmen, welche anhand von Umfeldsensoren wie Kamera, LiDAR und Radar das Fahrzeugumfeld scannen und mögliche Crashpartner detektieren. Eine Trajektorienschätzung ermittelt darauf basierend, ob eine Kollision mit einem anderen Objekt durch z. B. Lenk- und Bremsenriffe verhindert werden kann oder unvermeidbar ist. Ist eine Kollision nicht mehr zu vermeiden, berechnet eine Unfallschwere-Schätzung wie schwer der Unfall sein wird und welche Airbags zu welchem Zeitpunkt ausgelöst werden sollen. Voraussetzung dafür ist, dass die Schätzung den Einschlagsort und darauf aufbauend den Überdeckungsgrad (prozentualer Anteil der Fahrzeugstruktur, die in einen Aufprall involviert ist) zwischen den Fahrzeugen kennt [4]. Je nach Position des ersten Berührungspunkts wird der Aufprall dabei als Front-, Seiten, Eck- oder Heckkollision klassifiziert. Zudem wird unterschieden zwischen einem frontalen und einem seitlichen Überdeckungsgrad. Neben der Einschlagsgeschwindigkeit und dem Kollisionswinkel zwischen den Fahrzeugen definiert der Überdeckungsgrad das Unfallszenario und ist ein elementarer Parameter für die Unfallschwere [5]. Zu diesem Zweck stellt dieses Paper eine Methode vor, mit welcher der Überdeckungsgrad des Ego-Fahrzeugs 360° um das Fahrzeug aus Informationen der Umfeldsensorik abgeleitet werden kann.

2. Konventionelle Berechnungsmethoden

2.1 Problemstellung

Im Allgemeinen wird zur Bestimmung des frontalen sowie seitlichen Überdeckungsgrads der Abstand zweier Referenzpunkte ermittelt und in Relation zur Breite respektive zur Länge des betrachteten Ego-Fahrzeugs gesetzt. Allerdings gibt es zur Berechnung der Koordinaten dieser Referenzpunkte keine einheitliche Vorgehensweise. Stattdessen existieren mehrere Betrachtungsmöglichkeiten und damit verschiedene Methoden zur Bestimmung des Überdeckungsgrads. Sie basieren auf der Verwendung verschiedener, vom Ego- und Bullet-

Fahrzeug ausgehender Hilfslinien und liefern dementsprechend unterschiedliche Ergebnisse. Hervorzuheben ist dabei, dass die bestehenden Methoden für Standardcrash-Lastfälle definiert sind. Darüber hinaus sind sie lediglich für Frontkollisionen gültig, sodass keine etablierte Methode zur Definition des Überdeckungsgrads in Szenarien mit einem Aufprall im Bereich des Hecks, der Ecke oder der Seite des betrachteten Fahrzeugs vorliegt. Wird aber ein falscher oder zu ungenauer Wert des Überdeckungsgrads ermittelt, so wird der Wert der prädierten Unfallschwere verfälscht. Die Folge können zuletzt Fehlauflösungen des integralen Sicherheitssystems sein, die das Verletzungsrisiko sowohl für die Fahrzeuginsassen als auch für andere Verkehrsteilnehmer erheblich steigern. Der präzisen Approximation des Überdeckungsgrads kommt somit ein herausragender Stellenwert zu. Daher bedarf es in einem nächsten Schritt der Identifikation und Untersuchung konventioneller Berechnungsmethoden hin zur Entwicklung eines 360-Grad-Modells, mit dem der Überdeckungsgrad des Ego-Fahrzeugs für alle Unfallszenarien geschätzt werden kann.

2.2 Bestimmung des frontalen Überdeckungsgrads des Ego-Fahrzeugs

a. Methode der Verlängerung der Seitenlinien des Bullet-Fahrzeugs

Diese Methode (M1) wird durch etablierte Organisationen - wie der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) - im Rahmen von Crashtests genutzt [6], [7]. Sie basiert auf verlängerten Seiten des Bullet-Fahrzeugs als Hilfslinien (siehe Bild 1 (a), blau gestrichelte Linien), deren Schnittpunkte mit der Kontur des Ego-Fahrzeugs ermittelt und auf dessen Querachse projiziert werden (gelb gestrichelte Linien) [8], [9]. Die resultierenden Referenzpunkte (rote Markierungen) dienen letztlich der Bestimmung des frontalen Überdeckungsgrads (gelbe durchgehende Linie).

b. Methode der Projektion einer Senkrechten ausgehend vom Bullet-Fahrzeug

Die zweite Methode (M2) basiert auf nur einer verlängerten Seitenlinie. Dabei wird bei einer Ankunftsrichtung des Bullet-Fahrzeugs von rechts die in Fahrtrichtung linke Seitenlinie berücksichtigt. Umgekehrt erfolgt bei einer Annäherung von links die Verlängerung der rechten Seitenlinie. Die Projektion des Schnittpunkts der Seitenlinie auf die Querachse des Ego-Fahrzeugs dient auch hier als Referenzpunkt. Eine zweite Hilfslinie wird ausgehend von der jeweils anderen Ecke des Bullet-Fahrzeugs senkrecht auf das Ego-Fahrzeug konstruiert (siehe Bild 1 (b), rosa gestrichelte Linie). Somit ergibt sich der zweite erforderliche Referenzpunkt aus der Schnittpunktbestimmung der Senkrechten mit dem Ego-Fahrzeug sowie der Projektion des resultierenden Schnittpunkts auf dessen Querachse.

c. Methode der Projektion zweier senkrechter Linien

Grundlage von *M3* bilden zwei senkrechte Linien. Analog zur zuvor beschriebenen Methode wird eine Senkrechte von der Ecke des Bullet-Fahrzeugs auf das Ego-Fahrzeug projiziert. Die entsprechende Ecke wird dabei ebenso in Abhängigkeit des Kollisionswinkels gewählt und der Referenzpunkt durch Projektion des Schnittpunkts auf die Querachse bestimmt. Eine zweite Linie, deren Ursprung die gegenüberliegende Ecke des Ego-Fahrzeugs darstellt, wird senkrecht zur Kontur des Bullet-Fahrzeugs konstruiert (siehe Bild 1 (c), rot gestrichelte Linie). Aus der Projektion des Schnittpunkts dieser Linie mit der Kontur des Bullet-Fahrzeugs auf die Querachse des Ego-Fahrzeugs resultiert der zweite Referenzpunkt.

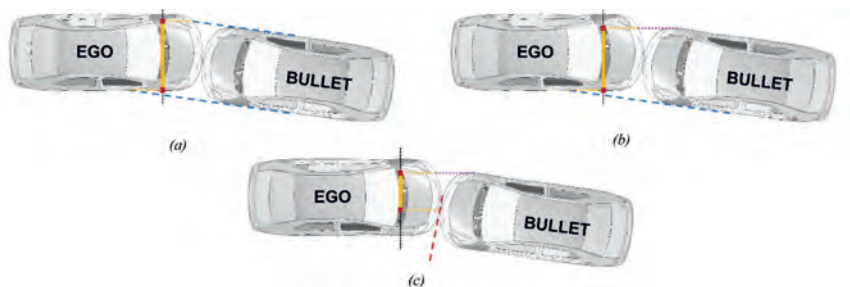


Bild 1: Methoden zur Bestimmung des frontalen Überdeckungsgrads des Ego-Fahrzeugs bei einer Frontkollision. Die gelbe Linie zwischen den beiden roten Punkten stellt den frontalen Überlapp dar.

2.3 Bestimmung des seitlichen Überdeckungsgrads des Ego-Fahrzeugs

Neben dem frontalen Überdeckungsgrad entsteht bei einigen Unfallszenarien innerhalb einer Frontkollision auch ein seitlicher Überdeckungsgrad. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der Aufprallpunkt der kollidierenden Fahrzeuge nahe an einer Ecke des Ego-Fahrzeugs liegt und ein hohes α vorliegt.

a. Methode der Verlängerung der Seitenlinien des Bullet-Fahrzeugs

Zur Berechnung des frontalen Überdeckungsgrads durch die Verlängerung der Seitenlinien des Bullet-Fahrzeugs wurde diese Methode auch zur Bestimmung des seitlichen Überdeckungsgrads des Ego-Fahrzeugs (siehe Bild 2 (a), türkis durchgehende Linie) übertragen. Dabei werden die Schnittpunkte der verlängerten Linien mit der Kontur des Ego-Fahrzeugs ermittelt und auf dessen Längsachse projiziert. Besondere Berücksichtigung erhalten diejenigen Szenarien, in denen der Schnittpunkt der, bei positivem Wert des Kollisionswinkels rechten und bei negativem Wert linken verlängerten Seitenlinie auf der linken

respektive der rechten Hälfte der Front des Ego-Fahrzeugs liegt. In diesen Fällen ist der maximale Punkt der Front statt des Schnittpunkts selbst als Referenz heranzuziehen.

b. Methode der Projektion einer Senkrechten ausgehend vom Bullet-Fahrzeug

Die Methode der Projektion einer Senkrechten ausgehend vom Bullet-Fahrzeug kann auch zur Bestimmung des seitlichen Überdeckungsgrads herangezogen werden. Den Ursprung der Senkrechten repräsentiert dabei bei positiven Werten des Kollisionswinkels die linke und bei negativen Werten die rechte Ecke des Bullet-Fahrzeugs. Der erste Referenzpunkt ergibt sich anschließend ebenso aus der Projektion des Schnittpunkts der Senkrechten mit der Kontur des Ego-Fahrzeugs auf dessen Längsachse. Der zweite Referenzpunkt wird analog zur zuvor beschriebenen Methode der Verlängerung der Seitenlinien des Bullet-Fahrzeugs ermittelt. Die beschriebene Methode wird in Bild 2 (b) grafisch veranschaulicht, wobei es sich um einen sehr geringen Wert des seitlichen Überdeckungsgrads handelt.



Bild 2: Methoden zur Bestimmung des seitlichen Überdeckungsgrads des Ego-Fahrzeugs bei einer Frontkollision. Die türkise Linie zwischen den beiden roten Punkten stellt den seitlichen Überlapp dar.

3. Vorgehen

Zur Entwicklung eines Modells zur Approximation des Überdeckungsgrads des Ego-Fahrzeugs wurde dessen Kontur in die verschiedenen möglichen Kollisionsbereiche untergliedert. Dazu zählen die Front, das Heck, die Seite sowie der Bereich der Ecke des Ego-Fahrzeugs. Diese wurden jeweils separat betrachtet, wobei die Front und das Heck aufgrund der Ähnlichkeit in Form und Aufbau als ein gleicher Konturbereich angesehen wurden. Im Anschluss wurden die bereits bestehenden, für Front- beziehungsweise Heckkollisionen gültigen Methoden zur Bestimmung des Überdeckungsgrads des Ego-Fahrzeugs angewandt und hinsichtlich ihres Vorgehens und ihrer Plausibilität in verschiedenen Unfallszenarien beurteilt. Die Form der kollidierenden Fahrzeuge entsprach dabei der des Fahrzeugmodells eines Toyota Yaris. Für Seiten- und Eckkollisionen wurden die existierenden Methoden auf diese Bereiche übertragen und ebenso für verschiedene Szenarien bewertet. Es wurde je Kollisionsbereich und Methode eine Auswahl an Winkel- und Positionsdaten erstellt, sodass

die Anzahl an zu beurteilenden Szenarien abgedeckt und ein direkter Vergleich der Methoden gewährleistet war. Anschließend wurden die Werte des ermittelten Überdeckungsgrads hinsichtlich Genauigkeit und Plausibilität bewertet.

Alle drei vorgestellten Methoden liefern entsprechend ihrer Definition andere Überdeckungen zwischen den Fahrzeugen. Um bewerten zu können, welcher Ansatz die genaueste Approximation des Überdeckungsgrads liefert, wurden FEM-Simulationen durchgeführt. Eine Vielzahl an Crash-Szenarien wurde dabei aufgesetzt, die hinsichtlich ihrer Einschlagsposition, Auftreffwinkel und Geschwindigkeit variieren. Die Einschlagspositionen verteilen sich über die gesamte Kontur des Ego-Fahrzeugs, sodass Einschlagspunkte sowohl an den äußeren Rändern bei kleinen Überdeckungen als auch in der Mitte bei großen liegen. Infolgedessen lagen Szenarien für alle Überdeckungen und Richtungen vor. Zuletzt wurden die Ergebnisse der Simulationen in zwei Anwendungsgebiete ähnlich dem Anlernen von neuronalen Netzen getrennt. Der erste wurde für das Aufstellen und Optimieren der Gewichtungsfunktion herangezogen, während der zweite Teil für das Testen und Bewerten der Ansätze verwendet wurde.

Als Ground-Truth für die Auswertung wurde die an dem Unfall beteiligte Crashstruktur des Ego-Fahrzeugs ermittelt. Dazu wurde im ersten Schritt der Zeitpunkt mit der maximalen Deformation zwischen den Fahrzeugen bestimmt. Im zweiten Schritt erfolgte eine Untersuchung der sich zu diesem Zeitpunkt in Kontakt befindlichen Flächen (vgl. Bild 3). Anschließend wurden die Koordinaten der oberen und unteren Knotenpunkte der Strukturen extrahiert. Der Überdeckungsgrad ergibt sich dann aus dem Verhältnis der Differenz der Koordinaten durch die gesamte Breite des Ego-Fahrzeugs. Im Beispiel aus Bild 3 resultiert daraus ein Überdeckungsgrad von 54 % als Ground-Truth. Die so bestimmten Werte wurden gesammelt, den approximierten Werten gegenübergestellt und deren Abweichungen analysiert.

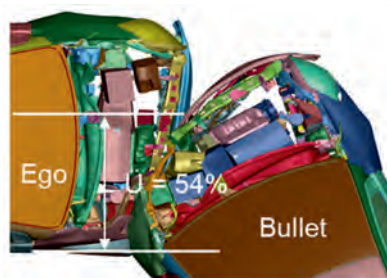


Bild 3: Geschätzte Überdeckung entsprechend den Ansätzen am Beispiel eines 40° Unfalls mit Einschlag auf Höhe des Scheinwerfers.

Im Falle fehlender Plausibilität der konventionellen Methoden bedurfte es eines Ansatzes, der für den jeweils betrachteten Kollisionsbereich gültig ist und einen präzisen Wert des Überdeckungsgrads liefert. Daher wurden jeweils die beiden Berechnungsmethoden mit der besten Leistung kombiniert. Zu diesem Zweck wurden für alle Crash-Lastfälle die Methoden hinsichtlich ihres errechneten Überdeckungsgrads verglichen und die präziseste Methode für die Gewichtung bestimmt. Vor diesem Hintergrund wurden Abhängigkeiten der Plausibilität vom Winkel- und Positionswert des Szenarios identifiziert. Darauf basierend erfolgte die Entwicklung einer Gewichtungsfunktion, welche die beiden Methoden jeweils geeignet kombiniert.

Die Kombination der resultierenden gewichteten Methoden eines jeden Kollisionsbereichs ergibt ein ganzheitliches 360-Grad-Modell, mit dem der Überdeckungsgrad des Ego-Fahrzeugs für alle Unfallszenarien approximiert werden kann.

4. Ergebnisse

In Anlehnung an die verschiedenen Kollisionsbereiche ergaben sich im Rahmen der Untersuchung der existierenden Methoden insgesamt drei Gewichtungsfunktionen. Zusammen bilden sie ein 360-Grad-Modell, welches zur Approximation des Überdeckungsgrads des Ego-Fahrzeugs für alle Unfallszenarien verwendet werden kann.

4.1 Front- und Heckkollisionen

Bei Front- und Heckkollisionen spielt sowohl der frontale als auch der seitliche Überdeckungsgrad des Ego-Fahrzeugs eine zentrale Rolle. Infolgedessen kombiniert M1 die konventionellen, bereits existierenden Berechnungsmethoden der Projektion einer Senkrechten ausgehend vom Bullet-Fahrzeug und der Projektion zweier senkrechter Linien

mithilfe einer Gewichtungsfunktion. Dabei erfolgt die Gewichtung abhängig vom Wert des Kollisionswinkels und der Position des Aufprallpunkts der kollidierenden Fahrzeuge im jeweiligen Szenario. Dabei nimmt die Gewichtung der Methode *M2* mit steigendem Winkelwert ab und steigt mit zunehmendem Positionswert an. Zur Bestimmung des seitlichen Überdeckungsgrads wird hingegen die bestehende, in diesem Kontext gesamtheitlich plausible Methode der Projektion einer Senkrechten unverändert herangezogen.

4.2 ECKKollisionen

Auch für Kollisionen im Bereich der Ecke bedurfte es der Berücksichtigung des frontalen sowie seitlichen Überdeckungsgrads des Ego-Fahrzeugs. Analog war damit die Entwicklung eines an ECKkollisionen angepassten Modells erforderlich. Zur Approximation des frontalen Überdeckungsgrads erfolgte eine gewichtete, vom Ort des Aufpralls abhängige Kombination der Methoden *M1* und *M2*. Die Gewichtung der Methode der Verlängerung der Seitenlinien des Bullet-Fahrzeugs steigt dabei mit zunehmendem Positionswert, das bedeutet einem Aufprall weit außen im Bereich der Ecke des Ego-Fahrzeugs. Analog zu Frontkollisionen dient die Methode *M2* der Bestimmung des seitlichen Überdeckungsgrads, wobei aufgrund der umfassenden Plausibilität keine Anpassung nötig war.

4.3 Seitenkollisionen

In Kollisionen mit einem Aufprallpunkt im Bereich der Seite des Ego-Fahrzeugs ist der seitliche Überdeckungsgrad von zentraler Bedeutung, während der frontale Überdeckungsgrad aufgrund des geringen Anteils zu vernachlässigen ist. Daher galt es anstatt eines Modells bestehend aus zwei Berechnungsmethoden lediglich eine einzelne allgemeingültige Methode zu entwickeln, mit welcher der zugehörige Wert des seitlichen Überdeckungsgrads des Ego-Fahrzeugs approximiert werden kann. Vor dem Hintergrund der Ergebnisse der Beurteilung erfolgte eine gewichtete, vom jeweiligen Wert des Kollisionswinkels abhängige Kombination der Methoden *M1* und *M2*. Bei einem Wert des Kollisionswinkels kleiner 20 Grad findet deterministisch *M2* Anwendung, bei einem Wert größer 65 Grad *M3*. Im Intervall [20; 65] Grad hingegen werden die Berechnungsmethoden unter Betrachtung des Winkelwerts des Szenarios so kombiniert, dass die Methode *M1* mit zunehmendem Winkelwert eine steigende Gewichtung erhält.

5. Diskussion

Wie in Kap. 3 beschrieben, wurde das Modell durch einen Vergleich der Methoden mit Ground-Truth Daten aus der FEM getestet. Einige ausgewählte Lastfälle sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Für jeden Kollisionsbereich in der Fahrzeugfront und -seite wurden die resultierenden Werte des Überdeckungsgrads der konventionellen sowie der gewichteten Methoden hinsichtlich ihrer Plausibilität beurteilt. Die Ergebnisse zeigen, dass die jeweiligen Methoden sinnvoll miteinander kombiniert wurden. Zudem wird deutlich, dass die mithilfe der gewichteten Methoden ermittelten Werte des Überdeckungsgrads überwiegend plausible und realistische Ergebnisse darstellen. Die an Seitenkollisionen angepasste gewichtete Methode erbringt dabei eine sehr gute Leistung in nahezu allen Lastfällen, wie Tab. 2 zeigt. Die gewichtete Methode zur Bestimmung des frontalen Überdeckungsgrads in Frontkollisionen ergibt ebenfalls gute Approximationen mit meist nur geringen Abweichungen, offenbart aber auch Optimierungspotenzial in den Bereichen mit großen Winkeln kombiniert mit Einschlagsorten an Randbereichen der Front. In Summe bieten die Gewichtungsfunktionen zur Schätzung des frontalen und seitlichen Überdeckungsgrads eine gute Basis für die folgende Anwendung in der Unfallschwere-Schätzung.

Tabelle 2: Vergleich der Overlap-Schätzung zwischen FEM-Ground-Truth und den entwickelten Methoden.

Lastfall	FEM (%)	M1 (%)	M2 (%)	M3 (%)	Gewichtet (%)
Einschlag Mitte Front 30°	63	67	67	64	67
Einschlag 350mm von oberer Fahrzeugkante, 30°	79	94	75	59	74
Einschlag Schweinwerfer unten, 75°	52	86	38	45	42
Einschlag Mitte Fahrertür, 60°	46	46	32	39	44
Einschlag Mitte Fahrertür, 150°	26	46	23	58	28

Weitere Untersuchungen mit dem Fahrzeugkonturen eines Seat Leon II, welches stark abgerundete Ecken und eine insgesamt sehr runde Fahrzeugform aufweist, wurden durchgeführt. Ergänzend dazu wurde das entwickelte 360-Grad-Modell auf die Konturen eines VW up! angewandt, da dieser eine nahezu rechteckige Form aufweist. Dabei wurde

nachgewiesen, dass das Modell auch auf andere Fahrzeugtypen mit abweichenden Konturen übertragen und darauf angewendet werden kann.

6. Fazit

Dieses Paper beschreibt ein Modell zur Approximation des Überdeckungsgrads, welches zur Integration in den Pre-Crash-Algorithmus eines integralen Sicherheitssystems vorgesehen ist. Im Rahmen der Entwicklung dieses Modells wurden drei Methoden zur Bestimmung des frontalen sowie zwei zur Berechnung des seitlichen Überdeckungsgrads untersucht, welche jeweils auf der Verwendung diverser geometrischer Hilfslinien basieren. Dabei zeigte sich, dass keine Methode existiert, welche gesamtheitlich für einen Kollisionsbereich gültig ist. Daraufhin wurden, separat für jeden Kollisionsbereich, Stärken und Schwächen der Berechnungsmethoden analysiert und Abhängigkeiten der Plausibilität vom Winkel- und Positionswert des Szenarios identifiziert. Auf Grundlage dessen wurde je Kollisionsbereich eine Gewichtungsfunktion entwickelt, die diejenigen beiden Methoden mit der besten Leistung geeignet kombiniert. Die Kombination der resultierenden gewichteten Methoden eines jeden Kollisionsbereichs ergab zuletzt ein gesamtheitliches 360-Grad-Modell, mit dem der Überdeckungsgrad des Ego-Fahrzeugs für alle Unfallszenarien approximiert werden kann. Eine abschließende Verifizierung des Modells durch einen Vergleich mit Ground-Truth Daten aus der FEM bekräftigte dabei dessen Plausibilität, weshalb der so approximierte Wert des Überdeckungsgrads an Algorithmen zur Prädiktion der Unfallschwere übergeben werden kann.

Literaturangaben

- [1] Statistisches Bundesamt (Destatis). [Online]. Available: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Tabellen/unfaelle-verunglueckte-.html>. [Zugriff am 20 September 2021].
- [2] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). [Online]. Available: <https://www.dguv.de/de/praevention/visionzero/index.jsp>. [Zugriff am 20 September 2021].
- [3] Lugner, R., Vriesman, D., Inderst, M., Sequeira, G. J. A., Pasupuleti, N., Zimmer, A. u. Brandmeier, T. (2020): Evaluation of Sensor Tolerances and Inevitability for Pre-Crash Safety Systems in Real Case Scenarios. In *2020 IEEE 3rd Connected and Automated Vehicles Symposium (CAVS)*.
- [4] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., Unfallforschung der Versicherer: PKW-Frontalkollision mit geringer Überdeckung. *Unfallforschung kompakt*, p. 25, 06. November 2013.
- [5] Pintar, F. A., Yoganandan N. u. Maiman, D. J.: Injury Mechanisms and Severity in Narrow Offset Frontal Impacts. In *Annals of advances in automotive medicine. Association for the Advancement of Automotive Medicine. Annual Scientific Conference*, pp. 185-189, 2008.
- [6] National Highway Traffic Saety Administration NHTSA (2013): CAMP Advanced Restraint Systems (ARS). U.S.Department of Transportation.
- [7] Singh, H., Ganesan, V., Davies, J., Paramasuwom, M., Gradischnig, L., Wood P. u. Mogal, V. (2018): Structural countermeasure/research program: Mass and cost increase due to oblique offset moving deformable barrier impact test. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC.
- [8] Saunders, J., Craig, M. J. u. Suway, J. (2012): NHTSA's Test Procedure Evaluations for Small Overlap/Oblique Crashes. 22nd International Technology Conference on the Enhanced Safety of Vehicles.
- [9] Franz, U., Lorenz, B., Remfrey, J. u. Schöneburg, R. (2013): Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen. Biomechanik - Simulation - Sicherheit im Entwicklungsprozess. 4. erweiterte und korrigierte Auflage: 469 S., Wiesbaden, Springer Vieweg.

„Die Dresdner Methode“

Ein Baukasten zur ganzheitlichen Bewertung aktiver Sicherheits- und automatisierter Fahrfunktionen

Dr.-Ing. **M. Mai**, Dipl.-Ing. **M. Bäuml**, MBA, Dipl.-Ing. **M. Lehmann**,
Dipl.-Ing. **C. Siebke**, Dipl.-Ing. **K. Blenz**, Prof. Dr.-Ing. **G. Prokop**,
Technische Universität Dresden;
Dipl.-Ing. **J. Bönninger**, Dr.-Ing. **K. Höpping**,
FSD Fahrzeugsystemdaten GmbH, Dresden

Abstract

In the past ten years, the Chair of Automobile Engineering (LKT) of TU Dresden and the FSD – Central Agency for PTI have focussed their common research and development efforts on a universal methodology toolbox for the holistic effectiveness and risk evaluation of active safety functions and automated driving functions: “The Dresden Method”. Real world data from several sources (naturalistic driving data, camera based traffic observations, accident data, etc.) are being merged into a common data basis by fusion algorithms, which also allow the supplement of partly missing information by means of artificial intelligence methods. Critical traffic situations are being labelled in the normal traffic data to better identify the relevant traffic behaviour. Self-developed criticality measures are being used for this labelling, which are based on the controllability of a situation for the human behaviour of road users. For a function under test, a representative test scenario catalogue, which covers the field of application of the function in a testable manner, is being extracted from that common data basis by means of self-developed clustering algorithms. This scenario catalogue is used by several evaluation methods subsequently. The safety evaluation on a macroscopic level is done by means of stochastic traffic simulations using physio-psychological models of road user behaviour, which provide a realistic virtual traffic and accident behaviour for a statistical analysis of the impact on road safety (with a reduced level of detail). The safety evaluation on a microscopic level is done by means of driving simulator studies and real world test drives (with a higher level of detail). This methodology toolbox provides a tool set for function development and validation, assessment, authorisation, periodical technical inspection, and field monitoring. It is the foundation of development for the initiative “Safety of connected and automated road traffic”, a common undertaking of TU Dresden, FSD, and further partners for the generation and supply of evaluation scenarios, methods, and tools for future road safety.

1 Einleitung

In der Wirksamkeitsbewertung aktiver Sicherheitsfunktionen und der Risikobewertung automatisierter Fahrfunktionen in Bezug auf die Verkehrssicherheit ist eine reine Re-Simulation von Unfalldaten unter Einbezug der zu bewertenden Funktion längst nicht mehr ausreichend. Da gerade automatisierte Fahrfunktionen kritische Verkehrssituationen im Idealfall gar nicht erst entstehen lassen sollten, ist ein wesentlich umfangreicheres Verständnis des heutigen Verkehrs- und Unfallgeschehens notwendig geworden. Ebenso müssen die darauf aufbauenden Bewertungsmethoden die vielfältigen Wechselwirkungen der Verkehrsteilnehmer im Realverkehr abbilden und eine statistische Aussage für das zukünftige Verkehrs- und Unfallgeschehen liefern.

Der Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik (LKT) der TU Dresden und die FSD – Zentrale Stelle haben daher im Laufe der vergangenen zehn Jahre ihre gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten darauf konzentriert, einen durchgängigen Methodenbaukasten für die ganzheitliche Wirksamkeits- und Risikobewertung aktiver Sicherheitsfunktionen und automatisierter Fahrfunktionen zu schaffen: „Die Dresdner Methode“. Im Rahmen dieses Beitrags wird die Methodenkette dieses Baukastens vorgestellt (siehe Kapitel 2) und auf die Einzelmethoden eingegangen (siehe Kapitel 3 und 4). Das Instrumentarium kann von der Funktionsentwicklung und -absicherung über die Begutachtung und Genehmigung bis hin zur periodisch-technischen Inspektion sowie Feldüberwachung eingesetzt werden. Es stellt eine Entwicklungsgrundlage für die Initiative „Sicherheit des vernetzten und automatisierten Straßenverkehrs“ dar (siehe Kapitel 5), einem gemeinsamen Vorhaben von TU Dresden, FSD und weiteren Partnern zur Schaffung und Bereitstellung von Bewertungsszenarien, -methoden und -werkzeugen für die zukünftige Verkehrssicherheit.

2 Die Dresdner Methode im Überblick

Ziel der Wirksamkeitsbewertung aktiver Sicherheitsfunktionen ist die Quantifizierung, in wie weit sich das zukünftige Unfallgeschehen bei einer bestimmten Felddurchdringung der Funktion im Vergleich zum gegenwärtigen Unfallgeschehen verändern wird (Reduktion der Unfallohäufigkeit und der Unfallschwere im Falle nicht vermeidbarer Unfälle). Automatisierte Fahrfunktionen sollten die unfallauslösende Situation im Idealfall gar nicht erst entstehen lassen und in Verbindung mit aktiven Sicherheitsfunktionen eine weitere Reduktion von Unfallohäufigkeit und -schwere im Vergleich zum heutigen Verkehrsgeschehen bewirken. Gleichzeitig dürfen durch die automatisierte Fahrfunktion aber auch keine neuen Risiken im zukünftigen Verkehr entstehen, was Gegenstand der Risikobewertung ist. Dies macht deutlich, dass eine Quantifizierung im Rahmen beider Bewertungen stets nur durch den Vergleich zum

aktuellen Verkehrsgeschehen erfolgen kann. Da es sich um Betrachtungen im Bereich der Aktiven Sicherheit handelt, ist zudem ein umfassendes Verständnis der Mechanismen notwendig, die im heutigen Verkehrsgeschehen zu kritischen Situationen und gegebenenfalls zu Verkehrsunfällen führen. Ein ganzheitlicher Bewertungsansatz muss somit im Wesentlichen die folgenden Schritte umfassen: [1]

1. Vollumfängliches Verständnis des heutigen Verkehrs- und Unfallgeschehens
2. Selektion des für das Funktionswirkfeld relevanten Geschehens (Szenarienkatalog)
3. Modellierung und Kalibrierung der Bewertungsmethoden am heutigen Stand (Baseline)
4. Methodenanwendung unter Einbeziehung der Funktion (Prognose)
5. Bewertung anhand des statistischen Vergleichs zwischen Baseline und Prognose
6. Retrospektive Überprüfung des Ergebnisses nach Erreichen der entsprechenden Felddurchdringung zur kontinuierlichen Validierung der Methodenkette

Die Dresdner Methode baut auf diesem Vorgehen auf und ordnet einzelne Methodenbausteine entlang einer Methodenkette an, die zusammenfassend durch Bild 1 veranschaulicht sei.

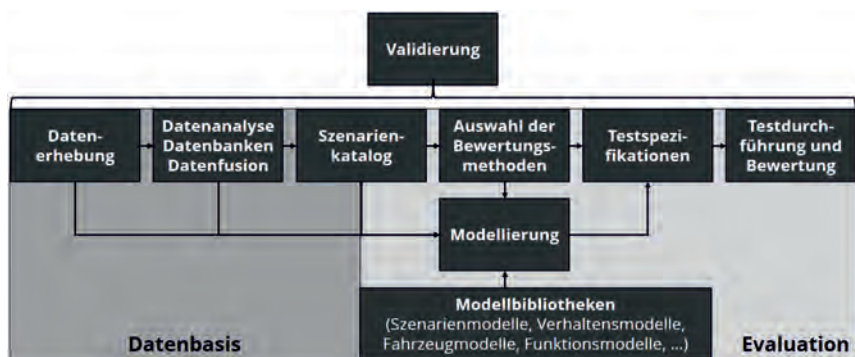


Bild 1: Prinzipielle Methodenkette der „Dresdner Methode“

Die Methodenkette unterteilt sich im Wesentlichen in die beiden Arbeitsfelder „Datenbasis“ und „Evaluation“. Die Datenbasis umfasst sämtliche Methoden, die zur Beantwortung der ersten beiden Punkte in obiger Aufzählung dienen. Realdaten des Verkehrs- und Unfallgeschehens müssen mit geeigneten Methoden erhoben, analysiert und in entsprechende Datenbanken integriert und fusioniert werden, um ein möglichst umfängliches Verständnis und Abbild des derzeitigen Verkehrs zu schaffen. Aus diesem Abbild ist das für das Funktionswirkfeld relevante Verkehrs- und Unfallgeschehen zu extrahieren und in einem Szenarienkatalog zusammenzustellen, der ein szenarien-basiertes Testen ermöglicht [2]. Der Szenarienkatalog

bildet somit die Schnittstelle zur eigentlichen „Evaluation“ der Funktion. Aus den zur Verfügung stehenden Bewertungsmethoden (z.B. numerische Simulation, Fahrsimulatorstudie, Realfahrversuch) ist eine geeignete Auswahl zu treffen und in den dazugehörigen Werkzeugen die entsprechenden Modellierungen zur Abbildung des heutigen Stands gemäß Szenarienkatalog aufzubauen. Hierzu sind Modellbibliotheken für die einzelnen Teilmodelle erforderlich, die zur Abbildung der Szenarien benötigt werden. Die Testspezifikation umfasst die Definition der Versuchspläne für die einzelnen Bewertungsmethoden und die anschließende Ergebnisaggregation, sodass die Bewertung durchgeführt und deren Ergebnis entsprechend interpretiert werden kann. Jeder einzelne Methodenbaustein, aber auch die gesamte Methodenkette, muss einer kontinuierlichen Validierung unterzogen werden, um die Ergebnisgenauigkeit zu sichern und zu schärfen.

Auf die Methodenkette der Datenbasis und deren Einzelmethode wird in Kapitel 3 genauer eingegangen. Die Methoden zur Evaluation sind Gegenstand von Kapitel 4.

3 Methodenkette zur Datenbasis

Um ein strukturiertes Verständnis des Verkehrs- und Unfallgeschehens aufzubauen und verfügbare Datenquellen entsprechend einzuordnen, ist eine Beschreibungssystematik notwendig. Schlussendlich müssen mit Hilfe der Datenbasis statistische Aussagen über die Veränderungen des Gesamtgeschehens auf nationaler oder auch internationaler Ebene getroffen werden können. Diese ergeben sich aus der Aggregation aller Interaktionen zwischen Verkehrsteilnehmern im entsprechenden Betrachtungsgebiet, wobei besagte Interaktionen wiederum durch das aktive und reaktive Verhalten der beteiligten Verkehrsteilnehmer charakterisiert werden. Hieraus lässt sich folgende Definition der Granularitätsebenen des Straßenverkehrs ableiten: [3]

- Makroskopische Ebene: Verkehrsverhalten vieler Verkehrsteilnehmer in einem bestimmten Betrachtungsgebiet
- Mesoskopische Ebene: Interaktives Verhalten mehrerer Verkehrsteilnehmer innerhalb einer Verkehrssituation
- Mikroskopische Ebene: (Re-)Aktives Verhalten eines einzelnen Verkehrsteilnehmers

Diese Systematik ist sowohl bei der Strukturierung der Datenbasis als auch bei der Einordnung der Einzelmethode zur Evaluation zu berücksichtigen (siehe Kapitel 4). Im Falle der Datenbasis lassen sich heute verfügbare Datenquellen in diese Systematik und entlang der Phasen des Verkehrs- und Unfallgeschehens gemäß Bild 2 einsortieren.



Bild 2: Einordnung verfügbarer Datenquellen in die Granularitätsebenen des Straßenverkehrs und die Phasen des Verkehrs- und Unfallgeschehens (nach [3])

Die Herausforderung besteht nun darin, die verfügbaren Datenquellen zu einem einheitlichen Verständnis des Gesamtverkehrsgeschehens zu aggregieren und die vorhandenen Lücken zu beschreiben. Anschließend werden Methoden benötigt, um aus dieser gesamtheitlichen Beschreibung das für das Wirkfeld einer zu bewertenden Funktion relevante Verkehrsgeschehen zu extrahieren und in einem Szenarienkatalog zusammenzustellen. Die Methodenkette der Datenbasis sei durch Bild 3 noch einmal detaillierter veranschaulicht.

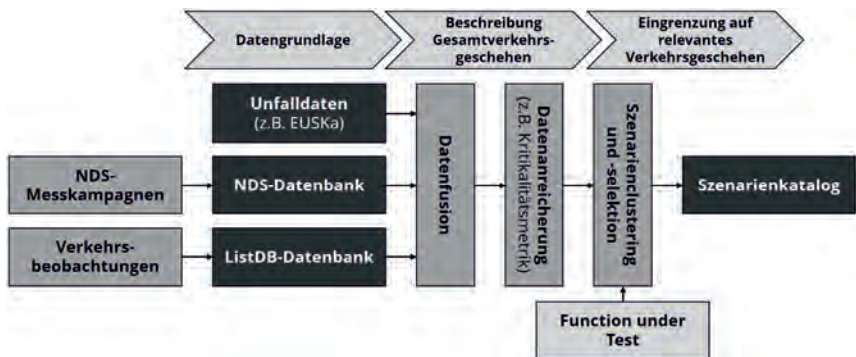


Bild 3: Methodenkette des Arbeitsfelds „Datenbasis“

Zur Erfassung der Normalfahrt auf mesoskopischer Ebene werden Verkehrsbeobachtungen mit Kameradrohnen und stationär montierten Kameras durchgeführt, deren Ergebnisse in der dafür aufgebauten Szenariendatenbank ListDB der TU Dresden gesammelt werden. Diese ortsfesten Daten werden durch egozentrierte Daten aus NDS-Messkampagnen (Naturalistic Driving Study) ergänzt. Hierfür liegt bei der FSD ein umfangreicher Datensatz vor, der durch 120 Fahrzeugen innerhalb von 13 Jahren mit Hilfe geeigneter Datenrekorder aufgezeichnet wurde [4,5]. Die verfügbare Datengrundlage der Normalfahrt wird in Zukunft durch weitere

Studien ergänzt (siehe Kapitel 5). Die Beschreibung des Unfallgeschehens erfolgt u.a. auf Basis polizeilich erfasster Unfalldaten der EUSKa-Datenbank (Elektronische Unfalltypensteckkarte), deren Zugriff an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden ermöglicht wird. All diese Datenquellen sind nun mit Hilfe geeigneter Fusionsalgorithmen zu einer gesamtheitlichen Beschreibung des Verkehrsgeschehens zusammenzuführen (siehe Kapitel 3.1) und anschließend ggf. um weitere Daten anzureichern. Exemplarisch sei hier die Kodierung mit einer Kritikalitätsmetrik genannt, um in der späteren Szenarienauswahl Situationen der Normalfahrt von kritischen Situationen objektiv unterscheiden zu können (siehe Kapitel 3.2). Die Ausleitung des Szenarienkatalogs (siehe Kapitel 3.3) für die Bewertung einer bestimmten Funktion aus dieser gesamtheitlichen Beschreibung erfolgt abschließend mit Hilfe von Algorithmen zum Szenariencustering (Zusammenfassung ähnlicher Szenarien in Clustern) und Szenarienselektion (Bestimmung der Repräsentanten pro Cluster; ein Repräsentant entspricht einem Testszenario).

3.1 Datenfusion

Die Datenfusion dient nicht nur dazu, verschiedene Datenquellen zu einer gemeinsamen Masterdatenbank zusammenzuführen, sondern vor allem auch dazu, die bestehenden Lücken in und zwischen den einzelnen Datenquellen (vgl. Bild 2) mit Hilfe der Informationen aus anderen Datenquellen zu beschreiben. Hierzu wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Ansätze am LKT erarbeitet, die Methoden der Statistik und maschinellen Lernens nutzen [6-8]. Ziel ist es, den Dateninhalt verfügbarer Quellen zu schärfen, um diese für genauere statistische Aussagen nutzen zu können.

Gegenstand der Forschung am LKT ist in diesem Zusammenhang seit längerem vor allem die EUSKa-Datenbank. Da diese polizeilich erfasste Unfälle vieler deutscher Bundesländer enthält, stellt sie eine vergleichsweise umfangreiche Datenquelle für ein großes Erhebungsgebiet dar, ist jedoch auf Grund der Erhebungsmethodik durch zahlreiche Informationslücken geprägt. Um diese auf Ebene der Unfallparameter zu schließen, wurden Statistical-Matching-Methoden angewendet, um auf Basis eines (bezogen auf die bekannten Parameter) ähnlichen Datensatzes die fehlenden Daten zu imputieren. Mittels Distance-Hot-Deck-Verfahren und Random-Forrest-Classifer konnten so beispielsweise fehlende Unfallparameter eines Empfängerdatensatzes aus der EUSKa-Datenbank durch die Spender-Informationen eines weiteren EUSKa-Datensatzes (gegenseitige Imputation von Unfalltyp und Hindernistyp) und auch eines Datensatzes von Verkehrsbeobachtungen aus der ListDB-Datenbank (Imputation der Verkehrsdichte) beschrieben werden. Im Fokus steht hierbei das Beibehalten der statistischen Aussagekraft der Datenbank selbst. [6,9]

Eine weitere statistische Unschärfe besteht zudem in der unterschiedlich detaillierten Kodierung des Unfalltyps in einzelnen Bundesländern bei der Erhebung der EUSKa-Daten. Dies erschwert die Datenanalyse im Hinblick auf die Häufigkeit und die Lokalisierung einzelner Unfalltypen enorm, was den Nutzen der Daten deutlich reduziert. Hierfür wurden Machine-Learning- und Natural-Language-Processing-Methoden entwickelt und anhand der Unfallbeschreibungen eines Datensatzes mit dreistellig kodiertem Unfalltyp trainiert. Diese wurden anschließend auf einen Datensatz mit einstellig kodiertem Unfalltyp angewendet, um den passenden dreistelligen Unfalltyp anhand der Unfallbeschreibungen zu schätzen.

3.2 Kritikalitätsmetrik

Zur Unterscheidung zwischen Situationen der Normalfahrt und kritischen Situationen ist eine objektive Beschreibung der Kritikalität erforderlich. Diese Kritikalitätsmetriken müssen auf Basis der erhobenen Zustandsgrößen in den Verlaufsbeschreibungen der einzelnen Situationen berechnet und somit nachkodiert werden. Daher fällt dieser Aspekt in Bild 3 auch in den Bereich der Datenanreicherung, der je nach Fragestellung aber auch deutlich mehr umfassen kann (z.B. Ergänzung einer dreidimensionalen Umgebungsrepräsentation für zweidimensionale Verlaufsbeschreibungen aus Drohnenbeobachtungen für mikroskopische Simulationen). Dieser Beitrag fokussiert exemplarisch auf die Kritikalitätsmetrik. [10]

Zur Beschreibung der Kritikalität verfolgt das LKT grundlegend den Ansatz die Beherrschbarkeit einer Situation für die beteiligten Verkehrsteilnehmer anhand der Verteilung der Leistungsfähigkeit in der Population zu bewerten. D.h. eine Situation ist umso kritischer, je weniger Verkehrsteilnehmer der Population in der Lage sind einen Verkehrsunfall noch vermeiden zu können und je schwerer die dabei prognostizierte Verteilung der Unfallschwere ist. Die Kritikalität kann somit als eine Art Risiko verstanden werden, das sich in den Dimensionen *Unfallwahrscheinlichkeit* und *Unfallschwere* ausdrückt. Bild 4 veranschaulicht zunächst den prinzipiellen Modellansatz der Kritikalitätsmetrik.

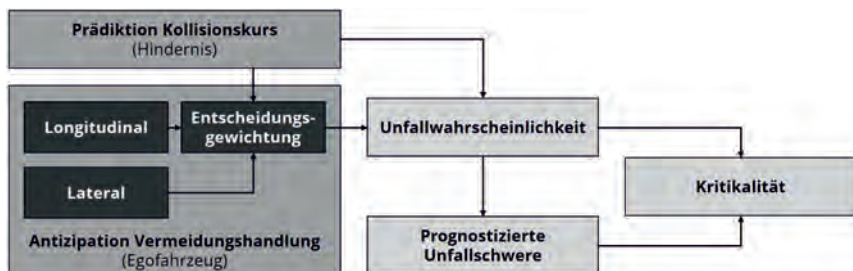


Bild 4: Prinzipieller Modellansatz der Kritikalitätsmetrik des LKT

Die Vermeidungshandlung des Egofahrzeugführers wird mit Hilfe eines statistischen Modells beschrieben, das auf Erkenntnissen und Ansätzen der Verhaltensmodellierung von Verkehrsteilnehmern beruht (vgl. Kapitel 4). Als Handlungsalternativen stehen dem Fahrer Eingriffe in die Längsführung (Bremsen, Beschleunigen) oder Querverführung (Ausweichen) zur Verfügung. Vereinfachend lassen sich diese durch den Ablauf einer Reaktionszeit t_R (bei konstanter Weiterfahrt) gefolgt von einer Bremsreaktion mit mittlerer Bremsverzögerung a_x oder einer Ausweichreaktion mit konstanter Querbewegung a_y beschreiben. Die drei Parameter sind hierbei keine Konstanten, sondern sind Verteilungen im Fahrerkollektiv unterlegen. Für das jeweilige Handlungsmodell lassen sich somit Verteilungen der notwendigen Zeitdauer beschreiben, die zur Unfallvermeidung benötigt wird (Abbau der Relativgeschwindigkeit auf Null bzw. Aufbau eines Querversatzes, der eine Vorbeifahrt ermöglicht). Die noch verfügbare Zeit bis zur Kollision (Time-To-Collision; TTC) kann diesen Verteilungen gegenübergestellt werden und der Schnittpunkt mit der kumulierten Wahrscheinlichkeit liefert den Anteil der Fahrer, die einen Unfall mit der jeweiligen Vermeidungshandlung nicht mehr vermeiden können (z.B. $TTC = 3\text{ s} \rightarrow$ kumulierte Wahrscheinlichkeit der Bremsreaktionszeit bei $3\text{ s} = 99,5\% \rightarrow$ Unfallwahrscheinlichkeit auf Basis einer Bremsreaktion $= 0,5\%$). Die beiden Handlungen müssen entsprechend ihrer Entscheidungswahrscheinlichkeit gewichtet werden, wobei auch die Prädiktion des Kollisionskurses zum Hindernis einen großen Einfluss hat. Ist ein Unfall durch Bremsen für 95% der Fahrer nicht mehr vermeidbar, wird sich auch nur ein sehr geringer Prozentsatz der Fahrer für diese offensichtliche Fehlhandlung entscheiden. Aus den gewichteten Einzelunfallwahrscheinlichkeiten der Vermeidungshandlungen und dem prädierten Kollisionskurs zum Hindernis (das Bewegungspotential eines Hindernisses kann ebenfalls zu einem gewissen Prozentsatz zur Unfallvermeidung beitragen) lässt sich schließlich die Gesamtunfallwahrscheinlichkeit der Situation berechnen. Aus dem Anteil der nicht vermeidbaren Unfälle können zudem Verteilungen der prognostizierten Unfallschwere abgeleitet werden (z.B. 1% der Fahrer können einen Unfall durch Bremsen nicht mehr vermeiden und erzeugen dabei eine Verteilung des Geschwindigkeitsunterschieds bei Kollision von 0,1-10 m/s und 3% der Fahrer können einen Unfall durch Ausweichen nicht mehr vermeiden und erzeugen dabei eine Verteilung der lateralen Überdeckung von 1-30%). Diese beiden Informationen können zur Beschreibung der Kritikalität im Sinne einer Risikofunktion zusammengeführt werden. Die Berechnung ist in jedem Zeitschritt einer Verlaufsbeschreibung möglich. Charakteristische Werte können zudem als Szenarienparameter für das Labeling von Szenarien in einer Datenbank genutzt werden (z.B. maximal auftretende Kritikalität während des Szenarios), um eine Datenanalyse zu erleichtern.

3.3 Szenarienclustering und -selektion

Um aus der bisher aufgebauten Beschreibung des Gesamtverkehrsgeschehens einen Szenarienkatalog für die Bewertung einer Funktion abzuleiten, der das relevante Verkehrsgeschehen für das Wirkfeld der Funktion möglichst allumfassend abdeckt, ist nicht nur die Auswahl passender Verkehrskonfliktsituationen und relevanter Situationsparameter erforderlich; um eine effiziente Durchführung der Bewertung zu ermöglichen, ist i.d.R. auch eine Reduktion der Szenarien auf einen abprüfbaren Umfang notwendig. Dabei muss der Informationsverlust jedoch so gering wie möglich gehalten werden, um keine Lücken in der Bewertung zu erzeugen. Daher werden am LKT Methoden für das Clustering von Szenarien (Zusammenfassung ähnlicher Szenarien) und die Selektion von Repräsentanten pro Cluster entwickelt (Bestimmung des Szenarios, das das Cluster am besten repräsentiert). Die Repräsentanten bilden schlussendlich den Szenarienkatalog. Bild 5 veranschaulicht schematisch das Vorgehen von Szenarienclustering und -selektion.

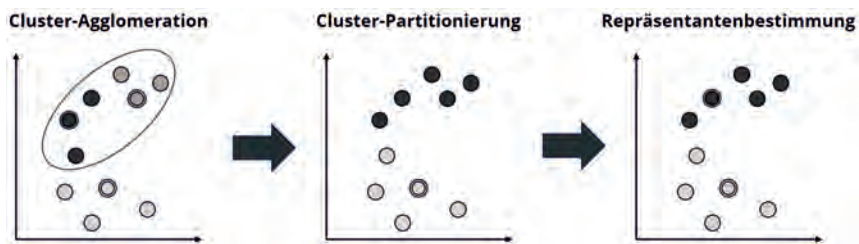


Bild 5: Schematisches Vorgehen von Szenarienclustering und -selektion (1 Iterationsschritt)

Für das Clustering wurde ein hybrider Algorithmus entwickelt, der sowohl Ansätze aus den hierarchisch agglomerativen als auch aus den partitionierenden Gruppierungsverfahren verwendet. Jedes Szenario bildet zu Beginn des iterativen Verfahrens ein Singleton-Cluster. Auf Basis der Average-Linkage-Methode werden zunächst die beiden Cluster fusioniert (Agglomeration; Bild 5 links), deren Zentren die geringste Distanz zueinander aufweisen. Danach werden die Distanzen aller Einzelszenarien zu den neuen Cluster-Zentren mittels k-means- oder k-medoids-Methode bestimmt und darauf basierend Neuuzuordnungen zu den Clustern vorgenommen (Partitionierung; Bild 5 Mitte). Abschließend werden für jedes Cluster die Repräsentanten neu bestimmt (Szenario mit geringstem Abstand zum Cluster-Zentrum; Bild 5 rechts; die Repräsentanten sind hier durch Doppelkreise gekennzeichnet). Dieser Prozess wird solange iteriert, bis ein bestimmtes Abbruchkriterium erfüllt ist (z.B. vorgegebene Cluster-Anzahl oder keine weitere Verschiebung der Cluster-Zentren). [11,12]

4 Methoden zur Evaluation

Ebenso wie die Datenquellen der Datenbasis lassen sich auch die Bewertungsmethoden in die Granularitätsebenen des Verkehrs einsortieren. Sie müssen zudem miteinander kombiniert werden, um schlussendlich auch Aussagen für die makroskopische Ebene treffen zu können. Zur Adressierung der mesoskopischen (szenarienbasiert) und z.T. auch der makroskopischen Ebene (Dauerlaufsimulationen) werden am LKT bereits seit vielen Jahren Methoden und Modelle für die stochastische Verkehrssimulation entwickelt, die zur Abbildung eines virtuellen Verkehrs- und Unfallgeschehens dienen. Diese Simulationen müssen auf Grund ihrer hohen Anzahl an Szenarienvariationen oder langer Simulationszeiten für Dauerlaufsimulationen sehr rechenzeiteffizient sein, was verhältnismäßig einfache Modelle und eine recht große Simulationsschrittweite erfordert, damit diese auch auf einfachen Arbeitsrechnern von Entwicklern und Bewertern mit vertretbarem Zeitaufwand durchgeführt werden können. Die Ergebnisse haben also den Anspruch, Aussagen in der statistischen Breite zu ermöglichen, wobei allerdings eine gewisse Unsicherheit auf Grund des Simulationsansatzes besteht und auch bewusst sein muss. Daher ist stets eine Kombination mit mikroskopischen Bewertungsmethoden notwendig, um stichprobenartig Einzelergebnisse zu verifizieren. Auch fokussieren stochastische Verkehrssimulationen auf die Bewertung der Funktion und deren Interaktion mit dem Umgebungsverkehr; detailliertere Betrachtungen mit hochkomplexen Sensormodellen oder gar Hardware-in-the-Loop-Simulationen sind hiermit kaum möglich. Zudem ist die Darstellung einzelner Verkehrssituationen von der Verfügbarkeit entsprechender Verhaltensmodelle der beteiligten Verkehrsteilnehmer und deren Funktionsumfang abhängig, was auch am LKT einen andauernden Entwicklungsprozess darstellt (s.u.). Somit lässt sich festhalten, dass eine Ergänzung der Bewertung auf mikroskopischer Ebene mit Hilfe von Probandenstudien notwendig ist, um die Ergebnisse der Verkehrssimulation hinsichtlich Validität der verwendeten Verhaltensmodelle der Verkehrsteilnehmer zu überprüfen, oder auch, wenn bestimmte Szenarien auf Grund fehlender oder ungenügender Verhaltensmodelle in der Verkehrssimulation nicht abgebildet werden können. Ebenso ist eine Ergänzung der Bewertung auf mikroskopischer Ebene mit Hilfe von Realfahrversuchen notwendig, um die Wirkung des Funktionsmodells in der Simulation am realen System zu validieren.

LKT und FSD arbeiten an Bewertungsmethoden in all diesen Bereichen. Für eine detaillierte Vorstellung des hochimmersiven Fahrsimulators sei an dieser Stelle beispielsweise auf [13] verwiesen. Im vorliegenden Beitrag wird abschließend eingehender auf das Themengebiet der Verhaltensmodellierung von Verkehrsteilnehmern als eine Schlüsselkomponente in der simulativen Bewertung eingegangen.

Die Verhaltensmodellierung für die numerische Simulation des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern hat am LKT eine lange Tradition und ist geprägt durch enge Kooperationen mit Wissenschaftlern der Verkehrspsychologie [14-25]. Der Anspruch der Modelle besteht darin, die Prozesse der Informationsverarbeitung und die dadurch abgeleiteten Handlungen des Menschen im Verkehr mit allen notwendigen physiopsychologischen Aspekten abzubilden, die die Entstehung einer kritischen Situation verursachen, aber ebenso auch zur Deeskalation dieser kritischen Situation führen können. Die realistische Abbildung dieser Wirkketten muss zudem die Variabilität des intra- und auch interindividuellen Verhaltens ermöglichen, was zwangsläufig stochastische Modellansätze erforderlich macht. Bild 6 veranschaulicht die Teilmodelle, die ein solches Modell für eine realistische Verhaltenssimulation enthalten muss.

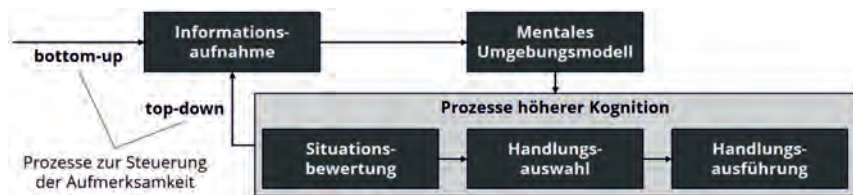


Bild 6: Teilmodelle eines Verhaltensmodells für die Simulation von Verkehrsteilnehmern

Die Informationsaufnahme umfasst die Simulation der sensorischen Wahrnehmung des Menschen. Im Verkehrsgeschehen betrifft dies in erster Linie die visuelle und die auditive Wahrnehmung, im weiteren Sinne aber auch die Sinneskanäle der haptischen Wahrnehmung. Dominant ist hierbei die visuelle Wahrnehmung [26], die neben den retinalen Wahrnehmungsfunktionen auch die Modellierung des Blickverhaltens umfasst. Die visuelle Aufmerksamkeit wird dabei durch äußere Reize angezogen (bottom-up-Mechanismen) oder durch Prozesse höherer Kognition gezielt auf bestimmte Umgebungsbereich ausgerichtet (top-down-Mechanismen) [27]. Nur Informationen, die (visuell) wahrgenommen wurden, können anschließend in das mentale Umgebungsmodell des Verkehrsteilnehmers integriert werden. Dieses beschreibt eine mentale Repräsentation der Umwelt und deren Zustände, die auf den Wahrnehmungen und mentalen Extrapolationsleistungen (bei Aufmerksamkeitsabwendung) des Verkehrsteilnehmers beruhen [28-30]. Dieses mentale Umgebungsmodell kann somit fehlerhaft sein oder auch Lücken aufweisen. Zugleich ist es die Grundlage aller höherkognitiven Prozesse, was somit die Entstehung von Fehlleistungen begründet. Die höherkognitiven Prozesse lassen sich wiederum in die drei Teilmodelle der Situationsbewertung, der Handlungsauswahl und der Handlungsausführung gliedern. Die Situationsbewertung dient der Erkennung von Situationsmustern in der Verkehrsumgebung

(z.B. vorausliegendes Spurende oder Einscherer von rechts), wobei die gegenwärtige eigene Handlung des Verkehrsteilnehmers selbst zunächst noch nicht betrachtet wird. Die Handlungsauswahl prüft, ob eine Anpassung der gegenwärtigen Handlung auf Basis eines erkannten Situationsmusters notwendig ist und welche Handlungsalternativen auf Basis des mentalen Umgebungsmodells ausgeführt werden können. Diese Entscheidungen werden in Form von Handlungsmustern für die Längs- und Querverführung an die Handlungsausführung übergeben, die die notwendigen Sollgrößen generiert und diese mit Hilfe physiologischer Regler umsetzt. Im Falle eines Fahrermodells sind die Modellausgangsgrößen die Stellgrößen des Fahrers (Lenkradwinkel und Pedalstellungen); bei einem Fußgängermodell können die Bewegungen direkt kinematisch umgesetzt werden.

Die gesamte Wirkkette gemäß Bild 6 ist mehreren Reaktionszeitanteilen unterlegen. Neue Informationen müssen zunächst lokalisiert werden (Blickzuwendungszeit). Die kognitiven Verarbeitungsschritte bis zur Handlungsausführung benötigen ebenfalls Zeit, was im Allgemeinen als (kognitive) Reaktionszeit bezeichnet wird. Auch in der Handlungsausführung können zeitliche Verzögerungen auftreten (z.B. Wechsel zwischen Gas- und Bremspedal). Sind all diese Zeitanteile in Summe länger als die bis zur Kollision verbleibende Zeit, kann ein Verkehrsunfall durch den Verkehrsteilnehmer nicht mehr vermieden werden; andernfalls ist eine Deeskalation der kritischen Situation möglich. Die korrekte Abbildung der Variabilität, die in diesen Prozessen auftritt, ist zwingend erforderlich für die Abbildung eines realistischen, virtuellen Verkehrs- und Unfallgeschehens.

5 Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurden der Methodenbaukasten der „Dresdner Methode“ vorgestellt und auf ausgewählte Einzelmethoden genauer eingegangen. Das gezeigte Instrumentarium kann von der Funktionsentwicklung und -absicherung über die Begutachtung und Genehmigung bis hin zur periodisch-technischen Inspektion (PTI) dienen. Trotz umfangreicher und modernster Sicherheitsanalysen bei der Entwicklung und Begutachtung von automatisierten Fahrzeugen ist die Komplexität aller möglichen Verkehrsszenarien nicht vollständig abbildbar. Ebenfalls können z.B. zukünftige Änderungen der Straßenverkehrsordnung bei der Genehmigung automatisierter Fahrzeuge noch nicht begutachtet werden. Schließlich können künftig vermehrt durchzuführende Software-Updates einen Einfluss auf das Fahrverhalten haben. Folglich muss eine Felduntersuchung durch eine neutrale, hoheitliche Stelle erfolgen. Für die kontinuierliche Validierung der Leistungsfähigkeit von im Feld befindlichen Fahrzeugen bildet die „Dresdner Methode“ die Basis. [5,31,32]

Auch wenn die gezeigten Inhalte nur ausschnittshaft sind, so existieren doch noch zahlreiche Herausforderungen in der Methodenkette, um die gezeigte Durchgängigkeit nach Bild 1 heute wirklich darstellen zu können. Auch sind viele Einzelmethoden das Ergebnis andauernder wissenschaftlicher Forschungsarbeiten, sodass die Generalisierbarkeit auf das gesamte Verkehrsgeschehen noch aussteht. Um eben diese Entwicklungen weiter voranzutreiben und für die Allgemeinheit auch wirklich nutzbar machen zu können, haben sich TU Dresden und FSD zusammen mit weiteren Partnern zur Initiative „Sicherheit des vernetzten und automatisierten Straßenverkehrs“ (SivaS) entschlossen. SivaS wird als Zentrum für die Fahrzeug- und Verkehrssicherheit von morgen die Kompetenzen und Ressourcen der beteiligten Partner bündeln, um unabhängig Testszenarien und Werkzeuge für Entwicklung, Homologation, PTI und Felduntersuchung bereitzustellen (siehe Bild 7).

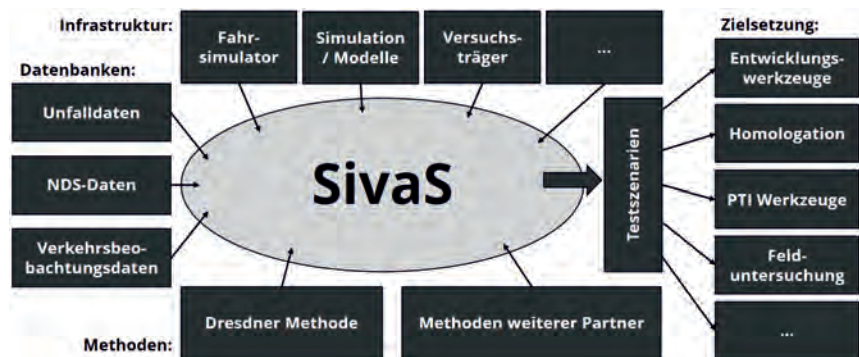


Bild 7: Geplante Struktur des Vorhabens SivaS (Sicherheit des vernetzten und automatisierten Straßenverkehrs)

Als erster Schritt ist in diesem Zuge der Start einer großangelegten Realdatenkampagne in 2022 geplant, die sich sowohl aus Verkehrsbeobachtungen mit Fokus auf den urbanen Bereich (im Rahmen des zum November 2021 für das LKT bewilligten mFUND-Förderprojekts MOTUS: Mobilitätstransformation – Erkenntnisgewinn zu Schlüsselfaktoren für nachhaltigen und resilienten Verkehr) als auch dem Aufbau einer neuen gemeinsamen NDS-Studie zusammensetzen wird.

Literaturverzeichnis

- [1] Mai, M.: Virtuelle Methoden der TU Dresden zur Verkehrssicherheitsbewertung hochautomatisierter Fahrfunktionen, Forum zum Verkehrssicherheitspotential moderner Fahrzeugtechnik, Radeberg, 2018.
- [2] Nalic, D., Mihalj, T., Bäuml, M., Lehmann, M., Eichberger, A. u. Bernsteiner, S.: Scenario Based Testing of Automated Driving Systems: A Literature Survey, FISITA World Congress, Online, 2020.
- [3] Prokop, G. u. Köbe, M.: Methodik zur Bewertung sicherheitserhöhender Fahrfunktionen, IEDAS Interdisziplinärer Expertendialog Aktive Sicherheit und automatisiertes Fahren, Essen, 2017.
- [4] Trautmann, T., Müller, B., Staffetius, T., Bönninger, J. u. van Calker, J.: Fahrerindividuelle Erkennung von fahrdynamischen Grenzwerten, TÜV-Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz, München, 2010.
- [5] Höpping, K., Bönninger, J., Prokop, G. u. Mai, M.: Driver's license for automated vehicles – towards representative test scenarios, SafetyWeek 2021: Auto[nom]Mobil, Würzburg, 2021.
- [6] Bäuml, M., Dziuba-Kaiser, L., Yin, Z., Lehmann, M. u. Prokop, G.: Use information you have never observed together: Data fusion as a major step towards realistic traffic scenarios, IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, Online, 2020.
- [7] Dziuba-Kaiser, L.: Fusion von Unfallszenarien für die Repräsentativitätsüberprüfung eines Testszenarienkataloges zur Absicherung automatisierter Fahrfunktionen, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2020.
- [8] Siedel, G.: Evaluation von Machine-Learning-Modellen und Konzeptionierung eines Modell-Ensembles für die Vorhersage von Unfalldaten, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2021.
- [9] Bäuml, M. u. Prokop, G.: Datenfusion als Mittel zur Anreicherung von Unfalldatenbanken, Forum für Verkehrssicherheit, München, 2020.
- [10] Lehmann, M., Bäuml, M. u. Prokop, G.: Use of a criticality metric for assessment of critical traffic situations as part of SePIA, Internationales Stuttgarter Symposium, Stuttgart, 2019.
- [11] Watanabe, H. u. Prokop, G.: Cluster-Linkage Analysis in Traffic Data Clustering for Development of Advanced Driver Assistance Systems, IEEE International Conference on Information and Computer Technologies, San José CA, 2020.

- [12] Watanabe, H., Maly, T., Wallner, J., Dirndorfer, T., Mai, M. u. Prokop, G.: Methodology of Scenario Clustering for Predictive Safety Functions, Tagung Automatisiertes Fahren, München, 2019.
- [13] Prokop, G., Tüschchen, T., Eisenköck, N. u. Bönninger, J.: Hochimmersiver Fahrsimulator zum szenarienbasierten Testen automatisierter Fahrfunktionen, VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit, Berlin, 2021.
- [14] Blenz, K., Mai, M. u. Prokop, G.: Integration eines modularen Fahrerhaltensmodells in das Simulationsframework openPASS zur Re-Simulation des Verkehrsunfallgeschehens auf Bundesautobahnen, VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit, Berlin, 2021.
- [15] Mai, M., Wang, L. u. Prokop, G.: Advancement of the car following model of Wiedemann on lower velocity ranges for urban traffic simulation, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 61, S. 30-37, 2019.
- [16] Witt, M., Kompaß, K., Wang, L., Kates, R., Mai, M. u. Prokop, G.: Driver profiling - Data-based identification of driver behavior dimensions and affecting driver characteristics for multi-agent traffic simulation, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 64, S. 361-376, 2019.
- [17] Schlag, B., Mai, M., Weller, G., Schreiber, F., Prokop, G., Deutsch, D., Grün, T., Rehbein, P. u. Ringhand, M.: Wie beeinflussen Warnungen unterschiedliche Parameter des Fahrerhaltens? – 4 experimentelle Studien, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, 64(3), S. 199-208, 2018.
- [18] Ring, P., Hammouda, M., Wang, L., Mai, M. u. Prokop, G.: Modelling anticipative and predictive driver behavior in the context of prospective safety assessment, Graz Symposium Virtual Vehicle, Graz, 2018.
- [19] Mai, M.: Fahrerhaltensmodellierung für die prospektive, stochastische Wirksamkeitsbewertung von Fahrerassistenzsystemen der Aktiven Fahrzeugsicherheit, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2017.
- [20] Mai, M., Tüschchen, T. u. Prokop, G.: A physiological based Driver Model for longitudinal Vehicle Guidance and its Challenges in Validation, International Symposium on Future Active Safety Technology Towards zero traffic accidents, Göteborg, 2015.
- [21] Mai, M., Wang, L., Helmer, T. u. Prokop, G.: Numerisches Fahrerhaltensmodell zur stochastischen Verkehrssimulation für die Evaluierung von Fahrerassistenzsystemen und automatisierten Fahrfunktionen, Tagung Fahrerassistenz, München, 2015.

- [22] Prokop, G., Mai, M., Weller, G. und Heyne, F.: Fahrerverhaltensmodell zur prospektiven Effektivitätsbewertung der aktiven Sicherheit, VDA Technischer Kongress, Hannover, 2014.
- [23] Mai, M.: Simulation der sensorischen Wahrnehmung des Fahrers als Teil eines Fahrerverhaltensmodells zur Entwicklung und Bewertung warnender Fahrerassistenzsysteme, VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit, Berlin, 2013.
- [24] Prokop, G., Mai, M., Schlag, B., Weller, G., Gruber, C., Tomasch, E. u. Wimmer, P.: Effektivitätsbewertung warnender Fahrerassistenzsysteme durch Fahrerverhaltensmodelle, VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit, Wolfsburg, 2012.
- [25] Prokop, G.: Modeling Human Vehicle Driving by Model Predictive Online Optimization, Vehicle System Dynamics, 35(1), S. 19-53, 2001.
- [26] Sivak, M.: The Information That Drivers Use: Is it Indeed 90% Visual?, Perception, 25(9), S.1081-1089, 1996.
- [27] Posner, M.I.: Orienting of attention, Quarterly Journal of Experimental Psychology, 32(1), S. 3-25, 1980.
- [28] Downing, F.: Image Banks: Dialogues between the Past and the Future, Environment and Behavior, 24(4), S. 441-470, 1992.
- [29] Kitchin, R.M.: Cognitive maps: What are they and why study them?, Journal of Environmental Psychology, 14(1), S. 1-19, 1994.
- [30] Tolman, E.C.: Cognitive maps in rats and men, Psychological Review, 55(4), S. 189-208, 1948.
- [31] Höpping, K. u. Bönninger, J.: Approval of automated vehicles, SafetyWeek 2020: Auto[nom]Mobil, Würzburg, 2020.
- [32] Blüthner, F., Höpping, K., Böhme, T., Bönninger, J. u. Bönninger, D.: A Federated Telematics System for access to in-vehicle data – a trustworthy basis for field monitoring of automated vehicles, ITS World Congress, Hamburg, 2021.

Simulative Bewertung der Fahrzeugsicherheit mittels des Stochastic Cognitive Driver Model für das automatisierte Fahren

Alexandra Fries, Felix Fahrenkrog, BMW Group, München

Zusammenfassung

Die prospektive Wirksamkeitsanalyse im Hinblick auf die Verkehrssicherheit stellt die Basis für Bewertung der Risikobilanz automatisierter Fahrfunktionen vor deren Markteinführung dar. Innerhalb dieser setzt BMW stochastische Verkehrssimulationen ein. Ein wesentlicher Bestandteil der Simulationsmethodik ist die realistische Abbildung des menschlichen Fahrerhaltens. Daher hat BMW das kognitive stochastische Fahrermodell (Stochastic Cognitive Model SCM) entwickelt, welches die kognitiven Prozesse des Menschen modelliert. Zwecks Darstellung des Spektrums von unterschiedlichem Fahrverhalten werden Fahrerparameter stochastisch modelliert. Eine Simulation ist immer nur eine virtuelle Abbildung der Realität dar. Daher ist es essenziell, dass die Validität der Simulation und der eingesetzten Modelle nachgewiesen wird. Die hohe Variation des Fahrverhaltens zwischen verschiedenen Fahrerinnen und Fahrern in einer objektiv gleichen Fahrsituation führt zu der Frage der Definition von Vergleichsgrößen. Dieser Punkt wird im Paper adressiert, indem geeignete Messgrößen zur Validierung des Fahrverhaltens definiert werden.

Abstract

The prospective effectiveness analysis of highly automated driving functions is the basis for the safety assessment of these functions regarding a risk balance before market introduction. Within this approach BMW uses traffic simulations which are based on a stochastic approach. An essential part is the representation of realistic driver behavior. Based on the BMW cognitive driver model (Stochastic Cognitive Model SCM) driver behavior can be represented realistically for various agents in the simulation. This is accomplished by the implementation of cognitive processes within the driver. In addition, the driver model is parameterized by stochastic means to cover the entire spectrum of driver behavior. Valid models are key for the usage of simulations within the safety assessment approach. The driver model in particular poses a major challenge as human decisions and actions are both strongly driver-related and situation-dependent. The high variety leads to the question of defining comparison variables. This

aspect is considered in this paper by applying suitable measurement approaches in different scenarios.

Positive Risikobilanz

Die Positive Risikobilanz wird von der deutschen Ethik-Kommission für automatisiertes und vernetztes Fahren für die Zulassung von automatisierten Fahrfunktionen gefordert. Sie hat zum Ziel den Nachweis zu erbringen, dass eine automatisierte Fahrfunktion weniger Unfälle verursacht als der menschliche Fahrer [1]. Auch die Europäische Kommission fordert, dass automatisierte Fahrzeuge physische Schäden im Straßenverkehr mindestens reduzieren und sich daneben für keine Verkehrsteilnehmer Risiken vergrößern [2]. BMW hat auf Grundlage dieser Forderungen die PORIBA (Positive Risk Balance) Methodik entwickelt. Die entwickelte Methodik impliziert hierfür eine ganzheitliche Betrachtung des Entwicklungsprozesses, von der Konzeptphase hin zur Markteinführung und darüber hinaus bis zur Feldbeobachtung [3][4], siehe hierzu



Bild 1. Basierend auf dem jeweiligen Entwicklungsschritt werden unterschiedliche Methodiken angewandt, um eine positive Risikobilanz für die automatisierte Fahrfunktion sicherzustellen. Im Folgenden wird die Freigabephase betrachtet, in der die prospektive Wirksamkeitsanalyse der entwickelten Fahrfunktion vor Markteinführung durchgeführt wird. Diese Bewertung muss, damit sie den Ansprüchen an eine positive Risikobilanz genügt, sowohl die positiven Effekte der Funktion, also Verringerung von Unfällen und kritischen Situationen, als auch die potenziell negativen Effekte wie bspw. neue kritische Situationen oder False-Positive-Reaktionen der Fahrfunktion gegenüberstellen, um damit alle möglichen Effekte zu berücksichtigen.



Bild 1: PORIBA Methodik über den gesamten Entwicklungsprozess [3][4].

Für die prospektive Sicherheitsbewertung der automatisierten Fahrfunktion existieren verschiedene Ansätze. Die Simulation bietet in dieser Phase die bestmögliche Lösung hinsichtlich des zu benötigten Aufwands im Verhältnis zu der Vielzahl an Szenarien, die innerhalb eines angemessenen Zeitraums detailliert betrachtet werden können [5]. Zur Durchführung der simulationsbasierten prospektiven Wirksamkeitsanalyse existieren unterschiedliche Ansätze [6]. Zu nennen sind hier die Resimulation von realen Unfällen, bspw. aus Unfalldatenbanken wie der GIDAS, mit oder ohne Variation der Eingangsparameter für die Erweiterung der untersuchten Fälle, szenarienbasiertes Testen auf Grundlage von Realfahrdaten und Auswahl von relevanten Fahrscenarien sowie Variation der Parameter der Szenarien zur Erweiterung des Szenarienraums. Der letztgenannte Ansatz bietet den Vorteil, dass nicht nur Unfälle, sondern der gesamte Verkehrsraum simuliert werden und damit eine ganzheitliche Betrachtung der positiven sowie negativen Effekte einer automatisierten Fahrfunktion zulässt. Folglich ist dieser Ansatz aus Sicht der Autoren zu bevorzugen. Hierbei muss jedoch das Verhalten der Verkehrsteilnehmer, insbesondere die sich ergebenden Trajektorien, vom Fahrermodell aus der Simulation selbst bestimmt werden. Daher ist insbesondere das eingesetzte Fahrermodell essenziell für die Anwendbarkeit und den Erfolg dieses Ansatzes.

Das Simulationstool openPASS

BMW nutzt für die Simulation das Open Source Simulationstool openPASS, welches seit dem Jahr 2016 unter der Eclipse Foundation zusammen mit den Automotive Partnern Daimler, Volkswagen, Toyota, Bosch, TÜV Süd und ITK-Engineering weiterentwickelt wird [7]. openPASS unterstützt die Standards openDrive, openScenario, OSI (Open Simulation Interface) und FMI (Functional Mock-up Interface). Damit können unter Verwendung dieser Standards eine Vielzahl an Verkehrsszenarien in openPASS aufgebaut und dargestellt werden und Fahrerassistenz- sowie hochautomatisierte Fahrfunktionen angebunden werden. openPASS bietet sowohl die Möglichkeit Kollisionen mit Einsatz der zu untersuchenden Fahrfunktion zu re-simulieren als auch Verkehrssimulationen durchzuführen. Insbesondere können Szenarien in der Simulation über unterschiedliche Parameter, wie Umgebungs- oder Verkehrseinstellungen, variiert werden. BMW nutzt openPASS insbesondere für die Simulation von Verkehrsszenarien mit der Integration des BMW eigenen kognitiven stochastischen Fahrermodells SCM.

Das Fahrerverhaltensmodell „Stochastic Cognitive Model“

Das kognitive Fahrerverhaltensmodell SCM wird von BMW innerhalb der Simulationsplattform openPASS weiterentwickelt und eingesetzt. Es ist insbesondere das Ziel realistisches Fahrer- und Verkehrsverhalten darzustellen. Das grundlegende Modell besteht aus sechs Modulen: Information Acquisition, Mental Model, Situation Manager, Action Manager, Action Implementation und den Driver Characteristics. Bild 2 zeigt anhand des Beispiels eines passiven Einschervorgangs einen Überblick über diese Module, auf die im folgenden Abschnitt detailliert eingegangen wird.

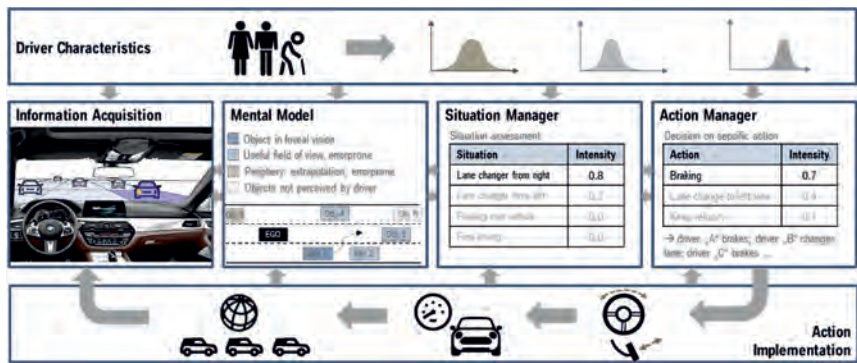


Bild 2: Informations- und Entscheidungsfluss innerhalb von SCM

Die visuelle Wahrnehmung, insbesondere das Blickverhalten des Fahrers wird im Modul Information Acquisition abgebildet. Der Input des gesamten kognitiven Prozesses im Fahrermodell wird durch dieses Modul gesteuert, daher ist eine detaillierte Modellierung des Blickverhaltens essenziell für die Funktionsweise des kompletten Fahrermodells. Informationen aus der Umgebung werden abhängig von der Blickzuwendung und Blickdauer in ein spezifisches „Area of Interest“ (AOI) aufgenommen. Die Blickzuwendung als auch die Blickdauer werden hierbei zum einen aus stochastischen Verteilungen, die auf Realdaten basieren [8][9]. Zum anderen wird das Blickverhalten durch Top-Down Requests als auch Bottom-Up Reize beeinflusst. Je nachdem, ob das betrachtete AOI im fovealen, im nutzbaren Blickbereich oder im peripheren Sichtbereich liegt, werden die Daten unterschiedlich wahrgenommen. Für das Beispiel des Cut-In Manövers sieht der Ego-Fahrer den umliegenden Verkehr in den entsprechenden AOIs. Das Cut-In Fahrzeug hat den Blinker gesetzt, daher wird durch diesen Reiz die Wahrscheinlichkeit eines Blicks in diesen Bereich beim Ego-Fahrer erhöht.

Die durch die Information Acquisition wahrgenommenen Umgebungsdaten werden im Mental Model in jedem Zeitschritt aktualisiert und weiterverarbeitet. Die Daten werden hierbei unterschieden in mikroskopische, mesoskopische und infrastrukturelle Informationen. Mikroskopische Informationen beschreiben die umgebenden Fahrzeuge durch Geschwindigkeiten, Beschleunigungen oder Positionen. Mesoskopische Informationen sind aggregierte Daten wie bspw. Die Durchschnittsgeschwindigkeit eines Fahrstreifens. Informationen der Infrastruktur können Geschwindigkeitslimits, aber auch Straßeninformationen wie Fahrbahnmarkierungen sein. Die Daten, die der Fahrer durch sein Blickverhalten als Input für das Mental Model erhält, sind nur ein Ausschnitt der kompletten Umgebungsdaten und können zudem fehlerbehaftet sein, da der Fahrer ältere Daten im mentalen Modell extrapoliert. Aus den zur Verfügung stehenden Daten werden im Mental Model weitere Parameter berechnet, die wiederum in den weiteren Schritten auch für die Situationsbewertung und Handlungsauswahl genutzt werden. Bspw. wird aus den Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Umgebungsfahrzeuge ermittelt, ob dem Agenten ausreichend Platz für ein Einscherm-Manöver zur Verfügung steht. Im Beispiel des passiven Einschervorgangs nimmt der Fahrer diese Daten des umgebenden Verkehrs auf und kann damit bspw. bestimmen, ob genug Platz für einen Spurwechsel auf den linken Fahrstreifen zur Verfügung steht.

Aus den vorliegenden und berechneten Daten erkennt und evaluiert der Fahrer im „Situation Manager“ die vorliegende Situation. Im „Situation Manager“ ist dafür ein Katalog hinterlegt, der spezifisch für Autobahnsszenarien ausgelegte Situationen enthält, wie bspw. Folgefahrt oder erkannte Spurwechsler. Es werden nun für jede Situation bestimmte Features extrahiert, die diese Situation spezifizieren. Bspw. ist ein bereits gesetzter Blinker ein Feature der Situation eines erkannten Spurwechslers von einem anderen Fahrstreifen auf den eigenen Fahrstreifen. Durch die Existenz und des Zusammenhangs von bestimmten Features kann eine Intensität für jede Situation aus dem Situationskatalog berechnet werden. Im Allgemeinen wird auf die Situation mit der höchsten Intensität reagiert. In dem vorliegenden Beispiel erkennt der Ego-Fahrer damit ein Spurwechselmanöver des rechten Fahrzeugs in den eigenen Fahrstreifen. Im „Action Manager“ wird aus der erkannten Situation eine Handlung abgeleitet. Aufbauend auf der Situation und der situationsspezifischen erkannten Features und den vorliegenden Daten des Mental Models entscheidet sich der Fahrer für eine Handlung. Handlungen bestehen aus longitudinalen und lateralen Anteilen, das bedeutet, der Fahrer kann sich bspw. dafür entscheiden seine Geschwindigkeit zu halten und selbst einen Spurwechsel durchzuführen, um einen erkannten Spurwechsler einschermen zu lassen. Die ausgewählte Handlung wird dann in der „Action Implementation“ umgesetzt, indem sie Pedalpositionen des

Gas- und Bremspedals sowie den benötigten Lenkradwinkel berechnet und das ganze an das Fahrdynamikmodul des Fahrzeugs übergeben wird. Andere Agenten in der Simulation reagieren wiederum auf die Handlung des Ego-Fahrers, indem sie wiederum dessen Handlungen durch ihr Blickverhalten erfassen, die Situation bewerten und schließlich ihrerseits wieder eine Handlung ausführen.

Im Modul der Driver Characteristics sind Fahrerparameter durch Verteilungen hinterlegt. Diese Parameter beeinflussen den Informations- und Entscheidungsfluss in allen anderen Modulen, bspw. das Blickverhalten, die Befolgung von Verkehrsregeln, das Folge- oder Spurwechselverhalten. Die Verteilungen für die Fahrerparameter entstammen Fahrerstudien in Fahrsimulatoren, FOTs oder Verkehrsdaten. Für jeden Agenten in der Simulation wird am Anfang der Simulation aus jeder Verteilung ein spezifischer Wert gezogen. Das Ziel ist es mit dieser Stochastik ein repräsentatives Fahrerkollektiv in der Simulation zu erhalten. Unterschiedliche Parameter der Fahrer in der Simulation stellen sicher, dass sich zwei verschiedene Agenten in der objektiv selben Situation unterschiedlich verhalten können. In dem Beispiel des Cut-In Manövers kann es daher vorkommen, dass sich ein Agent dafür entscheidet zu bremsen und ein anderer Agent mit anderen Fahrerparametern sich dafür entscheidet einen Spurwechsel durchzuführen.

Validierung und Verifikation des Stochastic Cognitive Models

Die Simulation stellt eine Abbildung der Realität dar. Um valide und zuverlässige Ergebnisse der Simulation garantieren zu können ist die Validierung und Verifikation der Modelle innerhalb der Simulation unerlässlich. BMW hat daher eine Validierungs- und Verifikationsmethodik für openPASS und die in openPASS eingesetzten Modelle entwickelt. Die erste Herausforderung stellt hier die agile Systementwicklung dar. Das bedeutet, dass in regelmäßigen kurzen Abständen neue, erweiterte Softwareversionen veröffentlicht werden und diese Versionen und die enthaltenen Modelle damit regelmäßig überprüft werden müssen. Hier ist ein Trade-Off zwischen der tatsächlichen Änderung innerhalb der Software und den eingesetzten Ressourcen für die V&V-Aktivitäten zu finden.

Die V&V Methodik selbst basiert auf Aktivitäten in verschiedenen Integrationsstufen der Simulationsumgebung. Das bedeutet, dass zunächst während der agilen Entwicklungszyklen durch Unit-Tests auf Funktionsebene sichergestellt wird, dass die einzelnen Methoden im Code funktionieren. Integrationstests stellen das Zusammenspiel von verschiedenen Modulen sicher, während End-To-End-Tests schließlich auf Gesamtsimulationsebene das Funktionieren der Simulation garantieren. Diese Aktivitäten sind durch die drei unteren Schichten in Abbildung 3 dargestellt. Das oberste Level ist die Überprüfung der

Gesamtmethodik, indem die Ergebnisse der Simulation mit Realdaten bspw. anhand eines sich im Markt befindlichen Systems abgeglichen werden. Die Validität der Gesamtmethodik garantiert umgekehrt jedoch nicht die Validität der einzelnen Module. Daher ist es zusätzlich notwendig auch die einzelnen Modelle zu überprüfen, was in der zweithöchsten Ebene der V&V-Pyramide stattfindet. Im Folgenden wird der Validierungsansatz für das Fahrerverhaltensmodell SCM dargestellt.

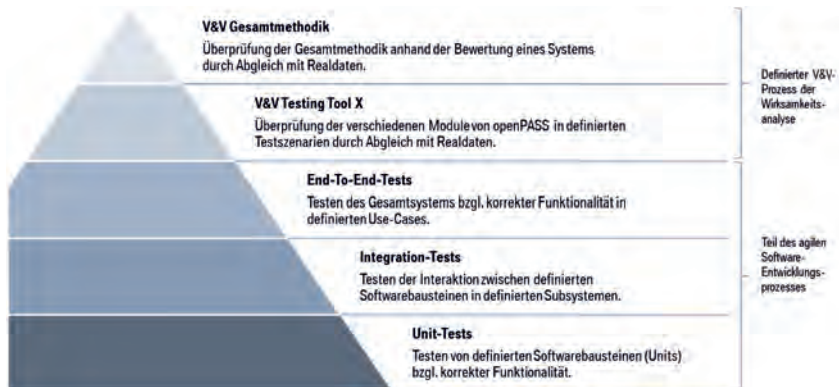


Bild 3: Validierung und Verifikationsebenen in der Simulation

Hinsichtlich des Fahrermodells sind zwei Aspekte relevant: das makroskopische Verkehrsverhalten, das durch das Verhalten aller Fahrer in der Simulation definiert ist, und das mikroskopische Fahrerverhalten, das sich durch einzelne Fahrerreaktionen in definierten Fahrsituationen beobachten lässt. Zunächst wird das makroskopische Verkehrsverhalten betrachtet. Die zentrale Frage ist, ob das Verkehrsverhalten in der Simulation reales Verkehrsverhalten abbilden kann. Hierfür werden Dauerlaufsimulationen durchgeführt und Verteilungen definierter Parameter aus der Simulation, wie bspw. Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen, werden mit Realdaten verglichen. Es stehen verschiedene Datenquellen wie BMW eigene FOT Daten, aber auch andere Datenquellen wie das Drohnendaten-Set HighD [10][11] zur Verfügung. In Abbildung 4 ist die exemplarische Verteilung der Time Headway für das aktuelle Release des Fahrermodells im Vergleich mit BMW-eigenen FOT Daten und den HighD Daten dargestellt.

Die Verteilung zeigt, dass das Verkehrsverhalten bzgl. Zeitlücken mit realem Verkehrsverhalten übereinstimmt. Insbesondere ergibt sich eine hohe Übereinstimmung der Zeitlücken im Bereich kleiner als 3 s. Im Bereich darüber hinaus lassen sich die Unterschiede

aufgrund der Datenbereitstellung erklären: Bei den FOT-Daten sind größere Zeitlücken durch den Sensorerfassungsbereich begrenzt. Daher liegen hier keine Daten über 4 s vor. Die HighD-Daten sind durch den Kamerawinkel und damit die aufgenommen Wegstrecke, die ca. 400 Meter beträgt, beschränkt. In openPASS hingegen liegt durch die Simulation keine Beschränkung hinsichtlich der Aufnahme großer Zeitlücken vor. Daher sind die größeren Anteile in dem Bereich ab 4 s im Vergleich zu den Realdaten plausibel.

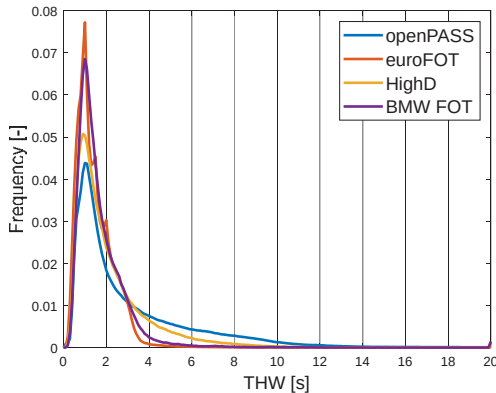


Bild 4: Time Headway (THW) Verteilung aus openPASS im Vergleich mit Realdaten.

Im Gegensatz zu der Betrachtung der Gesamtheit der Fahrer bzgl. des makroskopischen Verkehrsverhaltens werden bei der Validierung des mikroskopischen Verkehrsverhaltens einzelne Fahrer und deren Fahrverhalten in bestimmten Fahrsituationen betrachtet. Denn hier soll die Frage beantwortet werden, inwiefern das Fahrermodell in der Simulation die Bandbreite des menschlichen Fahrverhaltens in unterschiedlichen Situationen abbilden kann. Für die Validierung werden einfache Fahrsituationen, wie bspw. Freie Fahrt, Folgefahrt oder auch Verhalten im Fall einer Verkehrsregel wie bspw. ein Geschwindigkeitslimit aufgebaut, simuliert und das Verhalten der Agenten in dieser Fahrsituation analysiert. Eine Herausforderung hierbei besteht darin, dass es kein grundsätzlich „falsches“ Fahrerverhalten gibt. Ein Beispiel dafür ist das Verhalten bzgl. eines Geschwindigkeitslimits. Ein großer Anteil an realen Fahrer hält ein gegebenes Geschwindigkeitslimit ein. Gleichzeitig existieren auch reale Fahrer, die sich dazu entscheiden, schneller als das Geschwindigkeitslimit zu fahren. Daher ist es notwendig nicht nur anhand eines Simulationslaufs das Fahrerverhalten zu beurteilen, sondern anhand einer Vielzahl an Simulationsläufen mit unterschiedlichen Fahrerparametern. Aus den sich daraus ergebenden Verteilungen von definierten Parametern

je Fahrsituation lässt sich so eine Aussage über das Fahrerverhalten in der jeweiligen Situation in der Simulation treffen und mit entsprechenden Realdaten vergleichen.

Insbesondere sollen die SCM-Agenten in der Simulation nicht nur in „alltäglichen“ Fahrsituationen realistisches Fahrverhalten abbilden, sondern insbesondere auch in kritischen Fahrsituationen, die unter bestimmten Eingangsparametern auch in Kollisionen in der Simulation resultieren können. Daher werden im Folgenden Aufbau, Simulation und Analyse einer kritischen Situation in openPASS vorgestellt. Eine kritische Situation lässt sich im Allgemeinen in openPASS selten in Dauerlaufsimulation beobachten, daher wird für eine tiefergehende Analyse das kritische Szenario durch die folgenden Umgebungsanpassungen in der Simulation provoziert. Dafür wird die Sichtweite in der Simulation auf 100 Meter verringert. Das simuliert schlechte Wetterbedingungen, bspw. dichter Nebel oder Starkregen. Ein Fahrzeug wird als statisches Hindernis in die Mitte der Fahrbahn positioniert, der Ego-Agent wird einige Hundert Meter vor diesem Hindernis auf die Straße platziert. Der initiale größere Abstand zum Hindernis hat zwei Gründe: Zum einen wird sich der Agent nach Simulationsstart zunächst von dieser Geschwindigkeit hin zu seiner Wunschgeschwindigkeit bewegen, zum anderen wird das Hindernis erst nach einigen Sekunden in dem Sichtbereich eintreten. Die Straße in der Simulation besteht nur aus einem Fahrstreifen. Diese Beschränkung existiert, weil sich die Agenten bei mehreren Fahrstreifen für ein Ausweichmanöver entscheiden könnten. Hier soll nur das Bremsverhalten untersucht werden und daher wird Ausweichen durch diese Maßnahme ausgeschlossen.

Es wurden 2000 Simulationsläufe durchgeführt. In 537 Simulationen kommt es zu einer Kollision mit dem Hindernis, in 1463 kann der jeweilige Agent eine Kollision verhindern. Die mittlere Geschwindigkeit der Agenten, vor dem Eintreten des Hindernisses in den Sichtbereich, beträgt 115 km/h. Die Reaktion des Fahrers wird anhand zweier Zeitpunkte ausgewertet: Der Zeitpunkt, bei dem der Fahrer das Hindernis sieht. Das ist nicht notwendigerweise der Zeitpunkt, bei dem das Hindernis in den Sichtbereich des Fahrers eintritt, da der Fahrer durch die Blickmodellierung in diesem Moment woanders hinschauen könnte, bspw. in den Rückspiegel. In Abbildung 5 ist die Time-To-Collision jeweils für die Läufe ohne Kollision (links) und mit Kollision (rechts) dargestellt.

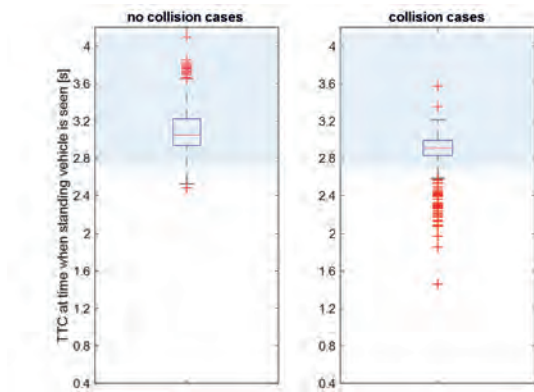


Bild 5: Time-To-Collision (TTC) bei tatsächlicher Wahrnehmung des Hindernisses durch die Agenten (theoretisch möglicher Wahrnehmungsbereich hellblau hinterlegt)

Hierbei zeigt sich der Einfluss des stochastischen Blickverhaltens des Agenten. In den Läufen ohne Kollision wird das Hindernis bei größeren TTCs gesehen im Vergleich zu den Läufen, wo es zu einer Kollision kommt. Die hellblaue Markierung zeigt den Bereich, in dem der Fahrer das Hindernis theoretisch schon hätte sehen können.

Der zweite relevante Zeitpunkt ist der Zeitpunkt der Reaktion des Agenten auf das Hindernis, d.h. der Start des Abbremsens. Abbildung 6 zeigt den Vergleich der TTC zwischen den Läufen, in denen es zu einer Kollision kommt und den Läufen, in denen der Agent eine Kollision verhindern kann. Auch hier zeigt sich, dass die TTCs bei Reaktion des Agenten im Fall einer Kollision kleiner sind. Dies hat zwei Ursachen: die Agenten nehmen das Hindernis erst bei kleineren TTC wahr und die Reaktionszeit dieser Agenten ist durchschnittlich höher als bei den Agenten, die eine Kollision verhindern. Die Reaktionszeiten der Agenten in der Simulation liegen zwischen 0,2 s und 1,7 s. In Läufen ohne Kollision liegt die maximale Reaktionszeit bei 1,1 s, im Median bei 0,5 s, mit Kollision im Median bei 0,7 s. Diese Reaktionszeiten finden sich auch in zahlreichen Realfahrstudien, siehe bspw. [12][13].

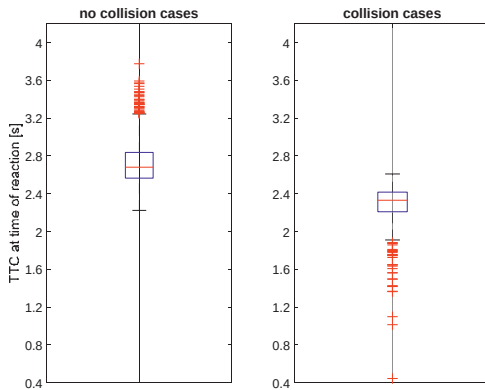


Bild 6: Time-To-Collision (TTC) bei Reaktion der Agenten auf das Hindernis.

Auch die TTC, bei dem die Agenten auf das Hindernis reagieren, liegt in einem realistischen Bereich, insbesondere im Vergleich zu den Daten, die dem Fahrermodell zugrunde liegen, das in der ALKS herangezogen wird [14][15]. Das Verhalten von SCM in dieser kritischen Situation in der Simulation, die zu einem Notbremsmanöver der Agenten führt, kann reales Fahrerverhalten abbilden. Die Variation der Situation in den 2000 Simulationenläufen führt aufgrund der stochastischen Prozesse dazu, dass es sowohl Agenten gibt, die eine Kollision verhindern, weil bspw. ihre Reaktionszeit niedriger ist, oder sie das Hindernis früher wahrnehmen. Insgesamt kann so nicht nur ein Fahrer, sondern ein Fahrerkollektiv mit unterschiedlichen Fahrerparametern dargestellt werden.

Zusammenfassung

Zur prospektiven Wirksamkeitsanalyse von Fahrerassistenz und automatisierten Fahrfunktionen innerhalb des vorgestellten PORIBA Ansatzes von BMW werden stochastische Verkehrssimulationen eingesetzt. Das Modell zur Beschreibung des Fahrerverhaltens ist wesentlich für die Durchführung und Anwendbarkeit dieses verkehrsbasierten Ansatzes. Für die Darstellung von realistischem Verkehrsverhalten in der Simulation wird das kognitive Fahrermodell SCM eingesetzt. Innerhalb dieses Modells werden kognitive Prozesse des Fahrers von der Informationsaufnahme über die Situationsbewertung hin zur Handlungsauswahl dargestellt. Damit kann nicht nur alltägliches Fahrverhalten realitätsnah abgebildet werden, sondern insbesondere auch realistisches Verhalten in kritischen Verkehrssituationen in der Simulation. Darüber hinaus werden Fahrerparameter in der

Simulation durch aus Realdaten generierten Verteilungen modelliert. Damit ist es möglich, das gesamte Spektrum an Fahrertypen und damit an unterschiedlichem Fahrverhalten abzubilden. Der Ansatz wurde anhand des Beispiels eines Cut-In Manövers dargestellt.

Um die Validität der Ergebnisse der durchgeführten Simulation gewährleisten zu können ist die Validierung und Verifikation des Simulationstools inklusive der eingesetzten Modelle notwendig. Der V&V-Ansatz, den BMW verfolgt, wurde gesamthaft sowie insbesondere anhand des Fahrermodells detailliert dargestellt. Dieser setzt sich aus der Überprüfung des makroskopischen Verkehrsverhaltens als auch des mikroskopischen Fahrerverhaltens zusammen. Es zeigt sich anhand der beispielhaften Time Headway Verteilung, dass das makroskopische Verkehrsverhalten, gut dargestellt werden kann. Das Fahrerverhalten wurde anhand einer beispielhaften kritischen Situation untersucht. Die Ergebnisse zeigen valide Bereiche bzgl. der Wahrnehmung und Reaktion der Agenten in dieser kritischen Situation.

Literaturverzeichnis

- [1] Di Fabio, U., Broy, M., Brüngger, R., Eichhorn, U., Grunwald, A., Heckmann, D., Hilgendorf, E., Kagermann, H., Losinger, A., Lutz-Bachmann, M., Lütge, C., Markl, A., Müller, K., Nehm, K., Ethik-Kommission: Automatisiertes und Vernetztes Fahren, https://www.bmvi.de/SharedDocs/EN/publications/report-ethics-commission.pdf?__blob=publicationFile, 2017.
- [2] Bonnefon, J.-F., Cerny, D., Danaher, J., Deviller, N., Johansson, V., Kovacicova, T., Martens, M., Mladenovic, M. N., Palade, P., Reed, N., Santoni de Sio, F., Tsinoirema, S., Wachter, S., Zawieska, K., Ethics of Connected and Automated Vehicles: recommendations on road safety, privacy, fairness, explainability and responsibility. Horizon 2020 Commission Expert Group to advise on specific ethical issues raised by driverless mobility (E03659). Publication Office of the European Union: Luxembourg. <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/89624e2c-f98c-11ea-b44f-01aa75ed71a1/language-en>, 2020.
- [3] Kauffmann, N., Positive Risikobilanz als Maxime für die Entwicklung des automatisierten Fahrens – Gesamtheitliche Betrachtung (ProACT-URL), carhs Safety Week Auto[nom]Mobil, Würzburg, 2021.
- [4] Kauffmann, N., Fahrenkrog, F., Raisch, F., Positive Risikobilanz als Maxime für die Entwicklung des automatisierten Fahrens, safe.tech, 2021.
- [5] Fahrenkrog, F., Wang, L., Platzer, T., Fries, A., Raisch, F., Kompaß, K., Prospective safety effectiveness assessment of automated driving functions – from the method to the results. Enhanced Safety of Vehicles, Eindhoven, Netherlands <https://www-esv.nhtsa.dot.gov/Proceedings/26/26ESV-000166.pdf>, 2019.
- [6] P.E.A.R.S. Consortium (2021) Prospective effectiveness assessment for road safety – overview, UNECE VMAD Sub Group 2 Virtual Testing, Meeting 24th Feb. 2021.
- [7] openPASS, *OpenPASS Working Group*. <https://openpass.eclipse.org/>, 2021.
- [8] Witt, M., Ring, P., Wang, L., Kompaß, K., Prokop, G., Modelling stochastic gaze distribution for multi-agent traffic simulation – Impact of driver characteristics and situational traffic circumstances on the driver's gaze behaviour, 7. Interdisziplinärer Workshop Kognitive Systeme: Mensch, Teams, Systeme und Automaten, Braunschweig, 2018.
- [9] Witt, M., Wang, L., Prokop, G., Kompaß, K., Kognitive Fahrerhaltensmodellierung in der virtuellen Bewertung von Fahrerassistenzsystemen unter Berücksichtigung der Ausprägungen menschlichen Fahrens, 8. Tagung Fahrerassistenz, München, 2017.
- [10] HighD dataset, <https://www.highd-dataset.com/>, RWTH Aachen University, 2021.

- [11] Krajewski, R., Bock, J., Kloeker, L. and Eckstein, L., The highD Dataset: A Drone Dataset of Naturalistic Vehicle Trajectories on German Highways for Validation of Highly Automated Driving Systems, *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2018, pp.2118-2125.
- [12] Bäuml, H.: Reaktionszeiten im Straßenverkehr; VKU (Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik), Vieweg Verlag, 2008
- [13] Johansson, G., Ruman, K., Driver's Brake Reaction Times, *Human Factors*, 13 (1), 1971, pp.
- [14] Antona-Makoshi, J., Taniguchi, S., Uchida, N., Imanaga, H., Kitajima, S., Ozawa, K., Kitahara, E., Towards global AD safety assurance, *Automated Vehicle Symposium*, Orlando, 2017.
- [15] UN Regulation No. 157 - Automated Lane Keeping Systems (ALKS), 2021.

