



## 12. VDI-Tagung

# Fahrzeugsicherheit

Fahrzeugsicherheit im Umfeld von neuen  
Rating- und Gesetzesanforderungen

27. und 28. November 2019, Berlin

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](http://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](http://www.dnb.de).

### **© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2019**

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

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuskriptdruck.

Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder. Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092364-2



# Inhalt

**Vorwort** . . . . .1  
R. Schöneburg, Mercedes-Benz AG  
S. Müller, Technische Universität Berlin

► **Auswirkung automatisierten Fahrens auf die Fahrzeugsicherheit**

**Sicherheit zukünftiger hochautomatischer Fahrzeuge im Mischverkehr – Anforderungen, Lösungskonzepte und Potenzialabschätzungen** . . . . . 3  
H. Freienstein, J. Kolatschek, G. A. D'Addetta, Bosch Research, Vehicle Safety and Automated Driving, Robert Bosch GmbH

**Erkennung der kognitiven Belastung eines Fahrers anhand von Vitalparametern aus realen Fahrzeugsensoren** . . . . .21  
F. Ripper, K. Mahdi, Joyson Safety Systems Aschaffenburg GmbH, Berlin

**Injury Risk on Rearward Facing Seats in Frontal Impact – Sled Tests and Simulation in a Generic Test Environment** . . . . .41  
H. Zellmer, A. Soni, S. Schilling, B. Eickhoff, Autoliv B.V. & Co. KG, Elmshorn

**The individual safety of a car seat as a central element of autonomous driving – A comprehensive study of ATDs and human body models based on a generic modelling approach of the passenger compartment** . . . . .61  
P. Luttenberger, C. Leo, M. Schachner, W. Sinz, Graz University of Technology (VSI), Graz, Österreich;  
G. A. D'Addetta, H. Freienstein, M. Wolkenstein, Robert Bosch GmbH, Renningen

**Gurtbasierte, taktile Rückmeldekonzpte in Übernahme-situationen beim automatisierten Fahren** . . . . .81  
G. Weller, R. Schnabl, C. Strümpfer, Joyson Safety Systems Aschaffenburg GmbH, Berlin und Ulm;  
L. Möller, Frankfurt a.M.

## ► Weiterentwicklung passive Sicherheit

---

### **Tiefen- und Volumenadaptive Frontalairbags – Rückhaltekonzepte für die Anforderungen des Automatisierten Fahrens . . . . .95**

B. Cyliax, I. Kalliske, Joyson Safety Systems, Berlin;  
E. Glas, C. Vieler, Volkswagen AG, Wolfsburg

### **Novel restraint system for highly automated vehicles (HAV) evaluated in frontal impact . . . 115**

T. Matsushita, Autoliv Japan Ltd., Japan;  
A. Jansson, Autoliv Sverige AB, Sweden;  
A. Vishwanatha, Autoliv India Pvt. Ltd., India

### **Schwerpunkte der Sicherheitsentwicklung des neuen Volkswagen ID.3 . . . . . 131**

S. Hagen, C. Zorn, M. Biewendt, A. Gresens, A. Gaertner, D. Navarro, Volkswagen AG, Wolfsburg

## ► Integrale Sicherheit

---

### **Aktive Energieabsorber – Verbesserte Sicherheit durch intelligente Fahrzeugstrukturen . . . 155**

M. Rohrer, E. Beeh, DLR FK- WVG, Stuttgart;  
H. E. Friedrich, DLR FK, Stuttgart;  
R. Sturm DLR FK- FLK, Stuttgart;  
S. Lapoehn, DLR TS- FZE, Stuttgart

### **Accidents caused by Health Problems and Counter Measures as a part of Occupant Safety Monitoring – Bio vital data acquisition and interpretation expand Integrated Safety. . . . . 167**

H. Feifel, J. Haber, Continental Frankfurt;  
A. Forster, Continental, Regensburg;  
V. Muralidharan, S. Narasimhan, Bangalore, India

## ► Weiterentwicklung von Absicherungsmethoden

<b>Unfallvermeidung durch aktuelle Fahrerassistenzsysteme und künftige automatische Fahrfunktionen: Prospektive Effektivitätsbewertung von FAS und HAF. . . . .</b>	<b>187</b>
L. Stark, A. Brosig, S. Schoenawa, Volkswagen AG, Wolfsburg	
<b>Behavior of sensor systems for safety in automated driving with different weather conditions under reproducible conditions. . . . .</b>	<b>205</b>
D. Schöppe, D. Steinhauser, B. Thöresz, S. Hasirlioglu, T. Brandmeier, Center of Automotive Research on Integrated Safety Systems and Measurement Area (CARISSMA), Technische Hochschule Ingolstadt	
<b>X-Ray Car Crash (X-CC) – Hochdynamisches Röntgen beim Crash analysiert künftige Fahrzeuggenerationen . . . . .</b>	<b>219</b>
J. Fritsch, Fraunhofer EMI, Freiburg; N. Schaub, Daimler AG, Sindelfingen; S. Moser, Fraunhofer EMI, Efringen-Kirchen	
<b>Validierungsprozedur für Simulationsmodelle in einem virtuellen Prüf- und Bewertungsprozess der passiven Sicherheit hochautomatisierter Fahrzeuge . . . . .</b>	<b>231</b>
A. Eggers, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach; C. Mayer, Daimler AG, Sindelfingen; S. Peldschus, LMU Munich, Biomechanik und Unfallforschung, Institut für Rechtsmedizin, München	
<b>A study of the effect of reclined seatback on the occupant kinematics in an autonomous emergency braking using a MADYMO active human body model . . . . .</b>	<b>245</b>
D. Tran, J. Holtz, G. Müller, S. Müller, Technische Universität Berlin	
<b>Entspannte Sitzpositionen im automatisierten Fahrmodus – Gefahr für die Lendenwirbelsäule bei einem Crash? . . . . .</b>	<b>277</b>
M. Unger, D. Hintze, IAT Ingenieurgesellschaft für Fahrzeugtechnik, Berlin	

► **Tendenzen im Unfallgeschehen**

---

**Analysis of motorway accidents involving cars with regard to the safety potential of automated driving functions** . . . . .295  
M. Kühn, J. Bende, German Insurers Accident Research, Berlin

**Aktuelle Studie zur Verwendung von Kinderschutzsystemen** . . . . . 311  
G. Müller, Technische Universität Berlin;  
W. Fastenmeier, Mensch Verkehr Umwelt, Institut für Angewandte Psychologie;  
M. Kühn, Unfallforschung der Versicherer, Berlin

**Unfälle schwerer Lkw mit Fußgängern und mit Radfahrern** . . . . . 331  
A. Malczyk, Dipl. Ing. Jenö Bende, Unfallforschung der Versicherer, Berlin

**Event Data Recorder (EDR) for accidents with automated vehicles –  
The accident analysis of the future** . . . . .349  
K. Böhm, D. Paula, L. Wech, H.-G. Schweiger, Technische Hochschule Ingolstadt

**Predicted crash configurations for Autonomous Driving vehicles in mixed German traffic  
for the evaluation of occupant restraint system** . . . . .365  
M. Östling, H. Jeppsson, N. Lubbe, Autoliv Research, Vårgårda, Sweden

**20 Jahre Vision Zero. Utopie oder Realität?** . . . . .393  
W. Hell, LMU Institut für Rechtsmedizin, München

## Vorwort

Sehr geehrter Tagungsbesucher,

zum 12. Mal findet die VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit in Berlin statt. Die Tagung beschäftigt sich in diesem Jahr mit dem gesamten Themenkomplex der integralen Sicherheit sowie mit dem Fokusthema „Fahrzeugsicherheit im Umfeld von neuen Rating- und Gesetzesanforderungen“.

Die Sicherheitsanforderungen an PKW und LKW werden in den kommenden Jahren noch weiter zunehmen. Eine besondere Rolle spielen Fahrerassistenzsysteme, welche Unfälle mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern reduzieren können. Erweiterte Anforderungen werden auch im Insassenschutz erwartet, beispielsweise durch die Berücksichtigung von weiteren Insassentypen und Crashlastfällen. Insgesamt werden länderspezifische Gesetzesanforderungen, Selbstverpflichtungen, Produkthaftungs- sowie Ratinganforderungen also deutlich verschärft. Aus europäischer Perspektive hat neben den Initiativen einzelner OEM das European New Car Assessment Programme (Euro NCAP) erfolgreich dazu beigetragen, dass viele Fahrzeuge über alle Klassen hinweg sicherer geworden sind. Das Gesamtsicherheitsniveau der Fahrzeuge wird bei Euro NCAP allerdings nicht nur anhand der Unfallsicherheit für die Insassen bewertet. Auch das Unfallvermeidungspotenzial, die Sicherheitsausstattung und der Schutz schwächerer Verkehrsteilnehmer gehen in das Gesamtrating ein.

Dieser Trend ist weltweit erkennbar, so auch z.B. beim China-NCAP oder vergleichbaren Ratings in Korea, USA und weiteren Märkten. Diese Ratingverfahren entwickeln ihren Anforderungsumfang immer weiter, teilweise etablieren sich aber auch neue Ratings, wie z.B. C-IASI oder iVista in China. Die US-amerikanische Behörde NHTSA hat die Diskussionen zur Überarbeitung des US-NCAP nach längerer Pause wieder aufgenommen. Auch die gesetzlichen Anforderungen an die Zulassung von Kraftfahrzeugen nehmen in der Komplexität immer weiter zu. Diese sollen den sich aus gesellschaftlichen Trends (z.B. zunehmendes Verkehrsaufkommen, verstärkte Fahrerablenkung durch elektronische Medien und technologische Entwicklungen (Elektromobilität, automatisches Fahren) ergebenden Veränderungen im Bereich Mobilität besser gerecht werden. Hierfür wird gegenwärtig unter anderem eine umfassende Revision der EU-Richtlinien im Bereich der Fahrzeugsicherheit durchgeführt, die

beispielsweise für Lkw und Busse eine Ausstattungspflicht mit Abbiege-Warnsystemen und Notbrems- und Spurhalteassistentensysteme für Pkw vorsieht.

Die folgenden Beiträge ermöglichen Ihnen, die verschiedenen Aspekte im Umfeld der integralen und passiven Sicherheit unter den oben genannten Bedingungen 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, Mercedes-Benz AG

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

# Sicherheit zukünftiger hochautomatischer Fahrzeuge im Mischverkehr – Anforderungen, Lösungskonzepte und Potenzialabschätzungen

Dr. Heiko Freienstein, Dr. J. Kolatschek, Dr. G. A. D'Addetta,  
Bosch Research, Vehicle Safety and Automated Driving,  
Robert Bosch GmbH

## 1. Zusammenfassung

Die Einführung hochautomatisierter Fahrzeuge wird große Auswirkungen auf den Bereich der Fahrzeugsicherheit haben. Zum einen werden auch hochautomatisierte Fahrzeuge noch in Kollisionen verwickelt werden, da auf absehbare Zeit Mischverkehr mit konventionellen Fahrzeugen Realität bleiben wird. Zum anderen ist davon auszugehen, dass die Variabilität der Position der Insassen im Fahrzeug stark zunehmen wird.

Dies führt zu den Anforderungen, dass zunehmend Rückhaltemittel schon in der *pre-crash* Phase angesteuert werden und eine wachsende Anzahl von Ansteuervarianten beherrscht werden müssen. Der stärkere Einfluss der *pre-crash* Phase wird zur Folge haben, dass auch die schwankende Zuverlässigkeit der Sensorinformation in die Ansteuerung als Parameter einfließt.

Mögliche Lösungen bestehen darin, dass die Aktivierung eines Rückhaltemittels über die Leistung des Rückhaltesystems mit der Zuverlässigkeit der Eingangsinformation verknüpft und die große kombinatorische Anzahl an Szenarien über eine geeignete parametrische Ansteuerung abgedeckt wird. Diese Vorgehensweise wird an einem ersten Beispiel illustriert. Schließlich wird weiteres Potenzial in Hinblick auf die Beherrschung der Komplexität skizziert.

## 2. Einfluss des hochautomatisierten Fahrens auf die Randbedingungen der Fahrzeugsicherheit

Automatisiert fahrende Fahrzeuge sind fester Bestandteil der Beschreibungen zukünftiger Mobilitätsszenarien. Mit Beginn ihrer Einführung werden sich hochautomatisierte Fahrzeuge auf absehbare Zeit in einem Mischverkehr zusammen mit konventionellen Fahrzeugen bewegen. Daher kann es, auch wenn das automatisierte Fahrzeug selbst keine Unfälle verschuldet, in gewissen Situationen weiterhin zu Verkehrsunfällen kommen. Diese werden wie bisher durch Fehlverhalten menschlicher Verkehrsteilnehmer verursacht und zwar in einer solchen Weise,

dass für das automatische Fahrzeug selbst keine Möglichkeit mehr besteht, diese Kollision durch eigene Reaktionen zu verhindern.

Im Kreuzungsbereich ist beispielsweise die Interaktion der Verkehrsteilnehmer besonders komplex. Es ist daher eine plausible Annahme, dass ein solches Unfallrisiko verbleiben wird. Beispiele für solche Situationen sind in Bild 1 dargestellt: Das Risiko kann von einem entgegenkommenden oder kreuzenden Fahrzeug unter Missachtung einer Vorfahrtsregel oder einem Folgefahrzeug ausgehen. Das europäische Förderprojekt OSCCAR beschäftigt sich unter anderem intensiv mit der Identifikation verbleibender Unfallsituationen basierend auf Analysen aus der EU Unfallforschung [1], die detaillierten Ergebnisse werden noch veröffentlicht.

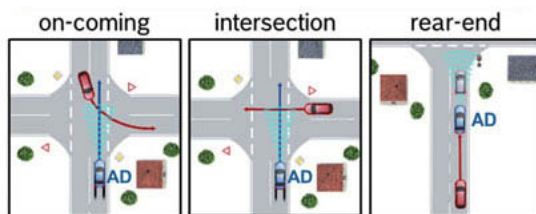


Bild 1: Beispielhafte Illustration von Kreuzungsszenarien: ein Regelverstoß eines konventionellen Verkehrsteilnehmers kann eine herausfordernde Situation für hochautomatisch fahrenden Fahrzeuge herbeiführen.

Die bekannten passiven Sicherheitssysteme wie Airbag und Gurte werden also weiterhin notwendig sein, um im Falle einer Kollision das Verletzungsrisiko der Insassen zu vermindern. Ein neuer Faktor ist das Innere des Fahrzeugs der Zukunft. Ein Teil des Nutzens automatisierter Fahrzeuge besteht darin, dass sich der von der Fahraufgabe entlastete Insasse während der Fahrt verstärkt anderen Tätigkeiten widmen kann, sei es reine Erholung, Arbeit oder Kommunikation über elektronische Medien oder direkt mit anderen Fahrzeuginsassen. Die in verschiedenen Studien diskutierten Konzepte stellen daher verschiedene Szenarien dar, die solches mit *social seating* ermöglichen. Es seien hier die Stichworte *forward facing*, *rear facing*, *side facing*, *lounging* und *campfire seating* genannt.

Dies bedeutet, dass zukünftig der Fahrzeugsitz verschiedener dieser Anforderungen gerecht wird, indem die Sitzrichtung und die Sitzposition den momentanen individuellen Bedürfnissen in einem weiteren Rahmen als bisher angepasst werden kann. Das Insassenschutzsystem



muss für alle diese Varianten den Schutz der Insassen sicherstellen, indem es geeignete Aktuatoren vorhält und eine situationsangepasste Ansteuerung der jeweiligen Rückhaltemittel garantiert.

Darüber hinaus sind hochautomatisierte Fahrzeuge mit einer Vielzahl von Sensoren nach außen und nach innen ausgestattet, sei es vorausschauende Sensorik zur Bewältigung der Fahraufgabe oder Innenraumsensorik z.B. zur Erkennung der Insassenbelegung und Zustandsüberwachung. Die Informationen, die prinzipiell auch für die Fahrzeugsicherheit zu Verfügung stehen werden daher stark anwachsen.

### 3. Konsequenzen für den Insassenschutz

Die genannten zukünftigen Faktoren, nämlich dass auch hochautomatische Fahrzeuge noch Kollisionen erleben, die weitere Steigerung der Schutzperformance durch Individualisierung des Insassenschutzes, die Bewältigung der Aufgabe, die stark wachsenden Anzahl von unterschiedlichen Sitzpositionen bei der Ansteuerung von Rückhaltemitteln zu berücksichtigen bei gleichzeitig anwachsender verfügbarer Information über die momentane Situation werden die Rahmenbedingung für den Insassenschutz für hochautomatisierte Fahrzeuge stark verändern. Entsprechend werden momentan eine Vielzahl neuer Schutzstrategien erörtert. So kann z.B. ein liegender Insasse nicht mehr mit herkömmlichen Standardschutzsystemen geschützt werden. Hier sind erweiterte Schutzkonzepte wie z.B. veränderte Gurtstraffung oder Sitzpolsteraktuatorik zur Vermeidung von *Submarining* und gegebenenfalls ein Aufstellen der Rückenlehne notwendig. Weitere mögliche Schutzstrategien sind in Bild 2 dargestellt.

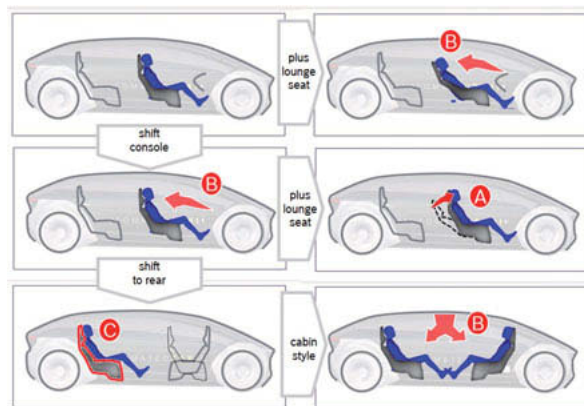


Bild 2: Beispielhafte Illustration verschiedener Innenraumkonzepte und möglicher Schutzstrategien. Mit A, B und C sind generische Schutzprinzipien markiert.

Generell lassen sich die Schutzverfahren in drei unterschiedliche Typen einteilen.

- Typ A: Der Insasse wird in eine andere Position bewegt, um ihn zu schützen (zum Beispiel durch eine *pre-crash* Positionierung des Insassen [2])
- Typ B: Das Schutzsystem bewegt sich zum Insassen (zum Beispiel durch einen Front Airbag mit zwei unterschiedlichen Geometrien [3])
- Typ C: Das Schutzsystem ist sitzbasiert und bewegt sich mit dem Insassen mit (zum Beispiel durch Sitzintegration von Airbags und Gurten [4])

Mischformen sind natürlich ebenfalls möglich und sogar wahrscheinlich.

Diese Strategien können als eine Erweiterung aktueller Schutzkonzepte betrachtet werden. Dies wird besonders deutlich, wenn man sie im Hinblick auf die zeitliche Komponente und die Adaptivität darstellt (Bild 3).

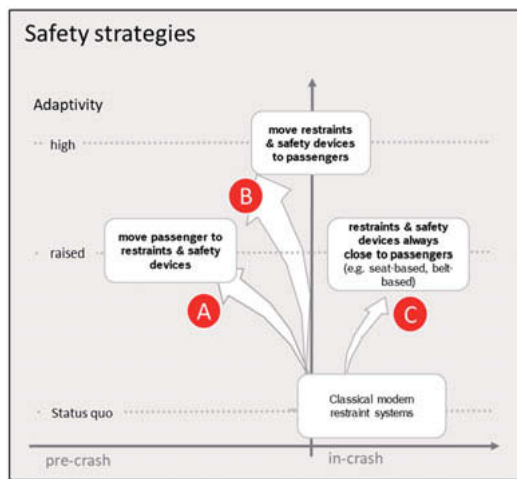


Bild 3: Zwei Dimensionen der Schutzstrategien (s. Text).

Die Bewegung des Insassen nach Typ A erfordert die längste Zeit, da durch diese selbst kein Risiko erzeugt werden soll. Durch Abstimmung dieser *pre-crash* Bewegung mit der Aktivierung der restlichen Schutzmittel wird die Adaptivität erhöht. Bei Typ B werden die Schutzmittel zum Insassen bewegt. Gegenüber Typ A kann die Aktivierung später erfolgen, da der Insasse nicht mitbeschleunigt werden muss. Eine *pre-crash* Aktivierung ist zur Kraftbegrenzung dennoch sinnvoll. Der verfügbare Rückhalteweg kann hier am stärksten variieren, so dass die Anforderung an die Adaptivität im Vergleich zu den beiden anderen Typen maximal ist. Ist ein

Schutzsystem schließlich beim Typ C prinzipiell immer nahe am Insassen, so muss es zeitlich nicht unbedingt früher aktiviert werden. Allerdings, ist durch die unterschiedliche Distanz zu den begrenzenden Elementen des Innenraumes eine erhöhte Anforderung an die Adaptivität zu erwarten.

Die beiden Dimensionen ergeben unterschiedliche Aufgaben. Die Herausforderung der frühzeitigen Aktivierung besteht darin, mögliche Falschauslösungen zu vermeiden. Die Herausforderung der erweiterten Adaptivität liegt darin, die vielfältigen Situationen zu erkennen und geeignete Maßnahmen einzuleiten. Die verschiedenen Sitzpositionen, Eigenschaften der Insassen und die möglichen Unfallkonstellationen sind vielfältige Faktoren, die ein Szenario definieren und ergeben verknüpft mit den zu unterscheidenden Werten durch Kombinatorik eine hohe Komplexität. Im Extremfall bedeutet dies, dass für jede Crashsituation und Crashschwere und für jedes Rückhaltemittel, jeden Insassentyp in jeder möglichen Sitzposition eine bestimmte optimale Ansteuerung von einem Algorithmus realisiert werden muss. Die Anforderung an den heutigen Stand der Technik ist von geringerer Komplexität: Aufgrund der geringeren Anzahl an Variationen konnten bisher die verschiedenen Anforderungen in einem Dokument spezifiziert werden, das ein Tabellenwerk enthält. Vereinfacht beschrieben bedeutet dies, dass bestimmte Crashsituationen und Crashschweren üblicherweise als „Ankerpunkte“ für das Auslöseverhalten definiert werden. Ob dieses Konzept in Zukunft trägt, muss hinterfragt werden, denn selbst in dem Fall, dass anfangs nicht alle genannten Freiheitsgrade Eingang in die Ansteuerung finden, wird es zunehmend schwieriger, die Tabellenform zur Beschreibung des Auslöseverhaltens anzuwenden.

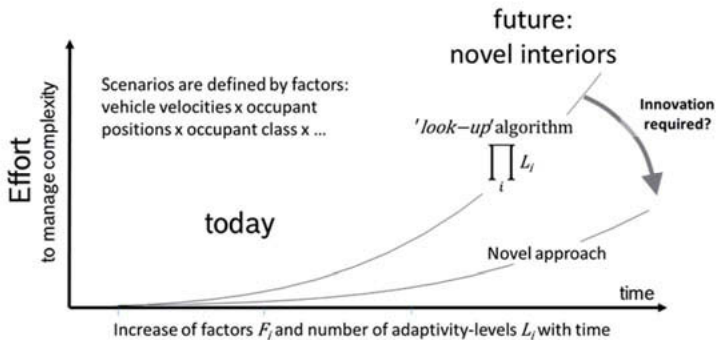


Bild 4: Das Anwachsen der Komplexität in der Ansteuerung von Sicherheitsystemen hochautomatisierter Fahrzeuge erfordert neue Lösungsansätze, um das System beherrschbar zu halten.

Es ist daher sinnvoll, veränderte Methoden zur Anforderungsanalyse und –beschreibung anzuwenden. Es muss ein Verfahren entwickelt werden, in dem die hochdimensionale Logik der Ansteuerung der Schutzmittel effizient abgebildet werden kann.

#### 4. Diskussion von Lösungsansätzen, Machbarkeit und Potenzialabschätzungen

Nach welchen Gesetzmäßigkeiten muss die Ansteuerung der Rückhaltemittel in einem hochautomatischen Fahrzeug erfolgen und auf welche Weise kann diese realisiert werden? Zur Beantwortung dieser Frage wird zunächst die Gesetzmäßigkeit der Ansteuerung unter den oben angeführten Randbedingungen analysiert. Anschließend werden Methoden dargestellt und beispielhaft illustriert.

#### Grundprinzipien der Aktivierung von Rückhaltemitteln in hochautomatisierten Fahrzeugen

Die erweiterten Möglichkeiten zur Insassenpositionierung in automatisierten Fahrzeugen bedingen, wie aufgezeigt wurde, eine stärkere Integration der Fähigkeit zur *pre-crash* Auslösung in das Gesamtsystem. Es ist die grundsätzliche Eigenschaft eines *pre-crash* Verfahrens, dass die Zuverlässigkeit einer Kollisionsvorhersage sehr stark von der Kollisionssituation selbst abhängt. Dadurch kommt sehr viel stärker als bei konventionellen *in-crash* Verfahren eine *re-*

*quire-enable* Beziehung zwischen Sensierung und Aktuatoransteuerung zu tragen. Die Wirkungsweise eines Aktuators erzeugt Anforderungen an die vorgelagerten Logikkomponenten (aus Adaptivität folgen Anforderungen an das Differenzierungsvermögen) und damit an die Sensorik (z.B. für eine frühzeitige Aktivierung).

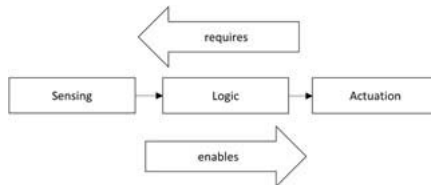


Bild 5: require-enable-Beziehung des Systems der Insassensicherheit.

Umgekehrt kann die Einschränkung der Verlässlichkeit einer Prädiktion der Situation durch die Sensorik den Einsatzbereich eines Aktors limitieren. Dies ist dann sinnvoll, wenn eine fehlerhafte Aktivierung eines Rückhaltemittels unter den gegebenen Umständen zu negativen Folgen für den Insassen führen würde. Eine allgemeine Lösung dieser Aufgabe stellt ein Verfahren dar, welches es erlaubt, die Unsicherheit der Logikaussage mit einem Maß für die Gefährdung des Insassen durch den Aktor zu verknüpfen. Entsprechend des in Bild 6 dargestellten Schemas bietet sich als Maß die biomechanisch wirksame Leistung des Aktuators in der Bereitstellungsphase an. Ein Aktuator geringer Leistung kann auch schon bei größerer Unsicherheit eingesetzt werden, da das Schadenspotenzial ebenfalls gering ist.

Letztendlich müssen die Rahmenbedingungen und der Aktuators-Typ zusammenpassen (Bild 6).

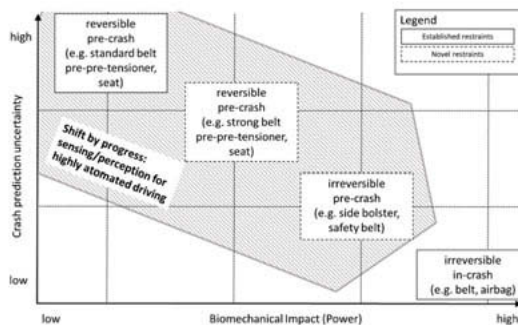


Bild 6: Aktuatoren für den Insassenschutz in Abhängigkeit der verbleibenden Unsicherheit der Vorhersage des Crash-Geschehens und der Crash-Schwere.

Die Umfelderkennung wird auf dem Weg zum automatischen Fahren stetig besser. Dies führt dazu, dass leistungsstarke reversible Rückhaltemittel ermöglicht werden oder schwächere irreversible Aktuatoren verstärkt in einer *pre-crash* Situation eingesetzt werden können. Physikalische und technische Randbedingungen begrenzen allerdings auch zukünftig in gewissen Situationen die Vorhersagegenauigkeit [5] und rechtfertigen den Einsatz aller aufgeführten Aktuatoriktypen.

### Modellierungskaskade als Werkzeug zur Analyse hochdimensionaler Szenarien

Insassenschutzstrategien konventioneller Fahrzeuge können mittels etablierter und standardisierter Verfahren analysiert werden. Als Beispiel sei hier z.B. der Einsatz eines robusten Dummies, wie z.B. der Hybrid III Dummy [6], aufgeführt. Dieser erlaubt einerseits die Aufnahme direkter Messdaten in Crash-Versuchen, andererseits können in seiner virtuellen Form auch Messdaten durch Simulation erzeugt werden. Die höhere Variabilität der Insassenpositionierung sowie die stärkere Gewichtung der *pre-crash* Phase erfordern für das hochautomatische Fahrzeug erweiterte Methoden zur Analyse und Test. Der erweiterte Bewegungsspielraum des Insassen erfordert einen Dummy, welcher mehr kinematische Freiheitsgrade erlaubt und welcher eine höhere Biofidelität als z.B. ein HIII-Dummy besitzt. Dadurch wird aber der Aufwand zur Analyse deutlich höher, da mehr Freiheitsgrade natürlich auch eine höhere Variabilität in den Reaktionsmustern und damit eine höhere Anzahl an Untersuchungen erfordert. Die erweiterten Freiheitsgrade beim THOR [7] können im Vergleich zum Hybrid III eine höhere Variabilität der Messdaten bewirken. Schon hier sollten zur Gewinnung von zuverlässigen Messdaten

statistische Methoden eingesetzt werden, was allerdings mit entsprechendem Aufwand verbunden ist<sup>1</sup>. Bei weiterer Erhöhung der Biofidelität wird dieser Effekt noch stärker, so z.B. bei einem „Human Body Model“ in einfacher Form oder aufwändiger, z.B. im THUMS [8] realisiert. Bei *Human Body Models* handelt es sich allerdings um virtuelle Modelle, so dass es kein für einen physischen Test einsetzbares Pendant mehr gibt. In der Simulation ist aber der Aufwand zur Durchführung von Analysen auch schon so hoch, dass keine vollständige Analyse aller möglichen Unfallsituationen mehr möglich ist. Im Feld wird letztendlich auf Basis der Analysen eine echtzeitfähige Methode mit sehr hoher Robustheit benötigt. Dieser Zusammenhang ist in Bild 7 dargestellt.

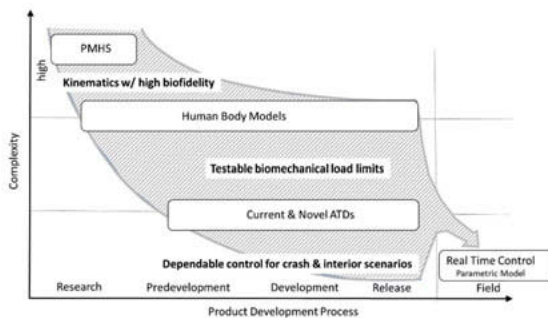


Bild 7: Modellierungskaskade zur Realisierung eines Sicherheitssystems für hochautomatische Fahrzeuge (PMHS: Post Mortem Human Subjects, ATD: Anthropomorphic Test Devices).

Es stellt sich die Frage, wie es denn überhaupt möglich ist, für das Umfeld des hochautomatischen Fahrens Analysen der Auslösestrategie mit vertretbarem Aufwand durchzuführen. Eine mögliche Lösung stellt das im Folgenden dargestellte parametrische Verfahren dar. Gemeint ist ein Verfahren, das das Auslöseverhalten für ein Rückhaltemittel in geschlossener Form über alle möglichen Situationen darstellt. Die Gesetzmäßigkeit, die in diesem Verfahren abgebildet ist, muss allerdings durch Simulationen oder Versuche mit Methoden höherer Komplexität abgesichert werden. Insofern besteht also eine Modellierungskaskade, ausgehend von den höchstwertigen Methoden, die allerdings sehr aufwändig sind und daher nur gezielt zur

<sup>1</sup> Beispielsweise könne die Ergebnisse einzelner Tests durch eine höhere Anzahl an Simulationen mit stochastisch leicht veränderten Anfangsbedingungen überprüft werden. Dies erlaubt die Bildung von Standardabweichung und Mittelwert und somit erst eine korrekte Bewertung des physikalisch durchgeführten Einzeltests.



Absicherung eingesetzt werden können, zu Methoden niedrigerer Komplexität zur Analyse des Feldes bis hin zum parametrischen Ansatz, welcher im günstigsten Fall so einfach aufgebaut ist, dass er sogar als Ansteuerverfahren in einem Echtzeitsystem eingesetzt werden kann.

### Parametrischer Ansatz zur Kontrolle von Szenarien

Wie sollte man sich den parametrischen Ansatz zur Kontrolle der Szenarien vorstellen? Ansteuerung bedeutet in diesem Zusammenhang die Beantwortung zweier Fragen:

1. Soll ein Rückhaltesystem aktiviert werden und auf welchem Niveau? Dieses Problem hängt direkt mit der Unfallschwere zusammen.
2. Wann ist der beste Zeitpunkt der Aktivierung? Falls ein Rückhaltemittel aktiviert werden muss, zu welchem Zeitpunkt soll diese Auslösung erfolgen?

Zur Beantwortung dieser Fragen zeigen wir beispielhaft einen möglichen Ansatz. Dieser vereinfachte Ansatz deckt dabei fast alle Kollisionsarten ab, die im Bereich der Fahrzeugfront stattfinden können. Kern der Beschreibung ist die Parametrisierung des Crashsignals. Diese Parametrisierung ist vollständig und deckt kontinuierlich den Raum fast aller möglichen Crashsignale ab. In einem zweiten Schritt wird diese Beschreibung der Unfallsituation mit den Eigenschaften der Rückhaltemittel und der Insassen verknüpft. Daraus ergibt sich dann direkt eine parametrisierte Beschreibung über die Aktivierung der Rückhaltemittel und den optimalen Zeitpunkt dieser Aktivierung.

Im Einzelnen lässt sich eine solche Parametrisierung wie folgt darstellen: Die für den Insassen relevanten Eigenschaften der Kollision werden vollständig durch die während der Kollision bestimmbare Zeitreihe des Geschwindigkeitsabbaus beschrieben (für Frontkollisionen ist das hauptsächlich das Signal in Fahrzeuginnenrichtung). Es zeigt sich, dass eine ausreichend genaue Parametrisierung fast aller auftretenden Signale durch die Angabe der Kollisionsdauer  $t_{crash}$  und des dabei auftretenden Geschwindigkeitsabbaus  $\Delta v$  erfolgen kann.

Damit können alle im Frontbereich auftretenden Unfallsituationen durch einen Punkt im durch  $\Delta v$  und  $t_{crash}$  aufgespannten zweidimensionalen Raum charakterisiert werden. Aus dieser Information kann nun mittels eines energiebasierten Verfahrens ein Maß für die Unfallschwere errechnet werden, auf dessen Basis die Entscheidung gefällt werden kann, ob ein Rückhaltemittel aktiviert werden soll.

Die abzubauenende Insassenenergie beträgt  $E_{occ}$ , abhängig von  $m_{occ}$ , der Masse des Insassen und dem Geschwindigkeitsabbau  $\Delta v$ .

$$E_{occ} = \frac{1}{2} m_{occ} \Delta v^2$$

Im optimalen Fall steht zur Energiedissipation die Strecke  $s = s_{defo} + s_{int}$  zur Verfügung, wobei  $s_{defo}$  die für den Insassen nutzbare Deformationslänge und  $s_{int}$  den im Fahrzeuginnern zur Verfügung stehenden Vorverlagerungsweg darstellt. Aus diesen beiden Größen lässt sich nun ein einfaches Maß für die Unfallschwere bestimmen, welches die individuelle Masse des Insassen sowie den von der Sitzposition abhängigen maximalen Vorverlagerungsweg berücksichtigt. Dieses Maß hat die Dimension einer Kraft und stellt die mittlere optimale Kraft  $\bar{F}$  dar, die für die Rückhaltung des Insassen notwendig ist. Sie ergibt sich direkt aus der vom Rückhaltesystem in einer Kollision notwendigen zu leistenden Arbeit  $W = \bar{F} \cdot s$ . Es gilt daher

$$\bar{F} = \frac{E_{occ}}{s} = \frac{\frac{1}{2} m_{occ} \Delta v^2}{s_{defo} + s_{int}}.$$

Unter der Voraussetzung eines elastischen Stoßes mit linearem Kraftgesetz lässt sich  $s_{defo}$  auch über  $\Delta v$  und  $t_{crash}$  ausdrücken:

$$s_{defo} = \frac{2\Delta v \cdot t_{crash}}{\pi}.$$

Damit ergibt sich für das Unfallschweremaß

$$\bar{F} = \frac{\frac{1}{2} m_{occ} \Delta v^2}{\frac{2\Delta v \cdot t_{crash}}{\pi} + s_{int}}$$

Auf dieser Basis kann nun, abhängig von dem Wert von  $\bar{F}$ , die Entscheidung über die Aktivierung eines Rückhaltemittels getroffen werden [9].

In analoger Form kann nun aus der gegebenen Parametrisierung auch der günstigste Zündzeitpunkt ( $TTF$ ) für Rückhaltemittel vorverlagerungsbasiert bestimmt werden<sup>2</sup>. Generell lassen sich solche Arten von Rückhaltesystemen durch die Angabe der Aktivierungsdauer  $t_A$  und der Distanz  $\Delta s$  bis zum Kontakt mit dem Airbag charakterisieren.  $\Delta s$  ist auch eine Funktion der Insassenposition  $s_{int}$ :  $\Delta s = f(s_{int})$ .

<sup>2</sup> Ein einfaches Beispiel ist die bekannte fünf Inch-Regel für Airbags: Wenn der Insasse fünf Inch inneren Vorverlagerungsweg zurückgelegt hat, soll der Airbag aktiv und aufgeblasen sein.

Damit ergibt sich für die Berechnung von  $TTF$  der allgemeine Zusammenhang:

$$TTF = f(\Delta s(s_{int}), t_A, t_{crash}, \Delta v)$$

Durch die Kombination der Ausdrücke für die Unfallschwere  $\bar{F}$  und den Aktivierungszeitpunkt  $TTF$  lässt sich eine vollständige Ansteuerstrategie für alle Rückhaltemittel für das Feld aller Kollisionen definieren. Diese sind durch die Parameter Signaldauer und Geschwindigkeitsabbau definiert, wobei zusätzlich noch die Variablen Insassenmasse  $m_{occ}$  und Insassenposition  $s_{int}$  berücksichtigt werden.

Insgesamt kann bereits durch diese Darstellung eine kontinuierliche Ansteuerstrategie erzeugt werden. Dies wird am Beispiel dargelegt.

### Beispielhafte Simulationsergebnisse zum parametrischen Ansatz

Der parametrische Ansatz sei beispielhaft an einem Fahrzeug-Fahrzeug Crash mit zwei unterschiedlich schweren Fahrzeugen illustriert, der keine direkte Entsprechung in den typischen Testkonfigurationen hat [10]. Betrachtet wird der Beifahrer im leichteren Fahrzeug (Bild 8, Fahrzeug 1). Die Daten und Geschwindigkeitsverläufe sind aus [11] entnommen.

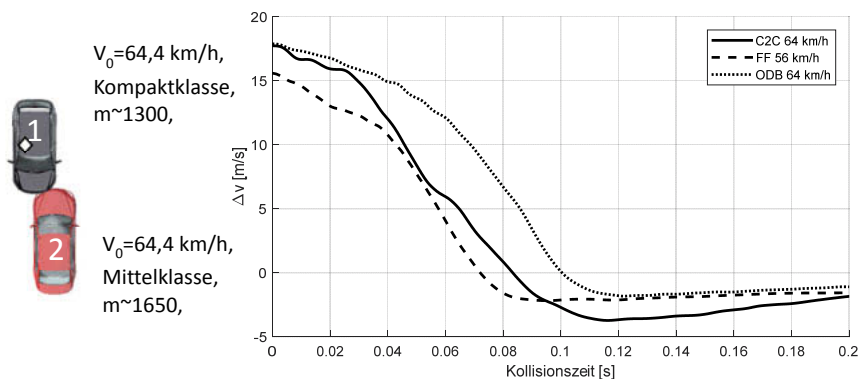


Bild 8: Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision. Dargestellt und im Beispiel verwendet wurden die Crashsignale des Fahrzeug 1.

Der Geschwindigkeitsabbau des Fahrzeuges unterscheidet sich deutlich von einem USNCAP Crash oder einem Euro NCAP Crash. Da es sich hier um die Signale des leichteren Fahrzeuges handelt beträgt der Geschwindigkeitsabbau ca. 72 km/h bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 64 km/h. Die Kollisiondauer wurde näherungsweise bestimmt. Zur leichteren Bestimmung der Kollisiondauer wurde hier der Rebound weitestgehend vernachlässigt.



sche Umschaltung des Gurtkraftbegrenzers erfolgen sollte sobald der Insassenthorax in engeren Kontakt mit dem Airbag kommt, gilt dies nicht mehr. Da die Gurtkräfte schon vorher auf den Insassenthorax eine Kraft ausüben, ist dessen Bewegung nicht mehr frei und damit wirken sich die Masse des Insassenthorax und damit indirekt der Dummytyp sich hier aus.

Als Teil der Modellierungskaskade wurde zur Validierung der Ergebnisse eine Simulationsreihe zur Auffindung der optimalen Zündzeit für die zwei definierten Sitzpositionen mittels des Insassensimulationsprogramms MADYMO mit einem H350 durchgeführt (Bild 10). Die Ergebnisse der MADYMO Simulation zeigen hier eine gute Übereinstimmung der Region der optimalen Wirkung mit den Ergebnissen der Parametrisierung. Die Verläufe der Verletzungswahrscheinlichkeiten haben ihr Minimum in der TTF-Region, die im parametrischen Ansatz vorgegeben wurde. Die Mittlere Position kann relativ zur vorderen durch eine reduzierte Kraft geschützt werden. Eine Überprüfung des Konzeptes an mehr Arbeitspunkten und der Vergleich mit komplexeren Insassenmodellen in mehr Situationen (z.B: von HBM) ist der nächste Schritt, um von der vorliegenden Potenzialabschätzung zu quantitativen Resultaten in Richtung *proof of concept* zu gelangen.

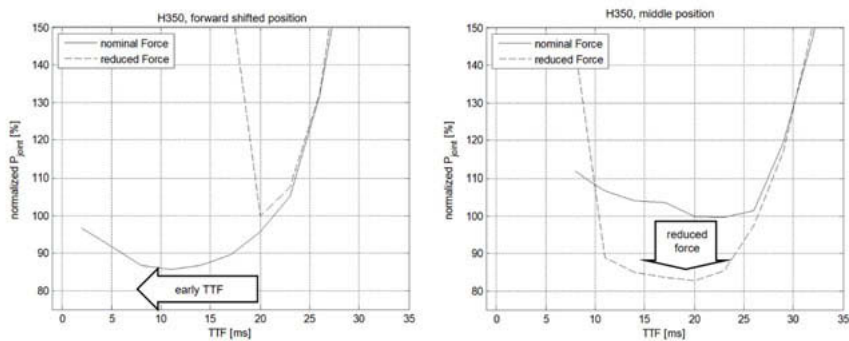


Bild 10: Relatives Insassenverletzungsrisiko aus MADYMO Simulationen mit Variation des Airbag-Zündzeitpunkts und des Kraftniveaus.

## Potenzialabschätzung des parametrischen Ansatzes

Diskutiert wurde der parameterbasierte Ansatz anhand einer bestimmten Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision, wobei der Ort im Parameterraum für dieses  $\Delta v$  und dieses  $t_{crash}$  genau von dieser Crashsituation, die durch die wirksamen Fahrzeugsteifigkeiten und das Massenverhältnis bestimmt sind. Andere wirksame Fahrzeugsteifigkeiten und/oder andere Massenverhältnisse führen dazu, dass ein anderes Kollisionssignal entsteht und ein anderer Punkt im Parameterraum eingenommen wird. Die Ansteuerung wird dann durch die sich dort ergebenden Werte für Unfallschwere und  $TTF$  bestimmt. Daraus ergeben sich folgende zusätzliche günstige Eigenschaften einer solchen Parametrisierung: Sofern die insassenbezogenen Parameter gleichbleiben, also Sitzposition, Insassentyp und Rückhaltesystemeigenschaften, ändert sich an der Ansteuerung nichts. Die Regeln bleiben identisch. Lediglich die Position des Unfalls innerhalb dieses Regelwerks verändert sich. Selbst wenn sich die Art und der Typ der beteiligten Fahrzeuge ändern, bleibt unter den angegebenen Umständen das Regelwerk konstant. Im Feld wird nach wie vor jede Kombination aus Unfallschwere und  $TTF$  auftreten und der Parameterraum in nahezu gleicher Weise dadurch abgedeckt werden. Infolgedessen ist diese Art der Beschreibung der Auslöseanforderungen invariant gegenüber geänderten Fahrzeugeigenschaften. Im umgekehrten Fall kann veränderten Eigenschaften des Rückhaltesystems dadurch Rechnung getragen werden, dass die Rechenvorschrift zur Bestimmung von  $TTF$  bzw. der Kraftwert, ab der eine Aktivierung stattfindet, angepasst wird. In diesem Fall sind die Unfallsituationen invariant gegenüber einer Änderung des Rückhaltesystems.

Ein nicht zu unterschätzender Aspekt eines parametrischen Ansatzes ist die Tatsache, dass eine solche formalisierte Darstellung ebenso zur Analyse des Auslöseverhaltens, zur Festlegung von Anforderung, wie aber auch zur Realisierung genau dieser Anforderungen eingesetzt werden kann. Das Letztere ergibt sich, da die Funktionen zur Berechnung nur von wenigen Größen anhängen. Zum einen sind das die insassenbezogenen Variablen  $s_{int}$ , also ein Abstandsmaß und  $m_{occ}$  die Insassenmasse. Bei vollautomatischen Fahrzeugen werden diese durch geeignete Innenraumsensorik direkt gemessen oder können zumindest mit genügender Genauigkeit angenähert werden. Der Regelsatz für die Aktuatorik, im angegebenen Beispiel sind das die Aktivierungszeit  $t_A$  und ein weiteres Abstandsmaß, sind inhärente Parameter des Rückhaltemittels und stehen schon im Vorfeld zur Verfügung. Die verbleibenden Größen Kollisionsdauer  $t_{crash}$  und Geschwindigkeitsabbau  $\Delta v$  ergeben sich direkt aus der Unfallsituation. In Zukunft besteht Potenzial diese Größen mit dem Einsatz von vorausschauender Sensorik, wie sie bei hochautomatisierten Fahrzeugen Standard ist, und, im weiteren Kollisionsverlauf,

mit klassischer Crashsensorik zum notwendigen Zeitpunkt mit jeweils ausreichender Genauigkeit durch Entwicklung neuer Algorithmen, auch unter Einsatz von KI-Methoden, vorherzusagen. Falls dies geleistet wird, ergibt sich die Ansteuerung direkt aus dem parameterbasierten Ansatz und ist somit auch direkt in einem Echtzeitsystem realisierbar.

## Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde dargestellt, wie die veränderten Rahmenbedingungen im Umfeld des automatischen Fahrens Rückwirkungen auf das Feld der Fahrzeugsicherheit haben. Automatische Fahrzeuge werden aufgrund des Mischverkehrs immer noch Unfälle erleiden. Durch zusätzliche Optionen der Innenraumgestaltung wird eine stärkere Gewichtung der *pre-crash* Phase notwendig werden, durch die vorhandene Sensorausstattung aber auch unterstützt. Um einen bestmöglichen Schutz für den Insassen darzustellen, muss entsprechend die Qualität der Eingangsdaten mit der biomechanischen Wirksamkeit des Schutzmittels verknüpft werden. Insgesamt wird daher die kombinatorische Vielfalt der Ansteuerungsmöglichkeiten im Vergleich mit heutigen Systemen stark zunehmen. Dadurch werden neue Methoden der Ansteuerungsanalyse und –beschreibung notwendig. Eine mögliche Lösung hierzu bietet die Verwendung einer parameterbasierten Ansteuerung. Durch eine geeignete Analyse, entweder physikalisch, mit Methoden der künstlichen Intelligenz oder in Form hybrider Verfahren, die die beiden vorhergehende Methoden sinnvoll kombinieren, wird das Auslöseverhalten in Abhängigkeit möglichst weniger Variablen, aber unter Beibehaltung der notwendigen Variationsvielfalt, als kontinuierliches Feld mittels einer geschlossenen Formulierung dargestellt. Die Entwicklung und Absicherung kann mittels einer Modellierungskaskade durchgeführt werden. Diese ermöglicht hochgenaue, aber aufwändig zu gewinnende Einzelaussagen mit Erkenntnissen niedriger Genauigkeit, aber einfacher zu gewinnend und ein größeres Feld abdeckend, zu verknüpfen. Anhand eines einfachen Beispiels wurde die Wirksamkeit dieses Ansatzes demonstriert. Das besondere Potenzial besteht in der Invarianz der Beschreibung gegenüber Fahrzeugeigenschaften und der Anpassbarkeit an Rückhaltesystemeigenschaften. In Zukunft sollte gezielt daran gearbeitet werden, diesen Ansatz dahingehend weiterzuentwickeln, dass damit das ganze Feld der Unfallsituationen („360° Abdeckung“) erfasst und mit den Rückhaltemitteln verknüpft wird. Dafür ist allerdings eine tiefere Zusammenarbeit zwischen bisher stärker getrennten Bereichen notwendig: Die Eigenschaften der Rückhaltemittel, die Unfallsituation und das Aufstellen der Anforderungen werden bei automatischen Fahrzeugen viel stärker mit dem Verfahren der Ansteuerung in Echtzeit verknüpft sein, als es bisher der Fall ist.

## Literatur

- [1] EU-Project OSCCAR, WP1: Determination of future accident scenarios, (osccarproject.eu, OSCCAR has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 768947), Publikation in Vorbereitung
- [2] Swoboda et al, Connect to better protect, VDI Safety Systems, Düsseldorf, Germany, 2018
- [3] F. Laakmann et al, Enabling Technologies for Future Vehicles – Integrated Safety, 14th International Symposium & Accompanying Exhibition on Sophisticated Car Safety Systems, Airbag2018, Mannheim, Germany, 2018
- [4] Sengotto Velevan et al, Occupant Restraint Concepts for Future Seating Positions in Fully Autonomous Vehicles, IEDAS, Ingolstadt, Germany, 2018
- [5] Freienstein et al, Reliable pre-crash detection and decision making for accident against oncoming traffic, VDI Tagung Fahrzeugsicherheit, Berlin, Germany, 2017
- [6] ATD, "ATD Dummy Models", (URL: [http://www.atd-models.de/020\\_de\\_dummy-modelle.html](http://www.atd-models.de/020_de_dummy-modelle.html)), visited 2018.
- [7] THOR50 male Dummy, Freies zugängliches THOR 50 FE Dummy-Modell der UVA, (URL: <https://www.nhtsa.gov/document/thorfelds-dynav21wcertzip>), „distributed by University of Virginia and NHTSA/USDOT“, 2019.
- [8] M. Iwamoto, Y.Nakahira and H. Kimpara, Development and Validation of the Total Human Model for Safety (THUMS) Toward Further Understanding of Occupant Injury Mechanisms in Precrash and During Crash, Traffic Injury Prevention, 2015
- [9] Verfahren und Steuergerät zum Ansteuern zumindest einer Insassenschutzeinrichtung für ein Fahrzeug bei einer Kollision und System zum Insassenschutz für ein Fahrzeug, DE 10 2017 213 914 A1 2019.02.14
- [10] Special Issue: Car Size, Weight, and Safety IIHS Status Report, Vol.44, No. 4, 2009
- [11] IIHS Crashworthiness Evaluation, Crash Test Report 2009 Honda Fit (CF09002B)



# Erkennung der kognitiven Belastung eines Fahrers anhand von Vitalparametern aus realen Fahrzeugsensoren

M.Sc. **Florian Ripper**, Dipl.-Ing. **Koshan Mahdi**,  
Joyson Safety Systems Aschaffenburg GmbH, Berlin

## Zusammenfassung

Im Hinblick auf die zunehmende Automatisierung von Fahrzeugen gewinnt die Einschätzung des Fahrerzustands an Bedeutung. Die ersten eingeführten Systeme für die Automatisierung (SAE Stufen 1 und 2) beruhen darauf, dass der Fahrer die Fahrumgebung weiterhin mit voller Aufmerksamkeit überwacht und lediglich Teile der Fahraufgabe (Lenken und/oder Beschleunigen und Bremsen) von Fahrerassistenzsystemen übernommen werden. Insbesondere bei Automatisierung der Stufe 2, bei der der Fahrer die Fahrumgebung beobachten muss, ohne das Fahrzeug selbst zu steuern, muss ein Überwachungssystem sicherstellen, dass er dieser Aufgabe die erforderliche Aufmerksamkeit schenkt.

Bei höheren Graden der Automatisierung übernimmt das Fahrzeug die Überwachung der Fahrumgebung. Bei Automatisierung der Stufe 3 muss der Fahrer weiterhin jederzeit bereit sein, die Fahraufgabe zu übernehmen. Das Automatisierungssystem muss demnach in der Lage sein, den Zustand des Fahrers im Hinblick seine Übernahmefähigkeit einschätzen zu können. Des Weiteren ergibt sich hier die Möglichkeit, dem Fahrer die Fahraufgabe zum Teil oder vollständig abzunehmen, sollte dieser visuell und/oder mental überlastet sein, und somit die Sicherheit zu erhöhen. Diese beiden Anwendungsfälle können nur durch die Verwendung einer Echtzeitvorhersage der kognitiven Belastung des Fahrers unter Verwendung eines oder mehrerer Sensoren im Fahrzeug realisiert werden.

In dieser Studie wurde der Zusammenhang von physiologischen Merkmalen, die sich mittels realer Fahrzeugsensorik bestimmen lassen, mit der kognitiven Belastung eines Fahrers untersucht. Dazu wurde eine Fahrsimulatorstudie durchgeführt, bei der zehn Probanden unter gleichen Rahmenbedingungen jeweils zehn Fahrt an aufeinanderfolgenden Tagen absolviert haben. Während jeder Fahrt wurde kognitive Belastung in Form von N-Back-Aufgaben induziert und mittels eines NASA-TLX-Fragebogens verifiziert. Die Ergebnisse zeigen eindeutige Zusammenhänge der untersuchten Merkmale mit der kognitiven Belastung. Auf dieser Grundlage konnte ein einfaches Klassifizierungssystem trainiert werden, dass niedrige und hohe kognitive Belastung mit einer Genauigkeit von bis zu 93,4 % unterscheiden kann.

## Abstract

With regard to the rising prevalence of automation in vehicles the estimation of driver state is becoming progressively more important. The first introduced automation systems (SAE level 1 and 2) rely on the driver to constantly monitor the driving environment with full attention while only some parts of the driving task (steering and/or accelerating and braking) are performed by advanced driver assistance systems. Especially 2<sup>nd</sup> level automation requires the driver to pay attention to the driving environment while not actively steering the vehicle.

A driver monitoring system has to make sure that the driver is not getting distracted from this task. With higher level automation the vehicle is responsible for monitoring the driving environment, but even then the driver has to be able to take over at any time up to level 3. Furthermore this level of automation enables the vehicle to increase the safety by partially or fully relieving the driver of the driving task in case of visual and/or mental overload. Both scenarios are only possible if the cognitive workload of the driver can be estimated in real-time using one or multiple sensors in the vehicle. In this study the relationship between physiological features measured with real vehicle sensors with the cognitive workload of a driver was examined.

A driving simulator study was conducted in which ten subjects completed ten drives each under the same basic conditions. During the drives cognitive workload was induced by an N-Back task and verified using a NASA TLX questionnaire. The results show distinct relationships between the examined features and the cognitive workload. Based on that a simple classifier was trained which can distinguish between low and high cognitive workload with an accuracy up to 93.4 %.

## 1. Einleitung

Die Einführung des automatisierten Fahrens motiviert die Erkennung, Vorhersage und Überwachung des Fahrerzustands. Die ersten eingeführten Systeme für die Automatisierung (SAE Stufe 2 oder 3) beruhen auf der Notwendigkeit, dass der Fahrer zu jeder Zeit in der Lage sein muss, die Fahraufgabe zu übernehmen. Das Automatisierungssystem muss erkennen, ob der Fahrer dazu in der Lage ist. Dazu überwacht es beispielsweise die Anwesenheit der Hände am Lenkrad oder die visuelle Aufmerksamkeit des Fahrers. Dadurch wird sichergestellt, dass das Fahrer jederzeit auf unvorhergesehene Situationen im Straßenverkehr oder auf Hinweise des Systems reagieren kann.

Im Hinblick auf höhere Niveaus des automatisierten Fahrens (SAE Stufe 3 oder 4) ergeben sich neue Herausforderungen und Möglichkeiten. Erstens werden sich Fahrer sekundären Aufgaben zuwenden, die ablenkend wirken und ihre kognitive Belastung erhöhen. Ein System, das die kognitive Belastung abschätzt, kann entsprechende Hinweise geben, ob eine längere Übernahmepériode erforderlich ist oder im Extremfall eine Fahrzeugkontrollübernahme durch den Fahrer nicht sicher oder nicht möglich ist. Zweitens kann der Fahrer während der manuellen Fahrt visuell und/oder mental überlastet sein und das Fahrzeug kann Automatisierungsmodi empfehlen, um der Belastung entgegenzuwirken und so die Sicherheit zu erhöhen. Diese beiden Anwendungsfälle können nur durch die Verwendung einer Echtzeitvorhersage der mentalen Belastung des Fahrers unter Verwendung eines oder mehrerer Sensoren im Fahrzeug realisiert werden.

Digital getriebener gesellschaftlicher Wandel, wie die umfassende Verbreitung von Mobiltelefonen, der ständigen Anteilnahme an virtuellen sozialen Strukturen und der Einführung moderner technischer Assistenzsysteme, treibt die Weiterentwicklungen auf diesem Gebiet voran. Auch die Sicherheitsaufsichtsbehörden bedenken den Wandel mit zunehmender Aufmerksamkeit. Zum Beispiel hat EuroNCAP in ihrer Roadmap für 2025 die Bedeutsamkeit fortschrittlicher Maßnahmen zur Überwachung des Fahrerzustands ganz besonders hervorgehoben [2].

## 2. Stress, kognitive Belastung und Ablenkung

Stress, Müdigkeit und die Neigung, Risiken einzugehen, sind Beispiele für menschliche Einflussfaktoren, die die effektive Fahrerleistung begrenzen. Die kognitive oder auch mentale Belastung repräsentiert den Aufwand, der für eine kognitive Aufgabe (Denken, Verstehen, Wahrnehmen, Lernen etc.) erbracht wird. Daher ist zu erwarten, dass die kognitiv Belastung des Fahrers einer großen Anzahl von Einflüssen unterworfen ist. Dadurch wird sie zu einem abstrakten Konzept, welches in jeder Situation mit Vorsicht zu interpretieren ist. Sekundäre Tätigkeiten, welche der Fahrer zusätzlich zu seiner primären Fahrtätigkeit ausführt, erhöhen die mentale Belastung und verringern so die Fahrerleistung [3]. Jede Person ist in der Lage, eine bestimmte Menge von Informationen gleichzeitig zu verarbeiten. Die kognitive Belastung ist abhängig davon, wie viel dieser kognitiven Gesamtkapazität von den zu verarbeitenden Informationen beansprucht wird. Die Informationsverarbeitung umfasst dabei sowohl kognitive als auch emotionale Aspekte. Jede Person evaluiert in jedem Augenblick die Anforderungen der auf sie einwirkenden Informationen und reguliert entsprechend den kognitiven Aufwand zu ihrer Verarbeitung [4].

Diverse Veröffentlichungen haben gezeigt, dass es möglich ist, die kognitive Belastung in einem automobilen Umfeld abzuschätzen, indem Fahrzeugdaten, physiologische Daten des Fahrers und per Videokamera detektierte Verhaltensmuster miteinander kombiniert werden [5]. Die videobasierte Verhaltensmustererkennung ist besonders effizient, wenn die sekundären Tätigkeiten visuelle Anhaltspunkte wie z. B. Blicke auf das Display in der Mittelkonsole oder auf andere definierte Punkte innerhalb des Fahrzeugs zur Folge haben. Die Messung des prozentualen Anteils der Zeit, den der Blick auf den Mittelpunkt der Straße gerichtet ist, entsprechend den NHTSA Distraction Guidelines [6], ist eine gute Methode, die visuelle Ablenkung durch sekundäre Tätigkeiten zu erfassen. Diese Arbeit basiert auf einem Studiendesign, welches sich auf von visueller Ablenkung unabhängige kognitive Belastung konzentriert und diese primär mithilfe von physiologischen Maßen bestimmt. Dafür werden gezielt über gestufte Sekundäraufgaben (N-Back) [7] hohe kognitive Belastungen induziert.

Unter der Vielzahl von physiologischen Parametern, die im Kontext der Abschätzung der mentalen Belastung bereits untersucht wurden, ist das Elektrokardiogramm (EKG) eine der am häufigsten eingesetzten Größen. Auf dem EKG abgeleitete Metriken, insbesondere die Herzschlagfrequenz (engl. „heart rate“, HR) oder das Intervall zwischen den Schlägen (engl. „interbeat interval“, IBI), spiegeln die Aktivität des autonomen Nervensystems (ANS) zufriedenstellend wieder. Mehrere vorangegangene Studien weisen darauf hin, dass ein Zusammenhang zwischen dem EKG-Signal und der mentalen Belastung im Fahrzeugumfeld be-

steht. So haben unter anderem Mehler et al. (2009), Rodrigues et al. (2015) und Fallahi et al. (2016) festgestellt, dass zwischen dem Mittelwert der IBIs und der kognitiven Belastung sowie der Müdigkeit des Fahrers ein Zusammenhang besteht. Demnach hat eine erhöhte kognitive Belastung eine Verringerung des Durchschnitts-IBIs zur Folge, während Müdigkeit zu einem Anstieg des Durchschnitts-IBIs führt [5, 7, 9, 10].

Eine weitere vielversprechende Datenquelle zur Abschätzung der mentalen Belastung ist das dynamische Verhalten des Fahrzeugs. Der Einfluss der kognitiven Belastung auf den Fahrer kann indirekt über die vom Fahrzeug aufgezeichneten Daten zur Fahrdynamik gemessen werden; z. B. anhand der Durchschnittsgeschwindigkeit des Fahrzeugs oder des Lenkwinkels [5].

### 3. Hypothesen

Im Rahmen der in dieser Veröffentlichung beschriebenen Untersuchungen sollte anhand von erhobenen Fahrdynamik-Daten und physiologischen Fahrerdaten ein Klassifizierungssystem entwickelt werden, welches eine variierende kognitive Belastung des Fahrers abschätzen kann. Im Vorfeld durchgeführte Studien haben gezeigt, dass das ANS sensibel auf unterschiedliche kognitive Belastungszustände reagiert, wenn man diese mit einem „belastungslosen“ Basiszustand vergleicht, mit dem sich die einzelnen Probanden untereinander vergleichen lassen [5]. In diesem Zusammenhang durchgeführte Literaturrecherchen haben ergeben, dass bisher kaum Studien zu variierender kognitiver Belastung in der Fahrzeugumgebung durchgeführt wurden, bei denen wiederholte Messungen an den gleichen Probanden durchgeführt wurden (z. B. an mehreren Tagen). Anhand solcher Wiederholungsmessungen können kontextuelle Umgebungseffekte in die Untersuchung einbezogen werden, wodurch Veränderungen der Fahrerleistung über eine gewisse Zeitspanne nachvollziehbar werden. Auf diese Weise sollte dem Klassifikator beigebracht werden, die mentale Belastung anhand der aufgenommenen Messwerte im Hinblick auf die individuelle Reaktion des ANS jeder Versuchsperson abzuschätzen. Auf Grundlage der beschriebenen Annahmen ergeben sich die folgenden Hypothesen:

- Die Induktion von kognitiver Belastung führt zu einer Reaktion des ANS (Anstieg der HR) des Fahrers, welche sich je Schweregrad der Belastung und je Versuchsperson unterscheidet.
- Die Fahrdynamik-Daten und die physiologischen Fahrerdaten zeigen vergleichbare Trends in den kognitiven Belastungszuständen.

- Die Genauigkeit eines merkmalsbasierten Klassifikators ist höher, wenn er auf die Daten einer einzelnen Versuchsperson (aus wiederholten Messungen) angewendet wird als wenn er über eine Gruppe von Versuchspersonen angewendet wird.
- Die physiologischen Daten zeigen Abhängigkeiten zum Messzeitpunkt auf. Es ist zu erwarten, dass sich insbesondere die Herzrate entsprechend dem circadianen Rhythmus am Morgen und am Abend unterscheidet.

#### 4. Fahrsimulator-Studie

Für diese Studie wurde ein Fahrsimulator bestehend aus einem Armaturenbrett, einer Mittelkonsole mit Touchscreen, einem Lenkrad und einem Sitz aus einem mittelgroßen Fahrzeug verwendet. Zur Simulation der Fahrt wurde die Simulationssoftware SILAB Version 5 von WIVW eingesetzt. Die Simulation wird auf einem 55-Zoll-Bildschirm angezeigt.

Zur Durchführung der Studie wurden zehn Mitarbeiter vom Berliner Standort der Firma Joyson Safety Systems (JSS) ausgewählt. Die Versuchspopulation bestand aus weiblichen und männlichen Versuchspersonen im Alter von 25 bis 50 Jahren. Die wiederholten Testfahrten wurden bei jeder Versuchsperson über einen Zeitraum von fünf aufeinander folgenden Tagen jeweils am Morgen und am Abend durchgeführt. Zu Beginn des Experiments war jede Versuchsperson dazu angehalten, eine Trainingsfahrt im Simulator zu absolvieren, um sich mit diesem sowie mit der Beschaffenheit der kognitiven Sekundäraufgaben vertraut zu machen. Die Daten dieser Testfahrt wurden aufgezeichnet, flossen aber nicht in die Auswertung der Studie ein. Ein entsprechender Fragebogen [8] am Anfang und am Ende der Testfahrt hat sichergestellt, dass keine der Versuchspersonen durch Simulatorkrankheit beeinträchtigt war. Alle Versuchspersonen wurden darauf hingewiesen, sich während der Testfahrten an die gültigen Verkehrsregeln zu halten und sich primär auf die Fahraufgaben zu konzentrieren.



Bild 1: Aufbau der Versuchsfahrten

Die Testfahrten sind darauf ausgelegt, den Arbeitsweg (morgens und abends) zu simulieren. Jede Fahrt besteht aus einer 30-minütigen Fahrt durch vorwiegend ländliches Terrain. Die Fahrten sind in fünf 6-Minuten-Abschnitte unterteilt, nach denen die Versuchsperson jeweils einen Fragenbogen zum subjektiven Empfinden der kognitiven Belastung ausfüllen muss. Der erste und der letzte Abschnitt sind bei jeder Fahrt zur Ermittlung der Referenzwerte (engl. „baseline“) vorgesehen und enthalten keine Sekundäraufgabe. Die drei mittleren Abschnitte enthalten eine akustische N-Back-Aufgabe in einem von drei möglichen Schweregraden (0-Back, 1-Back, 2-Back) zur Induktion von kognitiver Belastung, welche dem Probanden in einer randomisierten Reihenfolge präsentiert werden. Die akustische Präsentation und Eingabe der Aufgabe wurde gewählt, um die motorische Kontrolle und die visuelle Aufmerksamkeit für die primäre Fahraufgabe nicht zu beeinträchtigen [7]. Die verbale Eingabe wurde über ein Mikrofon aufgenommen und mittels einer automatisierten Spracherkennung (Microsoft Speech API) ausgewertet.

## 5. Vitalsensorik für die Anwendung im Fahrzeug

JSS ist einer der führenden Lieferanten für Lenkräder, welche je nach Bedarf des Automobilherstellers mit zusätzlichen Funktionen wie z. B. der Erkennung von Position und Stärke der Lenkradberührung („Hands-On Detection“, HOD) ausgestattet sein können. Da der Bedarf an Vitaldaten für eine fortschrittliche Fahrerzustandserkennung stark zunimmt, hat JSS sein Portfolio um ein Lenkrad erweitert, welches in der Lage ist, physiologische (Vital-) Daten des Fahrers wie EKG aufzuzeichnen. Ein solches Vitalenkrad („Vital Sensing Steering Wheel“, VSSStW) wurde im Rahmen dieser Studie eingesetzt.

Das VSSStW hat an den Seiten des Lenkrad-Kranzes zwei Elektroden, über die eine 2-Punkt-Ableitung des EKGs aufgenommen wird. Die aus diesen Aufzeichnungen abgeleiteten IBIs haben eine Genauigkeit im Bereich von  $\pm 4$  ms im Vergleich zu etablierten EKG-Messgeräten. Dieses Signal kann verwendet werden, um typische Maße für die Herzratenvariabilität wie RMSSD („Root Mean Square of Successive Interbeat Interval Differences“) und die Anzahl von aufeinander folgenden IBIs, die um mehr als 50 ms voneinander abweichen, (NN50) abzuleiten. Beide Maße wurden bereits in diversen Studien eingesetzt, um die mentale Belastung einzuschätzen [5]. Bild 2 zeigt ein Beispiel für den unbearbeiteten EKG-Output des VSSStW sowie das daraus abgeleitete IBI-Signal.

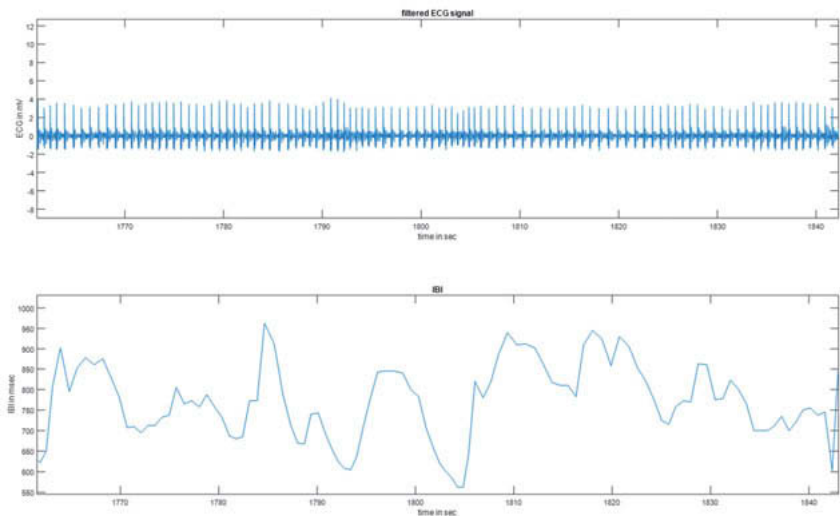


Bild 2: VSStW-EKG (oben) und abgeleitetes IBI-Signal (unten)

Bild 3 zeigt einen Ausschnitt des gleichen EKG-Signals mit einer höheren zeitlichen Auflösung, in dem die Ableitungscharakteristik des VSStW-EKGs anhand der abgebildeten Herzzyklen deutlich wird.

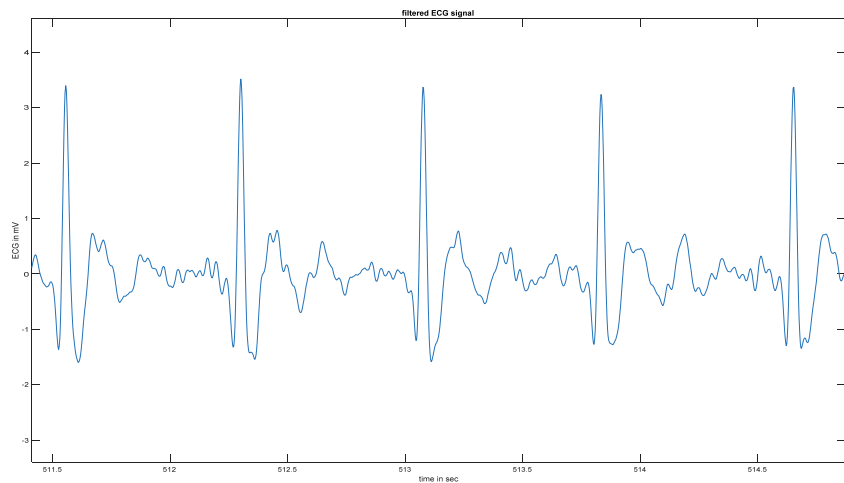


Bild 3: Ausschnitt aus dem VSStW-EKG mit erkennbaren QRS-Komplexen



Ergänzend zum VSStW wurde in dieser Studie ein Prototyp des Vital Sensing Seatbelt (VSSB) eingesetzt. Dabei handelt es sich um einen 3-Punkt-Gurt, in dessen Thorax-Abschnitt ein sehr schmales Sensorband eingebettet ist, welches den Herzschlag eines unbewegten Insassen bestimmen kann. Ein solches System ist besonders dann sinnvoll, wenn der Fahrer mit fortschreitender Automatisierung des Fahrens nicht mehr gezwungen ist, das Lenkrad zu jeder Zeit zu berühren. Das gurtbasierte System kann demnach auch während des automatisierten Fahrens den Zustand des Fahrers (oder der Insassen) überwachen und so eine zuverlässige Übergabe der Fahraufgabe zwischen Automatisierung und Fahrer unterstützen.

Aufgrund der angewandten Messmethode gibt der Prototyp die durchschnittliche Herzrate über ein gleitendes 30-Sekunden-Fenster aus. Die Erzeugung eines akkuraten IBI-Signals ist so nicht möglich, wodurch ein Teil der Maße zur Abschätzung der mentalen Belastung durch den Gurt allein nicht bereitgestellt werden kann.

Hinzu kommt, dass das Signal des VSSB unter realen Fahrbedingungen Rauschen beinhaltet, das durch Vibrationen (und Stöße) sowie durch Bewegungen des Insassen geprägt ist. Interne Studien von JSS in realen Fahrumgebungen haben ergeben, dass der aktuelle Prototyp unter normalen Straßenbedingungen zwischen 70 und 80 Prozent der Zeit ein zuverlässiges Signal liefert.

Zur Validierung der mit der Fahrzeugsensorik gemessenen Herzraten wird ein EKG-Referenzmessgerät verwendet. Dabei handelt es sich um eine interne Entwicklung von JSS, welche gegen standardmäßig in Industrie und an Universitäten eingesetzte Messgeräte validiert wurde. Das Referenzmessgerät ist tragbar und nutzt Gelelektroden, die direkt auf der Brust des Probanden positioniert werden, um eine 2-Kanal-EKG-Ableitung mit einer Auflösung von 24 Bit und einer Abtastrate von 1 kHz aufzuzeichnen. Anhand dieser Aufzeichnungen lassen sich IBIs mit einer Genauigkeit von  $\pm 2$  ms ableiten.

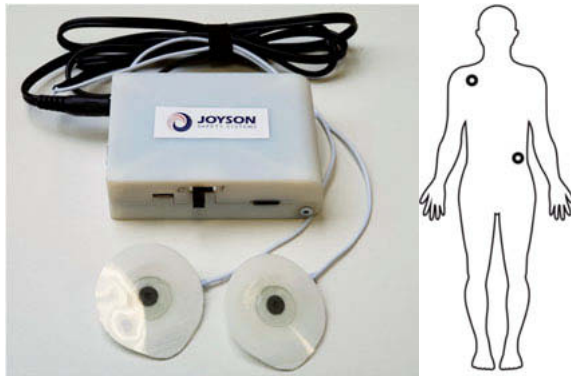


Bild 4: JSS Vitalrekorder (links) und Positionierung der EKG-Elektroden (rechts)

Zusätzlich wurden in der Studie kamerabasierte Fahrerdaten mittels eines „Driver Monitoring System“ (DMS) erhoben. Dabei handelt es sich um eines der ersten Kamerasysteme zur Fahrerüberwachung in einem serienproduzierten Fahrzeug. Das DMS kann dem Algorithmus eines (teil-)automatisierten Fahrzeugs (SAE Level 2+) Informationen zu Kopfposition und -orientierung, Öffnung der Augenlider, Blickrichtung etc. liefern und so eine Einschätzung des Fahrerszustands ermöglichen.

## 5. Ansatz

Das Studiendesign ermöglichte die Ableitung einer Vielzahl von möglichen Variablen, die zur Bildung eines einfachen Klassifizierungsmodells verwendet werden können. Die untersuchten Variablen wurden anhand der Bewertung ihrer Aussagekraft in Bezug auf die mentale Belastung aus vorangegangenen Studien [5] ausgewählt. Das Ziel war, mit so wenig Variablen wie möglich und einem möglichst einfachen und nachvollziehbaren Klassifizierungssystem eine hohe Klassifizierungsgenauigkeit zu erzielen. Die folgenden Merkmale wurden letztendlich für die Klassifikation verwendet:

- durchschnittliche Herzrate (HR)
- Herzratenvariabilität (RMSSD)
- Standardabweichung des horizontalen Blickwinkels (engl. „standard deviation of horizontal gaze angle“, SDHGA)
- Standardabweichung von der Mitte der Straße (engl. „standard deviation from center of lane“, SDCL)

- Standardabweichung der Gaspedal-Position (engl. „standard deviation of the acceleration pedal position“, SDAPP)

Die mit verschiedenen Sensoren (Referenz-EKG-Sensor, VSStW, VSSB, DMS) aufgenommenen Signale wurden mittels Zeitstempeln synchronisiert und auf eine gemeinsame Abtastrate von 40 Hz interpoliert. Die oben genannten Merkmale wurden davon ausgehend in einem 60-Sekunden-Zeitfenster, das sich in 5-Sekunden-Schritten über das Signal bewegt, berechnet. Im Anschluss wurden die Merkmale für jede Fahrt mit dem 5. und dem 95. Perzentil der Fahrt normalisiert, um Fluktuationen der Basislinie von Aufnahme zu Aufnahme zu eliminieren und die Klassifizierungsgenauigkeit zu erhöhen. Als erster Ansatz zur Klassifikation des Belastungslevels wurden Entscheidungsbäume für jeden einzelnen Probanden und für alle Probanden zusammen erzeugt.

## 6. Ergebnisse der Simulator-Studie

Fünf Versuchsfahrten wurden aus der Analyse der Ergebnisse ausgeschlossen, da die Probanden nicht alle N-Back-Aufgaben vollständig abschließen konnten.

Die subjektive Bewertung der mentalen Belastung wurde mittels eines NASA-TLX-Fragebogens aufgenommen, welcher im Anschluss an jeden Fahrtabschnitt von den Probanden ausgefüllt wurde. Die Diagramme in Bild 5 zeigen einen signifikanten Unterschied in der Bewertung der verschiedenen Schwierigkeitsgrade des N-Back-Tests. Demnach sind die ausgewählten Sekundäraufgaben geeignet, unterschiedlich starke kognitive Belastung parallel zur Fahraufgabe zu induzieren.

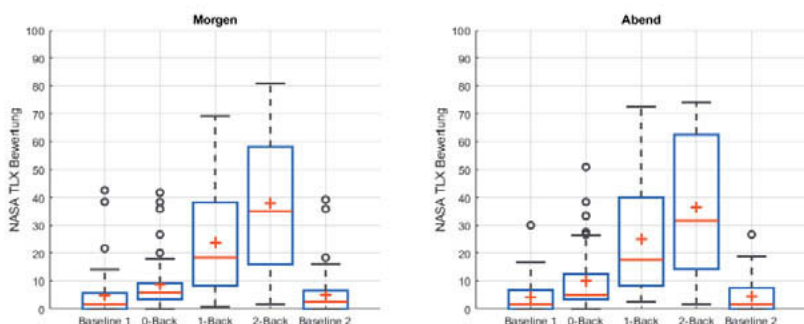


Bild 5: Bewertung der subjektiven kognitiven Belastung

Zur Detektion der kognitive Belastung mit in Fahrzeugen verfügbaren Sensoren wurden die Merkmale HR und RMSSD aus dem EKG, SDHGA aus den Kameradaten sowie SDCL aus der Fahrzeugsensorik untersucht. Bild 6 zeigt die unnormierte Verteilung der Merkmale über alle verfügbaren Datensätze. Es lässt sich erkennen, dass die Sekundäraufgabe in jedem Merkmal eine Reaktion hervorruft. Da diese jedoch von Proband zu Proband unterschiedlich ausfällt, lässt sich nur eine schwache allgemeingültige Abhängigkeit feststellen.

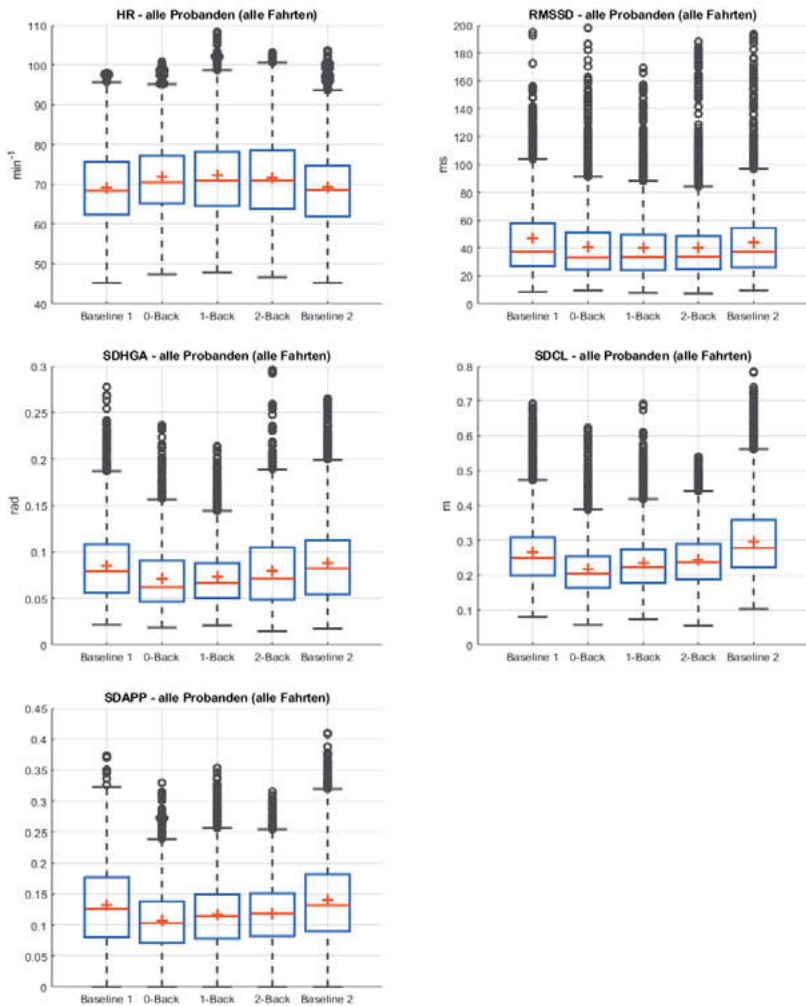


Bild 6: Statistische Verteilung der Merkmale über alle Probanden

Insbesondere die HR scheint stark von der Verfassung des Probanden zum Zeitpunkt der Versuchsfahrt abhängig zu sein. Insbesondere die Tageszeit bzw. der aktuelle Punkt im circadianen Rhythmus scheinen einen großen Einfluss auf die HR zu haben. Bild 7 zeigt, dass die HR während der Versuchsfahrten am Morgen durchschnittlich 4,7 Schläge pro

Minute (engl. „beats per minute“, bpm) höher ist als am Abend. Damit ist dieser Effekt beinahe doppelt so groß wie durchschnittliche Anstieg der Herzrate durch die kognitive Belastung (ca. 2,5 bpm zwischen Baseline und 2-Back-Aufgabe).

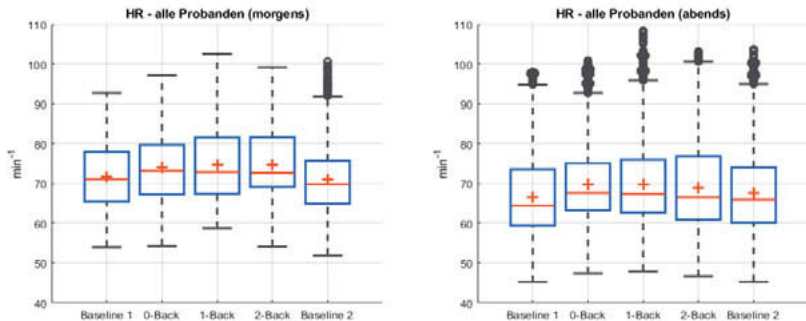


Bild 7: Vergleich der HR zwischen Fahrten am Morgen und am Abend

Hinzu kommt, dass sich der typische Bereich der HR von Proband zu Proband unterscheidet und die Baseline der HR zwischen einzelnen Versuchsfahrten in einem Bereich variieren kann, der etwa der Veränderung durch die kognitive Belastung entspricht. All diese Effekte führen dazu, dass sich die Verteilungen der Merkmale unter verschieden starken Belastungen stark überlappen und eine Klassifizierung auf diesen Daten sehr schwierig ist.

Um diese Einflüsse zu verringern wurden die Merkmale fahrtweise normalisiert. Durch dieses Vorgehen fallen Baseline-Unterschiede zwischen den Versuchsfahrten nicht mehr ins Gewicht und die Aufspreizung der Merkmalsverteilungen wird reduziert. Bild 8 zeigt die statistische Verteilung der Merkmale nach der Normalisierung. Insbesondere bei der HR wurde so erreicht, dass sich die Überlappung der Verteilungen stark verringert.

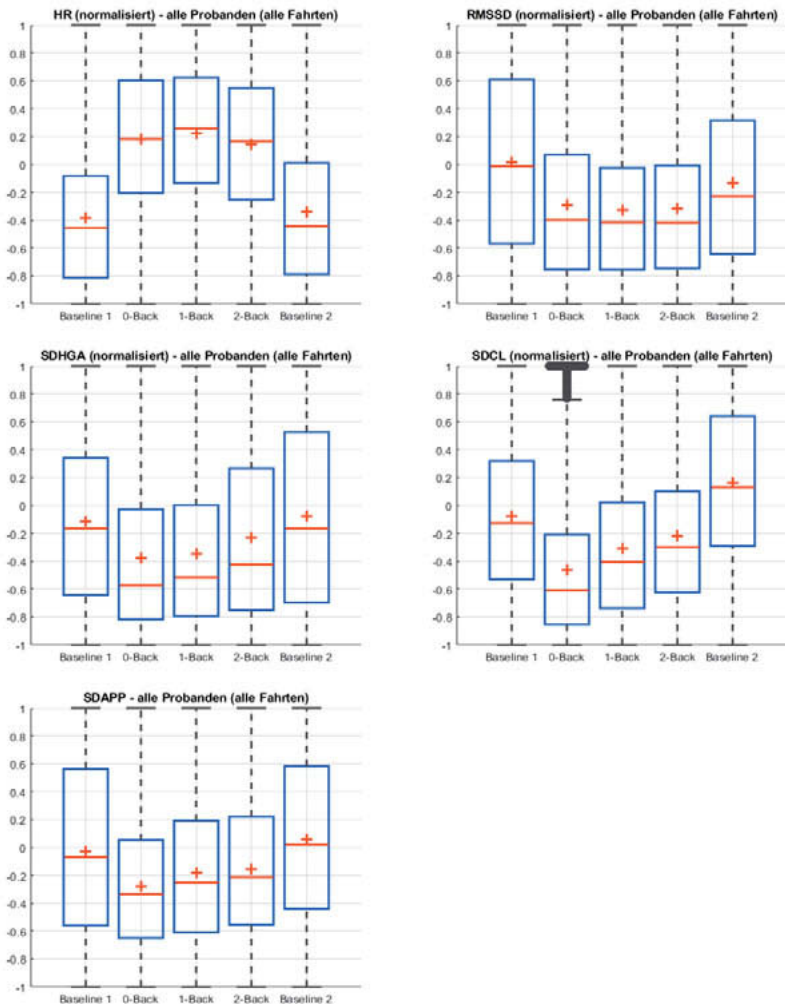


Bild 8: Statistische Verteilung der normalisierten Merkmale über alle Probanden

Anhand der Verteilungen in Bild 8 lässt sich ableiten, dass insbesondere die HR einen eindeutigen Zusammenhang mit der kognitiven Belastung zeigt. Die HR nimmt unter Belastung zu, während der RMSSD abnimmt. Allerdings ist dieser Effekt nur bei der HR bei (beinahe) allen Probanden stark ausgeprägt. Beim RMSSD gibt es einige Probanden, bei

denen das Merkmal sehr aussagekräftig ist, aber auch Probanden, bei denen sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen RMSSD und kognitiver Belastung feststellen lässt. Das Gleiche gilt für die Merkmale SDHGA, SDCL und SDAPP.

Als erster Ansatz für ein Modell zur Abschätzung der kognitiven Belastung wurde ein Entscheidungsbaum auf die fünf untersuchten Merkmale angewandt.

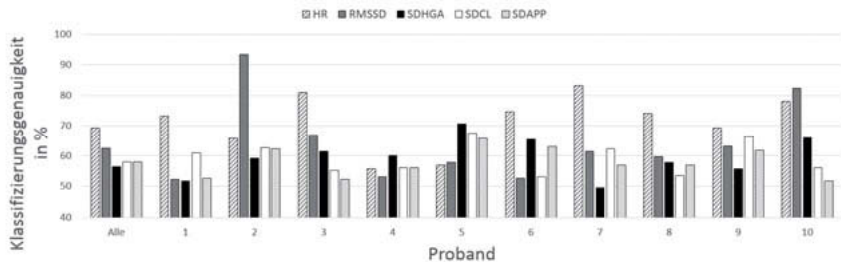


Bild 9: Ergebnisse der Klassifizierung bei Verwendung einzelner Merkmale

Bild 9 macht den Einfluss der einzelnen Merkmale auf die Klassifizierungsgenauigkeit deutlich. Es ist zu erkennen, dass die HR allein sowohl beim generalisierten Klassifizierer als auch bei den meisten individuellen Probanden die besten Ergebnisse liefert. Der Einfluss der übrigen Merkmale unterscheidet sich von Person zu Person, wobei das Merkmal RMSSD bei Proband 2 die insgesamt höchste Klassifizierungsgenauigkeit (93,4 %) ermöglicht.

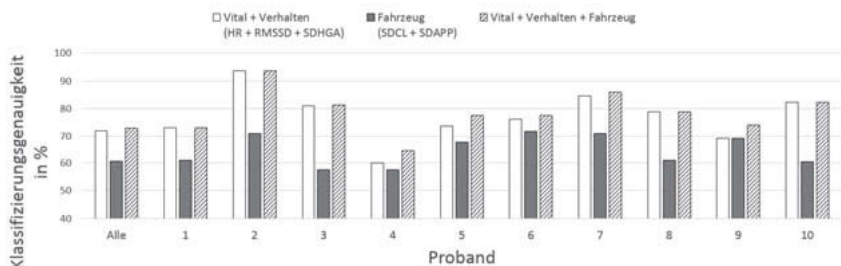


Bild 10: Ergebnisse der Klassifizierung bei Verwendung kombinierter Merkmale

B zeigt die Klassifizierungsgenauigkeit getrennt nach Merkmalen, welche aus der Fahrzeugsensorik abgeleitet werden können, und solchen, die durch zusätzliche Vitalsensorik und Kameradaten erzeugt werden können. Dabei ist zu erkennen, dass die



Merkmale, die durch die zusätzliche Sensorik (HR, RMSSD, SDHGA) ermöglicht werden, in jedem Fall mindestens genauso gut sind wie die Fahrzeug-Merkmale und zumeist eine wesentlich höhere Klassifizierungsgenauigkeit erlauben. Die Kombination von Vital-, Verhaltens- und Fahrzeug-Merkmalen liefert die besten Ergebnisse, welche allerdings in den meisten Fällen nur knapp über denen ohne Fahrzeug-Merkmale liegt.

Insgesamt betrachtet kann dieses Modell Baseline und 2-Back-Aufgabe mit einer Genauigkeit von 73,0 % unterscheiden. Bei der Anwendung auf einzelne Versuchspersonen, konnten Klassifizierungsgenauigkeiten von bis zu 93,4 % erreicht werden.

Außerdem kann die Hypothese bestätigt werden, dass das Training eines individuellen Klassifizierers (in den meisten Fällen) eine höhere Genauigkeit erzielt als ein generalisierter Klassifizierer. Es wurde weiterhin festgestellt, dass die Klassifizierungsgenauigkeit im Allgemeinen durch die Hinzunahme zusätzlicher Merkmale steigt. Hierbei stellen die Versuchspersonen 1, 2 und 10 die Ausnahme dar, da bei ihnen jeweils ein einzelnes Merkmal (1: HR, 2 und 10: RMSSD) eine dermaßen hohe Korrelation mit der mentalen Belastung aufweist, dass die zusätzlichen Merkmale nicht in den Entscheidungsbaum eingebunden werden und so nicht zur Klassifizierung beitragen.

## 7. Schlussfolgerung

Die Ergebnisse dieser Studie unterstützen die aufgestellten Hypothesen und führen zu einer Reihe von Schlussfolgerungen, welche bei der Implementierung eines Algorithmus zur Einschätzung der kognitiven Belastung berücksichtigt werden müssen.

Die Klassifizierung mittels eines einfachen Entscheidungsbaums lässt den Einfluss der kognitiven Belastung auf die untersuchten Merkmale erkennen: Bei jedem Probanden reagieren die Merkmale unterschiedlich stark auf kognitive Belastung. Daher scheint ein individuell auf den Probanden abgestimmtes Klassifizierungssystem ein besserer Ansatz zu sein als ein allgemeingültiger Klassifizierer. Die Klassifizierungsergebnisse von bis zu 93,4 % stützen diese These. Um diese Ergebnisse zu erhalten, ist es allerdings erforderlich, eine Baseline für jede einzelne Fahrt zu erzeugen, da die Merkmale in Abhängigkeit von der Tageszeit und dem Zustand des Fahrers stark variieren können.

Für die Anwendung im Fahrzeug ist es förderlich (und möglicherweise sogar erforderlich), ein solches auf physiologischen Daten basierendes Belastungs-Erkennungssystem mit ei-

nem kamerabasierten System, das visuelle Ablenkung entsprechend den NHTSA Distraction Guidelines [6] erkennt, zu kombinieren. Des Weiteren sollte der Entscheidungsbaum zugunsten eines komplexeren Klassifizierungssystems ausgetauscht werden. Dieser liefert zwar wichtige Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen der kognitiven Belastung und den untersuchten Merkmalen, kann aber komplexe Zusammenhänge nur ungenügend abbilden. Support Vector Machines oder künstliche neuronale Netze bieten ein weitaus größeres Potential, derartige Zusammenhänge nachzubilden.

Auch wenn die Ergebnisse dieser Studie vielversprechend klingen, empfehlen die Autoren eine Verifizierung mit einer größeren Datenbasis, welche sowohl mehr Probanden als auch unterschiedliche Level kognitiver Belastung und unterschiedliche Methoden der Belastungsinduktion enthält. Unter Berücksichtigung des starken Einflusses der Tageszeit auf die Herzrate erscheint es weiterhin sinnvoll, eine tiefgreifendere Untersuchung der Einflüsse von Müdigkeit, circadischem Rhythmus und möglicher anderer Faktoren auf die kognitive Belastung durchzuführen.

## 8. Literaturangaben

- [1] „Collision Between a Car Operating With Automated Vehicle Control System and a Tractor-Semitrailer Truck Near Williston, Florida, May 7, 2016“, Highway Accident Report NTSB/HAR-17/02, National Transportation Safety Board, 2017
- [2] „EuroNCAP Roadmap 2025“, Revision 4, EuroNCAP, Brüssel, Niederlande 2017
- [3] da Silva, F.P. (2014): „Mental Workload, Task Demand and Driving Performance: What Relation?“.- Procedia - Social and Behavioural Sciences, 12/2014, 310-319
- [4] Hacker, W. (2018): „Definitions of Mental Workload Psychology Essay.“.- UKEssays.com, 11/2018, <<https://www.ukessays.com/essays/psychology/definitions-of-mental-workload-psychology-essay.php?vref=1>>
- [5] Rastagoo et al. (2019): „A Critical Review of Proactive Detection of Driver Stress Levels Based on Multimodal Measurements.“.- ACM Computing Surveys, 51(5), 01/2019, Artikel 88, New York, NY, USA
- [6] National Highway Safety Administration (NHTSA): „Visual-Manual NHTSA Driver Distraction Guidelines for In-Vehicle Electronic Devices“. NHTSA-2010-0053, 177, Washington, DC, USA 2012
- [7] Mehler et al. (2009): „Impact of Incremental Increases in Cognitive Workload on Physiological Arousal and Performance in Young Adult Drivers.“.- Transportation Research Record, 2138(1), 1/2009, 6-12
- [8] Kennedy et al. (1993): „Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness.“.- The international journal of aviation psychology, 3(3), 203-220
- [9] Rodrigues et al. (2105): „A Mobile Sensing Approach to Stress Detection and Memory Activation for Public Bus Drivers.“.- IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 16(6), 12/2015, 3294-3303
- [10] Fallahi et al. (2016): „Effects of mental workload on physiological and subjective responses during traffic density monitoring: a field study.“.- Applied ergonomics, 52, 01/2016, 95-103



# Injury Risk on Rearward Facing Seats in Frontal Impact

## Sled Tests and Simulation in a Generic Test Environment

Dr. rer. nat. **H. Zellmer**, **A. Soni**, PhD, **S. Schilling**, M.Sc.,  
Dr.-Ing. **B. Eickhoff**, Autoliv B.V. & Co. KG, Elmshorn

### Abstract

The introduction of highly automated respectively autonomous vehicles offers new seating configurations of the passenger compartment and rearward facing or swivel front seats were described in several studies. At least, as long as conventional and fully-automated vehicles share the same roads, crashes may occur. Occupant protection on a rearward facing seat must therefore be on the same level as on a forward facing seat. In order to assess occupant response on a rearward facing seat in a 56 km/h full frontal impact, a test set-up was developed with a Hybrid III 50<sup>th</sup> percentile male dummy on a generic seat. For a qualified interpretation of dummy loadings and the performance of the restraint system, the crash was divided into three phases: (1) impact phase until the maximum dummy rearward displacement, (2) dummy rebound before interaction with the seat belt, and (3) dummy in rebound and interaction with the seat belt. The impact phase (1) is characterized by the highest chest acceleration, being close to the injury assessment reference value (IARV) of 60 g in 56 km/h sled tests. The lumbar spine was mainly loaded in compression. The rebound interaction phase (3) was influenced by the seat belt system, chest deflection was below 20 mm and the viscous criterion V\*C was below 0.1 m/s in all tests.

In order to perform a parameter study, the generic test environment was modelled using the explicit solver environment of LS-Dyna. The seat structure was slightly modified after validation of the simulation, a cut-out in the back rest in the area of the lumbar spine was made in order to avoid unrealistic lumbar spine to back rest contact. With this, the lumbar spine compression in the reference set-up was reduced from 5.0 kN to 4.6 kN. Chest acceleration in the reference set-up was 49 g, the occupant load criterion (OLC) of the reference crash pulse being 30.8 g. The simulation study focussed on Phase 1. Chest acceleration was the injury assessment value closest to its reference value, it exceeded 80% of its IARV at an OLC of 30 g and 100% of its IARV at an OLC of 38 g. The back rest kinematics showed to be essential for the injury assessment values (IAV) in Phase 1, a late stop of back rest rearward movement must be avoided as with this both chest acceleration and lumbar spine compression can exceed its IARV. A restraint system for Phases 2 and 3 must be adapted to the individual seat and will be

dependent on the energy absorption in back rest and the belt geometry. The movement of extremities especially in oblique impact requires further investigation.

## Zusammenfassung

Die Einführung automatisierter, bzw. autonom fahrender Fahrzeuge ermöglicht neue Innenraumkonzepte, dabei wurden rückwärts gerichtete oder drehbare Vordersitze in verschiedenen Studien vorgestellt. Solange sich konventionelle und automatisierte Fahrzeuge die gleichen Straßen teilen, können Kollisionen mit anderen Fahrzeugen nicht ausgeschlossen werden. Der Insassenschutz auf einem rückwärts gerichteten Sitz muss daher auf dem gleichen Niveau liegen wie auf einem konventionellen Sitz. Um den Insassenschutz bei einem Frontalaufprall mit 56 km/h bewerten zu können, wurde eine generische Versuchsumgebung mit einem Hybrid-III-50%-Dummy auf einem rückwärts gerichtetem Konzeptsitz entwickelt. Zur Beschreibung der Dummy-Belastungen wurde der Crash in drei Phasen eingeteilt: (1) Anprallphase bis zur maximalen Rückverlagerung des Dummys, (2) Rückprall des Dummys vor Kontakt mit dem Sicherheitsgurt und (3) Dummy im Rückprall und Rückhaltung durch den Gurt. In Phase 1 treten die höchsten Brustbeschleunigungen auf, in Schlittenversuchen mit 56 km/h lag der 3-ms-Wert nahe dem Grenzwert von 60 g. Die Lendenwirbelsäule wurde hauptsächlich in Druck belastet, die höchsten Werte traten ebenfalls in Phase 1 auf. Dummy-Belastungen in Phase 3 wurden durch das Sicherheitsgurtsystem beeinflusst, die Brust-eindrückung lag in allen Tests unter 20 mm und das *Viscous Criterion* V\*C unter 0,1 m/s.

Der Testaufbau wurde in der expliziten Solver-Umgebung von LS-Dyna modelliert. Die Sitzstruktur wurde nach Validierung der Simulation leicht modifiziert, um einen unrealistischen Kontakt zwischen Lendenwirbelsäule und Lehne zu vermeiden. Dadurch wurden die Druckwerte in der Lendenwirbelsäule auf 4,6 kN reduziert. Diese modifizierte Simulationsumgebung wurde im Folgenden als Referenzumgebung genutzt und eine Parameterstudie durchgeführt. Die Brustbeschleunigung war der Verletzungskennwert, der am nächsten an seinem Grenzwert lag. Sie überstieg 80% ihres Grenzwertes bei einem *Occupant Load Criterion* (OLC) von 30 g und 100% ihres Grenzwertes bei einem OLC von 38 g. Die Kinematik der Rückenlehne in Phase 1 war bestimmend für die Verletzungskennwerte. Hierbei hat sich gezeigt, dass ein abrupter Stopp der Rückwärtsbewegung der Lehne vermieden werden muss, weil dann sowohl die Brustbeschleunigung als auch die Kompression der Lendenwirbelsäule ihren jeweiligen Grenzwert überschreiten können. Ein Rückhaltesystem für die Phasen 2 und 3 muss an den jeweiligen Sitz angepasst werden und ist abhängig von der Energieaufnahme in der Rückenlehne und der Gurtgeometrie. Die Bewegung der Arme und Beine des Dummys, insbesondere bei schrägem Anprall, erfordert weitere Untersuchungen.

## Introduction

The development of automated driving systems of SAE levels 4 and 5 [1] allows for new seating options in automobiles. Swivel front seats are desirable to provide so-called living room seating [2]. With this, the front row passengers would sit on a rearward facing seat. At least, as long as conventional and fully-automated vehicles share the same roads, crashes may occur. Occupant protection on a rearward facing seat must therefore be at least on the same level as on a forward facing seat.

Although few car models are equipped with rearward facing seats, almost no accident analysis focusing on adult car occupants on rearward facing seats is published. An analysis of the German In-Depth Accident Study (GIDAS) identified only five cases with rearward facing adult occupants in ECE M1 vehicles. Only one occupant on a rearward facing seat was injured (MAIS 2), but in all collisions the speed change  $\Delta v$  of the impacted vehicle was below 25 km/h [3].

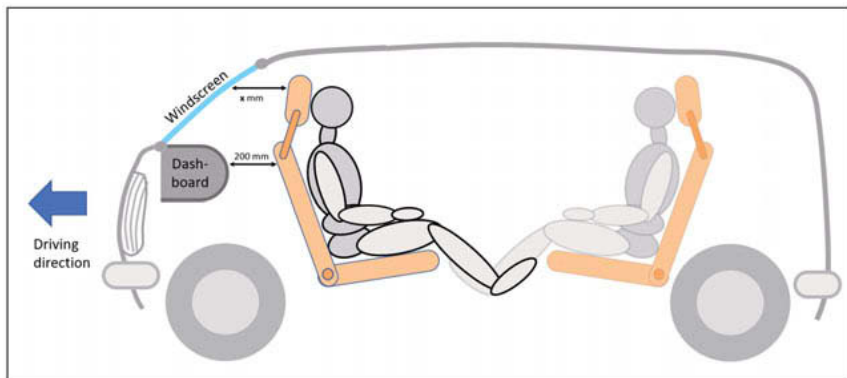


Fig. 1: Living room seating in an autonomous car

Sled testing in the rearward occupant loading direction is mainly to determine neck injury risk in low speed rear impacts. Further, some studies were performed to determine injury risk in so-called high speed rear impacts with a  $\Delta v$  of up to 40 km/h [4, 5]. Pulses for these studies are to represent loadings in a car to car rear impact and are much softer than pulses in a frontal car collision at the same  $\Delta v$ . Simulations with the human FE model THUMS on rearward facing seats in full frontal impact conditions were performed. Kitagawa et al. [6] described occupant kinematics on rearward facing and conventional seats, Xin Jin et al. [7] compared injury risk in

different loading directions and concluded that the rearward facing seating position shows the lowest injury risk.

The scope of our work is to study occupant loading in a frontal impact on rearward facing seats in sled tests and simulation. For this, a generic test environment was established [8]. The initial requirements were as follows:

1. The test set-up should show sufficient integrity to withstand a stiff crash pulse taken from a small vehicle in a full frontal crash according to FMVSS 208 [9] at 56 km/h;
2. The rearward displacement of the back rest during crash should be adjustable and limited to about 200 mm rearward displacement in order to avoid possible occupant head contact to the windscreen (cf. Fig. 1).

The dummy used for the investigation was a Hybrid III 50<sup>th</sup> percentile male. For the rearward loading direction of this dummy, injury reference assessment values (IARV) only exist for low speed rear impact. In order to assess injury risk, IARV were developed [8]. As a guideline, IARV given in European or US legislation were considered first, the respective lower value was taken as reference. First, the injury risk to the thorax and the lumbar spine was in the focus. For the chest the 3 ms chest acceleration clip of 60 g was taken from FMVSS 208 [9], for chest deflection and the viscous criterion the values were taken from ECE-R 137 (42 mm and 1 m/s) [10]. No reference values in automotive regulations exist for the lumbar spine forces, therefore the reference values were taken from an internal specification of General Motors (GM) [11] which specifies IARV for lumbar spine axial loading as 12.2 kN in tension and 6.4 kN in compression.

For a qualified interpretation of dummy loadings and the performance of the restraint system, the crash was divided into three phases: (1) impact phase until the maximum dummy rearward displacement, (2) dummy rebound before interaction with the seat belt, and (3) dummy in rebound and interaction with the seat belt. The impact phase (1) was characterized by the highest 3 ms chest acceleration, close to 60 g in 56 km/h tests with an occupant load criterion OLC [12] of 36 g. The lumbar spine was mainly loaded in compression with forces rising up to 5.8 kN. The rebound interaction phase (3) was influenced by the seat belt system, chest deflection ranged from 5 mm in the test with lap belts to 19 mm in the test with two crossed shoulder belts (crisscross belt). Overall, the tests showed good repeatability and the ability of the generic concept seat to control dummy kinematics.



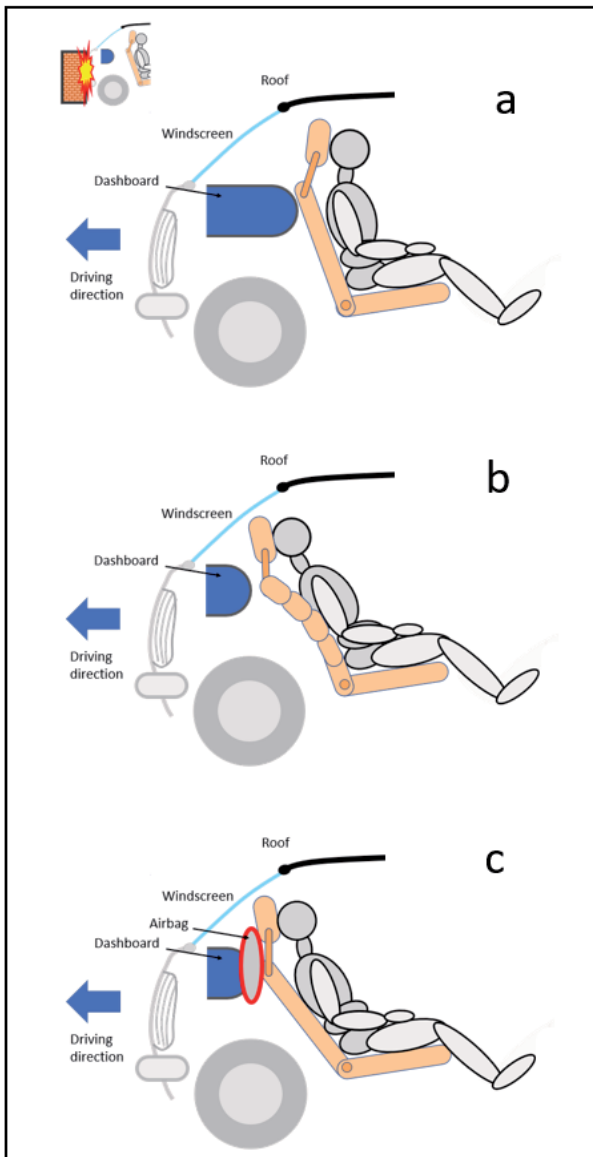


Fig. 2: Possible kinematics of a rearward facing seat's back rest in a frontal crash

In this paper simulations performed in the generic test environment are described. The test set-up was modelled using the explicit solver environment of LS-Dyna followed by a parameter study. We focussed on Phase 1 and 2 and looked at chest acceleration and lumbar spine axial forces as injury assessment values.

## Method

Rearward facing seats which can withstand the loading of a full frontal impact at 56 km/h will be different from current serial seats which could already collapse at impact speeds of about 40 km/h. In contrast to a rear impact, the dashboard and windscreen limit the permissible rearward displacement of the backrest. But this can also be an advantage as the dashboard could support the backrest. In Fig. 2 possible kinematics of the back rest of a rearward facing seat in a frontal impact are given. In Fig. 2a the seat is supported by the dashboard. This could be the case already while driving or the dashboard (or a part of it) can be moved forward in the initial phase of the crash. A very similar solution could be that the seat slides on its rails towards the dashboard by its own inertia. In this configuration the occupant is directly coupled to the deceleration of the vehicle.

Fig. 2b shows a kinematics which is close to that of current seats in rear impacts. The energy is absorbed in the back rest which deforms plastically. This solution would probably produce a relatively heavy back rest. In Fig. 2c the back rest can rotate in the recliner and the energy is absorbed by a device which is between backrest and dashboard. This device could be an airbag or a mechanism similar to an energy absorbing steering column.

## Generic test environment

The generic test environment uses the principle of Fig. 2c. This has the advantage that only the energy absorbing part must be replaced after the test. Fig. 3 shows the test set-up. The seat consists of a stiff seat pan and a back rest which has a frame of standard aluminium profiles. The seat back frame has a polycarbonate shell surface to support the back of the dummy. All the surfaces which are in contact with the dummy have a padding of at least one layer of comfort foam of a thickness of 25 mm. The head rest consists of a wooden plate towards the dummy's head and three layers of comfort foam. The dummy head is taped to the head rest to avoid an initial gap between both. The back rest is fixed to the sled ground plate by ball bearings at both sides. The torso angle of the dummy is set to 25°. A controlled rearward displacement of the back rest during crash is provided by two layers of seat belt webbing on each side of the seat. Each of the four layers of webbing shows 12% elongation at a force of 10 kN and has a length of 1200 mm. The other side of the webbing is fixed to a steel frame

mounted to the sled. At the upper cross member of the back rest, seat belt systems can be mounted at each side.

Among others, a series of repeatability tests in the generic test environment was performed and the repeatability was rated as good [8]. For the validation a set of for identical tests with a standard 3-point belt system w/o belt pretensioner was used. The LS-Dyna simulation model was built up and validated against the mean of the time histories of the four tests.

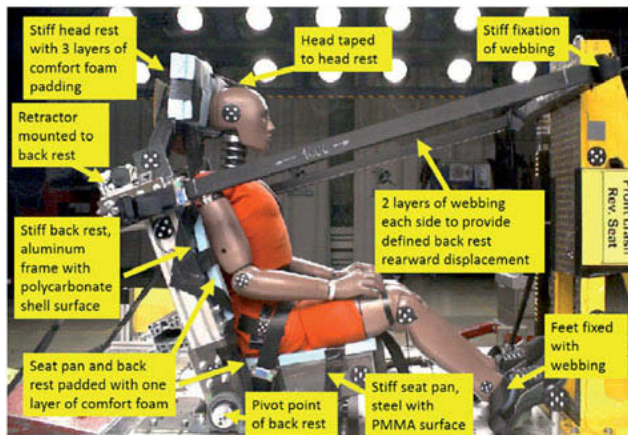


Fig. 3: Generic test environment [8]

### The lumbar spine to back rest contact issue

The lumbar spine compression showed a pronounced peak at about 25 ms. As the repeatability of the lumbar spine axial force was inferior to most other injury assessment values (IAV) a deeper look into the issue was done. As shown in Fig. 4, the lumbar spine has contact to the stiff structure of the back rest. As this is not considered to be the case with a human body, a cut-out in the back rest of 140 mm width and 280 mm height in the area of the lumbar spine was introduced in the simulation model. The influence of the cut-out is shown in Fig. 5. Without cut-out the peak compression occurred at about 25 ms and reached about 5.0 kN, with cut-out the compression rose slower and reached its peak of 4.6 kN at about 60 ms. Also the shear forces and the moments in the lumbar spine were reduced with the modification. However, the other dummy outputs remained almost the same. Therefore, the set-up with the modified back rest was used as base model for the following investigation.

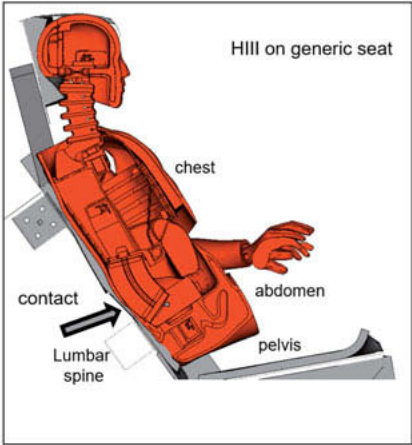


Fig. 4: Contact of the lumbar spine to stiff structure of back rest

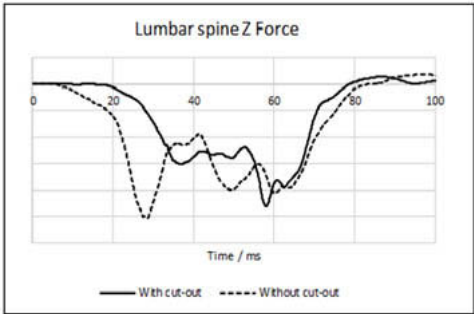


Fig. 5: Lumbar spine compression with and without cut-out

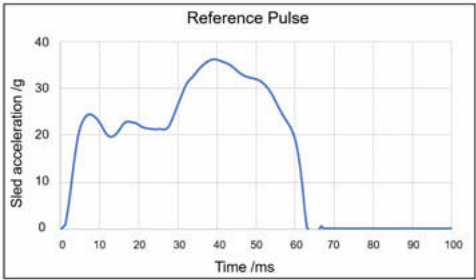


Fig. 6: Reference pulse for the simulation study with  $\Delta v$  60 km/h and OLC 30.8 g

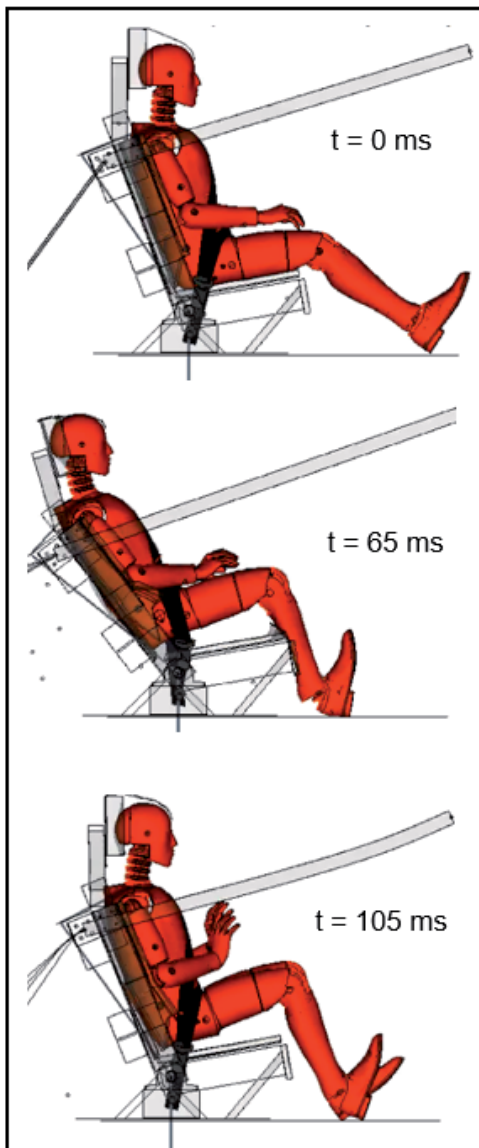


Fig. 7: Dummy kinematics in the reference set-up

## Simulation and Results

In the following the simulation investigation is described. It concentrated on the first two phases of the dummy movement, i.e. the impact phase (Phase 1) until the dummy shoulder joint reaches its most rearward position and the rebound phase without contact to the belt system (Phase 2). The evaluation focussed on chest acceleration and on lumbar spine compression, as these are the dominant dummy loadings in the first two phases. The reference crash pulse is shown in Fig. 6, it should simulate a full frontal impact according to FMVSS 208 at 56 km/h and is derived from the repeatability tests [8]. The  $\Delta v$  of this pulse was 60 km/h and the OLC was 30.8 g. Chest acceleration (3ms clip) was 49 g and lumbar spine compression 4.6 kN (cf. Table 1), both maxima being in Phase 1. The dummy kinematics is shown in Fig. 7: At 65 ms is the most rearward displacement of the dummy and thus the end of Phase 1; at 105 ms the dummy shoulder joint is on its initial x-position in the coordinate system of the sled and Phase 2 ends. The maximum rearward displacement in x-direction of the of the back rest at the point of the shoulder joint of the dummy before crash was 163 mm and thus well below the suggested limit of 200 mm. The displacement of the head rest at the height of the upper rim of the dummy's head was 255 mm. For the following comparison, the rearward displacement of the dummy head's centre of gravity in x-direction is used. With 275 mm it exceeded the head rest rearward displacement, as the foam padding of the head rest is compressed and the dummy moves upwards during crash.

### Influence of the back rest to dummy loadings

As shown in Fig. 2 there are three different possible kinematics of the back rest:

- a) the back rest is supported by the dashboard;
- b) the dummy's energy is absorbed in the back rest which deforms plastically;
- c) the back rest rotates in the recliner and the energy is absorbed by a device which is between back rest and dashboard.

Configuration c) is the easiest to be used in sled tests, thus this configuration was chosen as our reference. Configuration a) in simulation is obtained by locking the back rest in its initial position. Obtaining configuration b) needs more simulation effort. As the HIII dummy torso rather consist of two blocks (pelvis and chest) connected by the lumbar spine rubber joint, it was justified to replace the chain of joints as depicted in Fig. 2 by just two joints, the first one locked at the recliner the second one the upper part of the back rest connected at a pivot at the height of the lumbar spine. The webbing which provides the energy absorption remained unchanged yielding in a lower rearward displacement, cf. Table 1. With 37 g configuration a)

showed the lowest chest acceleration in this comparison, whereas configuration b) showed with 3.1 kN the lowest lumbar spine compression.

The rearward displacement angle of the reference set-up was 16.2°. In a next step the rotation of the back rest was stopped at 11.1° and 15.5° in order to study the effect of a possible impact to the instrument panel. At the stop, the dummy is forced to move upwards and with this chest acceleration and lumbar spine compression went up and exceeded their IARV. The Fig.s given in Table 1 are probably overestimated as there was little elasticity remaining in the seat model but it can be stated that a late contact of the seat back to the instrument panel must be avoided.

Table 1: Study of back rest parameters

Simulation	Description	Lumbar Spine Comp. /kN	Chest Acc, 3msclip /g	Head rearward displ. x /mm
R1 / BR c	Reference model, back rest conf. c	4.6	49	275
BR a	Back rest configuration a	3.7	37	19
BR b	Back rest configuration b	3.1	45	206
Stop 11.1°	Ref. model, back rest rotation stopped at 11.1°	8.7	124	186
Stop 15.5°	Ref. model, back rest rotation stopped at 15.5°	6.9	92	255
En 100	Reference model, 100 % energy absorbtion	4.5	49	275
En lin	Reference model, webbing stiffness linear	4.3	51	280
En pro	Reference model, web. stiffness progressive	6.3	70	303
En deg	Reference model, web. stiffness logarithmic	3.5	35	224

In the reference model, the rearward displacement is controlled by four layers of normal seat belt webbing. The webbing absorbs only 70% of the energy and the 30% elastic energy component causes the dummy rebound. In a first step, the energy absorption was set to 100%. This was done by locking the back rest in its most rearward position during crash. A different kinematic of the dummy after Phase 1 was found: Although the back rest was fixed in the rearward position, the dummy's chest stayed in contact with it and the pelvis moved slightly forward on the seat pan. The dummy remained in Phase 2 as also the seat belt was not loaded, cf. Fig. 8. However, as the IAV under investigation had their maximum in Phase 1, they almost remained the same, cf. Table 1.

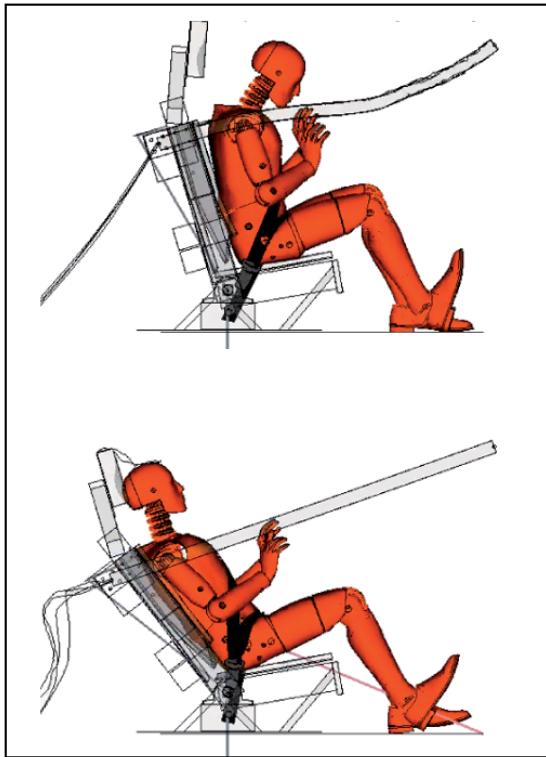


Fig. 8: Dummy kinematics with back rest locked at the most rearward position (bottom) compared to the reference set-up (top) at 150 ms

In a next step, the force strain characteristics of the webbing was modified. In the first iteration the force increased linearly to the strain, in the second the increase was progressive, in the third the increase followed a logarithmic function, cf. Fig. 9. The functions were tuned to yield the same energy absorption at 13% strain, which was the maximum strain of the standard seat belt webbing in the simulation. As shown in Table 1, the head rearward displacement differed between the absorption characteristics. This was mainly due to a different kinematics of the dummy. In the simulation with the progressive webbing e.g., the dummy moved up the largest distance, thus, the lever ratio changed and more energy was transferred into the webbing. In terms of IAV, the logarithmic characteristics showed with 35 g the overall lowest chest acceleration and the lumbar spine force was with 3.5 kN well below its IARV of 6.4 kN.



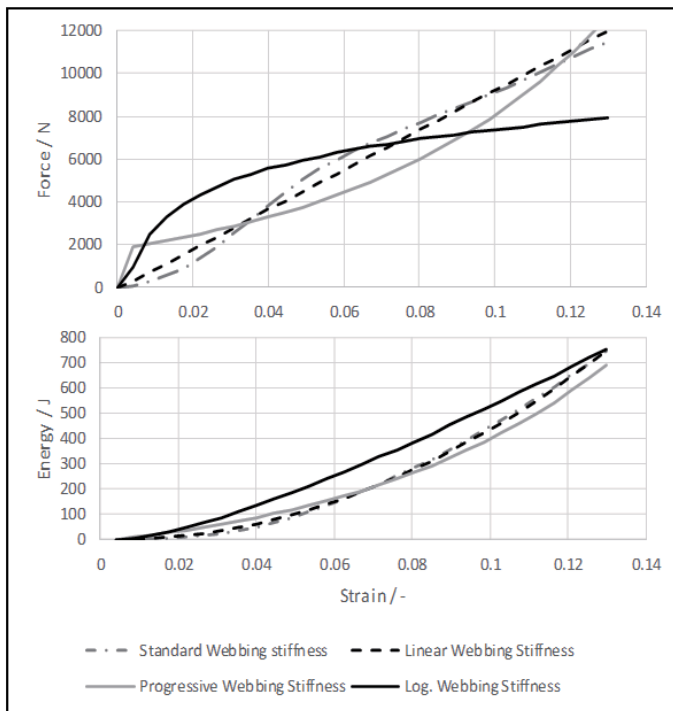


Fig. 9: Force vs. strain and energy absorption characteristics of one layer of the webbing controlling the rearward displacement of the back rest

#### Influence of the crash pulse to dummy loadings

In order to investigate the influence of the crash pulse, the base pulse was scaled. For the  $\Delta v$  scaling the force deflection characteristics of the car's front end was calculated by double integration of the vehicle acceleration. For  $\Delta v$  of 70 km/h it was assumed that the stiffness remains constant after reaching its maximum. The stiffer pulses were calculated by multiplying the acceleration by 1.2 and 1.4. For attaining the same  $\Delta v$ , the time scale was divided by 1.2 and 1.4 resp. The results are shown in Table 2. As illustrated in Fig. 10, chest acceleration went up with increasing OLC and reached the limit of 60 g at an OLC of about 38 g. Lumbar spine compression, on the other hand, did not correlate with OLC. The highest value occurred with the reference pulse, with a pulse being stiffer or at a higher  $\Delta v$ , the compression was even lower.

Table 2: Influence of the crash pulse to the dummy loadings

Simulation	Description	OLC /g	Lumbar Spine Comp. /kN	Chest Acc, 3msclip /g	Head rearward displ. x /mm
R1 / Dv 60	Reference model, delta v 60 km/h	30.8	4.6	49	275
P 20+	Pulse scaled 20 % stiffer	34.9	4.0	54	303
P 40+	Pulse scaled 40% stiffer	38.3	3.6	60	325
Dv 70	Delta v scaled to 70 km/h	39.4	4.4	61	328
Dv 40	Delta v scaled to 40 km/h	20.4	3.3	41	201
Dv 20	Delta v scaled to 20 km/h	7.1	2.3	30	143

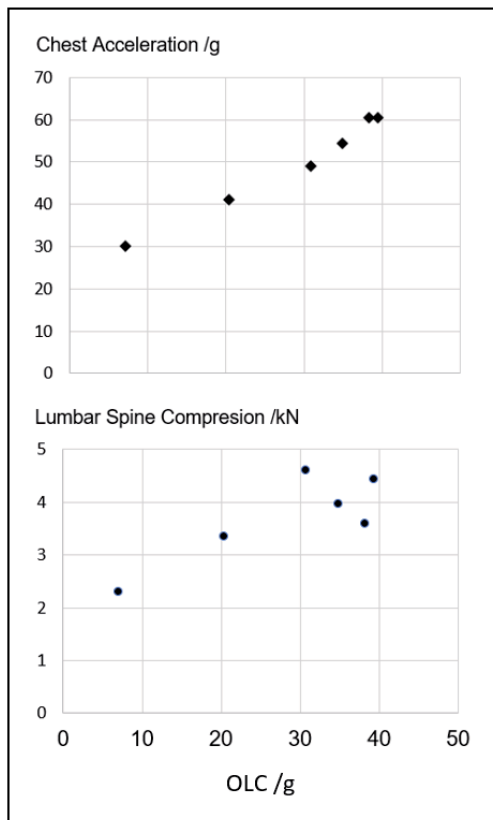


Fig. 10: Influence of OLC on chest acceleration and lumbar spine compression

### Oblique impact

To study occupant kinematics in oblique impacts, the crash pulse was applied to the simulation model at angles of 15°, 30° and 45° in both directions from the 0° set-up. Chest acceleration remained with 49 g to 50 g almost unchanged, whereas lumbar spine compression ranged from 2.6 kN and 4.0 kN, which was well below the reference value of 4.6 kN. Fig. 11 compares the dummy kinematics at full frontal impact with an oblique impact at 45° from the left (+45°) and the right side (-45°). In Phase 1 the dummy moves to the respective side of the seat. As the seat back is very solid, it did not deform itself and kept with its strong side structure the dummy on the seat. In the rebound, the dummy extremities went to the outside of the seat. As the shoulder part of the seatbelt system is integrated into the seat back the belt remained on the shoulder and provided a proper restraint of the chest.

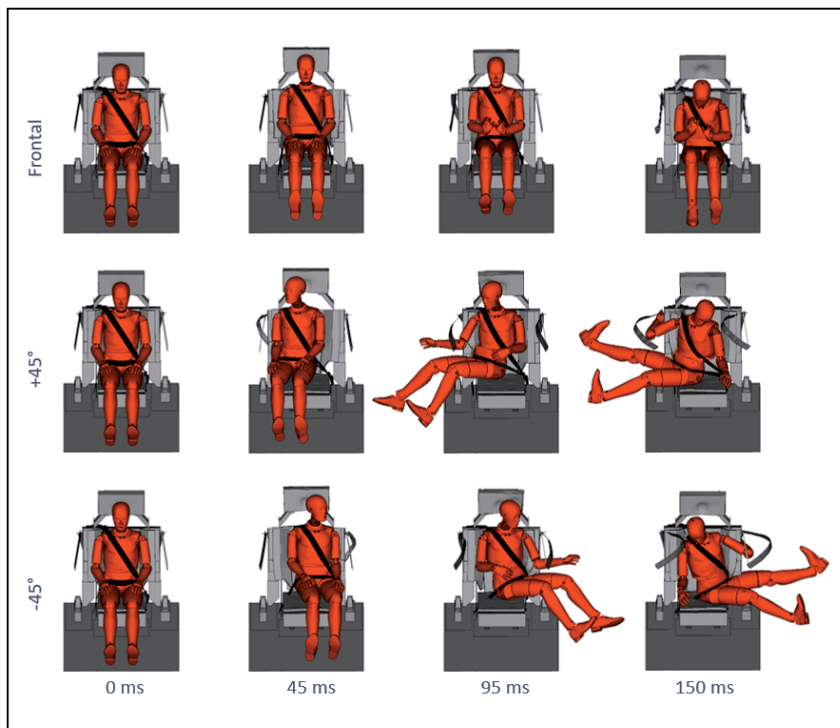


Fig. 11: Full frontal and oblique impact with crash pulse in direction 45° on the left side (+) and on the right side (-)

## Discussion

The generic seat was slightly modified for the simulation, a cut-out in the back rest in the area of the lumbar spine was made in order to avoid unrealistic lumbar spine to back rest contact. With this the lumbar spine compression in the reference set-up was reduced from 5.0 kN to 4.6 kN, being at a good distance to its IARV of 6.4 kN. But still the back rest remains to be a very generic one, with a very high stiffness, a thin comfort padding and a very good side support. It was designed for a good repeatability of tests and for easy set-up and validation of a simulation model, the seating comfort of an occupant was not considered.

The kinematics of the back rest in the impact phase until the maximum dummy rearward displacement (Phase 1) is vitally important for the chest acceleration and lumbar spine compression. The back rest kinematics option a) in Fig. 2, in which the back rest is directly coupled to the deceleration of the car, showed comparatively good injury assessment values IAV. A good energy management in the back rest in configuration c) can even reduce IAV more, but a late stop of the rearward movement is very disadvantageous for IAV. To provide a good energy management, different crash pulses and the occupant weight and posture must be taken into account. Also, the occupant might ramp up at the back rest which has influence on the lever ratio and thus to the force deflection characteristics.

A good energy absorption in which the back rest remains in its most rearward position has no influence on IAV as the maxima are in in Phase 1. In the simulation in which the back rest was fixed in the rearward position, the dummy chest stayed in contact with it and the pelvis moved slightly forward on the seat pan. The dummy remained in Phase 2 as also the seat belt was not loaded, cf. Fig. 8. The energy absorption in the back rest thus has a big influence on Phases 2 and 3 and a restraint system for these phases must be adapted to the individual seat and therefore is not further discussed here.

Chest acceleration exceeded 80% of IARV at OLC 30 g and 100% of IARV at OLC 38 g. Lumbar spine compression did not correlate with OLC and further investigations should be made for a better understanding of the loadings to the lumbar spine. Preliminary simulations with a lap belt pretensioner showed that lumbar spine compression could come down by 30% and the dummy upwards movement could be reduced by the pretensioning. The effect of pretensioning is dependent on the time of fire and seems to be most efficient when it occurs in the moment when the dummy upwards movement starts. The influence on chest acceleration, however, was small. Thus, chest acceleration seems to be the critical injury criterion and keeping it in a good distance to its IARV for crash pulses with an OLC of above 30 g could become a challenge.

Another challenge could be the oblique impact, a very good belt geometry in our set-up with a seat integrated shoulder belt avoided belt slip from shoulder. A wider variety of belt geometries should be investigated to Fig. out potential problems. The free movement of extremities in our simulation without contact to the vehicle interior is not realistic and there is a risk of injury when legs or arms bump into the interior parts as found in accident investigations [3]. Furthermore, there could be interactions with other occupants.

It must be mentioned here that all our findings are restricted to chest and lumbar spine loadings. For a real seat, a proper head and neck restraint must be provided. This may have changed requirements to the back rest kinematics and a balance between loadings to the different body parts must be found.

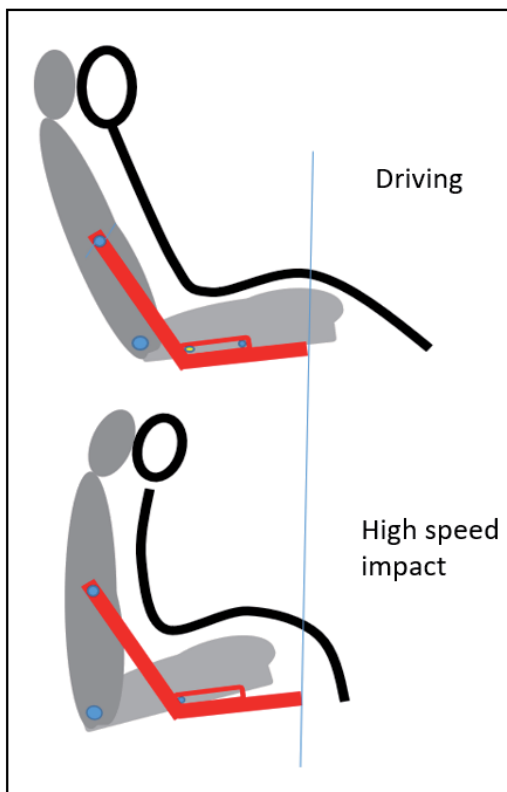


Fig. 12 Possible seat concept for an upright occupant posture in crash

In our investigation we used the Hybrid III dummy and the question arises whether other dummies would be better to assess injury risk. First of all to mention is the BioRID which was designed for rear impact, but for low speed rear impact. As hardware dummy it would not be recommended to use it in high speed crashes, but a FE-simulation could be of interest, esp. when the evaluation will include head and neck injury risk in future. Preliminary simulations with the THOR 50<sup>th</sup> percentile male dummy and with the THUMS human body model were performed. Both simulations showed the need to modify the generic seat in the shoulder area by making the back rest longer and provide restraint to the shoulder when the model moves upwards. The modifications will be implemented soon.

A rather fundamental question is whether it is better to load the occupant in a more upright or a reclined position. This must become part of the agenda for future biomechanical research and as a result, new seat concepts might be needed, cf. Fig. 12.

## Conclusion

A generic test environment to investigate occupant loadings on a rearward facing seat was established and a simulation model with a Hybrid III 50<sup>th</sup> percentile male dummy developed. With this a parameter study was performed. Chest acceleration was the injury assessment value closest to its reference value, it exceeded 80% of its IARV at an OLC of 30 g and 100% of its IARV at an OLC of 38 g. The back rest kinematics showed to be essential for the IAV in Phase 1, a late stop of back rest rearward movement must be avoided as with this both chest acceleration and lumbar spine compression can exceed its IARV. A restraint system for Phases 2 and 3 must be adapted to the individual seat and will be dependent on the energy absorption in back rest and the belt geometry. The movement of extremities esp. in oblique impact requires further investigation.

## References

- [1] SAE Standard J3016. 2016: "Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems;" SAE, 30.09.2016
- [2] Sofia Jorlöv, Katarina Bohman, Annika Larsson: "Seating Positions and Activities in Highly Automated Cars – A Qualitative Study of Future Automated Driving Scenarios;" Proceedings IRCOBI Conference 2017, Antwerp, Belgium
- [3] Harald Zellmer, Nils Lubbe, Ulrich Sander: "Assessing the Injury Risk of Car Occupants on Rearward Facing Seats – An Analysis of GIDAS Cases;" 8th ESAR Conf. 2018, Hannover, Germany
- [4] James W. Saunders III, Louis N. Molino, Shashi Kuppa, Felicia L. McKoy: "Performance of Seating Systems in a FMVSS No. 301 Rear Impact Crash Test;" Proceedings 18th ESV-Conference 2003, Nagoya, Japan
- [5] David C. Viano, Chantal S. Parenteau, Roger Burnett, Priya Prasad: "Occupant Responses in Conventional and ABTS Seats in High-Speed Rear Sled Tests;" Traffic Injury Prevention 2017
- [6] Yuichi Kitagawa, Shigeki Hayashi, Katsunori Yamada, Mitsuki Gotoh: "Occupant Kinematics in Simulated Autonomous Driving Vehicle Collisions: Influence of Seating Position, Direction and Angle;" Stapp Car Crash Journal, Vol. 61, 2017
- [7] Xin Jin, Haibin Hou, Ming Shen, Hequan Wu, King H. Yang: "Occupant Kinematics and Biomechanics with Rotatable Seat in Autonomous Vehicle Collision: A Preliminary Concept and Strategy;" Proceedings IRCOBI Conference 2018, Athens, Greece
- [8] Zellmer, H.; Manneck, F.: "Assessing Injury Risk of Car Occupants on Rearward Facing Seats in a Full Frontal Impact – Sled Tests in a Generic Test Environment;" Proc. 26th ESV Conference 2019, Eindhoven, Netherlands
- [9] National Highway Traffic Safety Administration. Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 208. "Occupant Crash Protection;" 49 CFR 571.208, 2013
- [10] ECE-Regulation No. 137-01: "Uniform Provisions Concerning the Approval of Passenger Cars in the Event of a Frontal Collision with Focus on the Restraint System;" Amendment Level 01 Supplement 1, Feb. 2017

- [11] General Motors (GM): "Occupant Performance Evaluation Consideration Book (Blue book);" Document #SRC-1000G, USA. Version 3, Revision 0, May 1998
- [12] L. Kübler, S. Gargallo, K. Elsässer: "Frontal crash pulse assessment with application to occupant safety;" ATZ worldwide Volume 111, Issue 6, 2009



# **The individual safety of a car seat as a central element of autonomous driving – A comprehensive study of ATDs and human body models based on a generic modelling approach of the passenger compartment**

Dipl.-Ing. **P. Luttenberger**, Dipl.-Ing. **C. Leo**, Dipl.-Ing. **M. Schachner**,  
Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **W. Sinz**,  
Graz University of Technology (VSI), Graz, Österreich;  
Dr.-Ing. **G. A. D'Addetta**, Dr. rer. nat. **H. Freienstein**,  
Dipl.-Ing. (FH) **M. Wolkenstein**, Robert Bosch GmbH, Renningen

## **Kurzfassung**

In diesem Beitrag wird das Schutzpotential neuer Insassenpositionen und -zustände in einem generischen Innenraum basierend auf numerischen Crashesimulationen mit bewährten Dummy-Modellen und einem Menschmodell evaluiert. Die Untersuchungsmatrix beinhaltet diese Modelle in Kombination mit einem plausibilisierten generischen Sitzmodell (Lounge und Upright Position) in den drei Hauptlastrichtungen. Zur Bewertung wird eine Evaluierungsstrategie vorgeschlagen, die aus mehreren Ebenen gezielt zusammengesetzter objektiver Kriterien und auf visuellen Einschätzungen (Bewertungskatalog-basiert) besteht, die zumindest für die objektiven Kriterien in automatisierter Art ausgewertet werden kann.

## **Abstract**

In this paper, the risk of injury of new occupant positions and states in a generic interior is evaluated based on numerical crash simulations with proven dummy models and a human model. The examination matrix includes the corresponding occupant models in combination with a plausible generic seat model (lounge and upright position) in front, side and rear crash load cases. For the evaluation, an evaluation strategy is proposed, which consists of several levels of purposefully composed objective criteria and visual assessments (evaluation catalog-based), which can be evaluated at least for the objective criteria in an automated way.

## **1. Einleitung**

Aktuellen Konzeptstudien zufolge bieten zukünftige automatisiert fahrende Fahrzeuge dem Insassen deutlich mehr Freiheiten bezüglich der Positionierung des Sitzes im Innenraum und

der generellen Einstellung einzelner Baugruppen des Sitzes (zum Beispiel der Rückenlehne) [8,25,30,31,32]. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass in der Einführungsphase automatisierter Fahrfunktionen die Insassen im Frontbereich den Sitz während der Fahrt nach vorne gerichtet ( $0 \pm 15$  Grad um die Z - Achse) bzw. für selbstfahrende Shuttles auch nach hinten gerichtet ( $180 \pm 15$  Grad um die Z - Achse) nutzen sowie nach hinten geneigte Positionen einnehmen können (Verstellung der Rückenlehne und der Sitzfläche). Diese neuen Sitzeinstellungen sind im Allgemeinen nicht innerhalb der heute üblichen Sitzverstellfelder vorgesehen. Daraus ergeben sich Insassenzustände für die die Schutzfunktionen aktueller Rückhaltesystemkonzepte nicht bekannt sind. Diese Insassenzustände können mit dem Begriff des Aufenthaltsraumes zusammengefasst werden und liegen somit im möglichen Bewegungsbereich des Insassen in der Fahrgastzelle. Das Verletzungsrisiko für den Insassen in einem Unfall (Kritikalität) kann damit einem bestimmten Insassenzustand bei  $t_0 = 0$  ms also bei Crashstart zugeordnet werden [24].

Ein 180 Grad rotierter Sitz in einem Frontcrash Szenario wäre beispielsweise einer deutlich höheren Unfallschwere (bzgl. der Pulsbeschaffenheit) ausgesetzt als bei aktuell gängigen Whiplash-Schlittentests. Aufgrund der Erweiterung des Aufenthaltsraumes durch mögliche oder erlaubte Sitzrotationen ist es zudem notwendig, dass das Gurtsystem fest mit dem Sitz verbunden ist und dieses in Kombination mit dem Sitz als Hauptkomponente der Rückhaltung eingesetzt wird. Aktuell verbaute Airbags können für diese neuen Insassenzustände zudem teilweise nicht mehr eingesetzt werden da sie sich schlichtweg an der falschen Position befinden, beziehungsweise ortsfest verbaut sind. Aufgrund der beschriebenen Herausforderungen lässt sich die übergeordnete Forschungsfrage dieser Studie ableiten:

- Wo liegen die Grenzen des Schutzpotentials eines State of the Art Integralgurtes und Sitzes ohne Berücksichtigung weiterer Rückhaltemittel in Abhängigkeit der flexiblen Sitzeinstellung und der Crashkonstellation?

Dazu werden folgende Ziele definiert:

- Ableitung und Erstellung der Szenarien und Analyse der relevantesten Szenarien mit Insassensimulationen.
- Evaluierung des Schutzpotentials von Insassenzuständen in Crashkonstellationen (drei Hauptanprallrichtungen) mit reduzierten generischen Innenraummodellen (Sitz und Gurt).
- Definition einer geeigneten Bewertungsmethode zur Evaluierung des Schutzpotentials und Einteilung der Evaluierung in drei Abstufungen: „Poor“, „Marginal“, „Good“.

## 2. Methoden

Es werden in einem nächsten Schritt bekannte oder entwickelte Methoden dargestellt die für den sitzindividuellen Insassenschutz eine relevante Basisbedingung darstellen und demnach zur Beantwortung der Forschungsfrage kombiniert zum Einsatz kommen. Der virtuelle methodische Ansatz beinhaltet Insassenmodelle und ein flexibles generisches Innenraummodell in LS-Dyna [4] und erlaubt die Berechnung der zu bewertenden Größen. Die Evaluierungsstrategie soll daraus verständlich, nachvollziehbar und aufgrund einer großen Variation der virtuellen Modelle und Randbedingungen der Crashkonstellationen parametrierbar, äußerst flexibel und robust aufgebaut sein. Virtuelle Modelle und einer den genannten Anforderungen entsprechende Evaluierungsstrategie eignen sich besonders zur Ableitung grundsätzlicher Aussagen zu den zu untersuchenden Lastfällen.

### Anprallrichtungen und Crashpulse

Diese Studie zur Ableitung der Grenze von rein sitzbasierten konventionellen Rückhaltesystemen beinhaltet drei Anprallrichtungen (Front, Seite und Heck), die jeweils normal auf die Fahrzeug-Außenfläche treffen (Stoßrichtung: 3, 6, 9, 12 Uhr [27]). Die Crashpulse repräsentieren die Beschleunigung eines Fahrzeuges einer generischen Fahrzeug-Fahrzeug Kollision. Mittels einer mit virtuellen Methoden durchgeführten internen Vorstudie über einen größeren „ $\Delta v$ -Bereich“ wurden jeweils zwei  $\Delta v$  für die jeweilige Lastrichtung bestimmt. In Tabelle 1 sind die für die Ergebnisse in dieser Studie angewandten kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderungen angegeben. Aus diesen sind für den Front- und Heckcrash jeweils drei Pulsformen und für den Seitencrash zwei Pulsformen (Soft, Hard) abgeleitet worden. Die Basis zur Definition der Pulsformen wurde unter anderem aus [6,13,17,20] für die Seiten- und Hecklastrichtung entnommen. Im Falle des Frontcrashes wurde auf Sinuspulse unterschiedlicher Dauer, Form und Amplitude zurückgegriffen [26,38], da sich in dem gewählten Geschwindigkeitsbereich nur wenig allgemeinere Daten aus der Literatur finden lassen.

Tabelle 1:  $\Delta v$  und Pulsformeinteilung für die gewählten Lastrichtungen.

Stoßrichtung bezogen auf das zu untersuchende Fahrzeug	Kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung ( $\Delta v$ ) [km/h]		Generische Pulsformen
	Niedrig	Hoch	
Heck Crash (6 Uhr)	34	52	"Soft", "Medium" oder "Hard"  Dauer zw. 55 ms bis 180 ms  Max. Beschleunigung zw. 7.5 g bis 42.5 g
Front Crash (12 Uhr)	40	60	
Seiten Crash (3, 9 Uhr)	20-25	30	

## Insassenmodelle

Die für die Evaluierung notwendigen Dummies und Human Body Models (HBMs) müssen unter gewissen Einschränkungen passend zu den zuvor definierten Stoßrichtungen gewählt werden. Zum Einsatz kommen der Hybrid III 50% (H350) [1] (Front, Heck), der THOR50 [36] (Front, Heck) und der WorldSID (WS50) [13] (Seite). Da der BioRID Dummy nur für kleinere  $\Delta v$  validiert ist [2,18,19] wird der H350 und THOR50 in dieser Studie ebenfalls für den Heckcrash eingesetzt. Limitierend bei diesem Einsatz ist das beide Dummies nur für den Frontcrash validiert sind, aufgrund der Robustheit bei höheren Belastungen jedoch als geeignet eingestuft werden. Für diese Dummies sind Verletzungskriterien sowie deren zugehörige Risikokurven, zumindest für deren jeweilige Hauptlastrichtung bekannt.

Als Vergleich zu den Dummies wird ein Menschmodell eingesetzt das grundsätzlich für alle Lastrichtungen geeignet ist jedoch noch nicht als ganzheitlich harmonisierte beziehungsweise akzeptierte Bewertungsmethode für die Verletzungsrisikobeurteilung für Insassensimulationen herangezogen werden kann. Im Bereich der Risikofunktionen zur Verletzungsrisikobeurteilung besteht dabei weiter Forschungsbedarf und wird z.B. im EU-Projekt OSCCAR adressiert [29]. Zur Positionierung des Menschmodells im Sitz wurden Vorsimulationen angewandt. In dieser Arbeit wurde auf das THUMSv4 Modell zurückgegriffen [15], wenn gleich es auch Alternativen gibt (z.B.: GHBMC [10, 11]).

## Generisches Sitzmodell

Der generische Sitz ist von Grund auf hinsichtlich Geometrie und Steifigkeiten als leicht parametrisierbares, flexibles und robustes Modell entwickelt worden und beinhaltet die relevantesten Funktionen der Insassenrückhaltung welche dem Sitz zugeordnet werden können. Die prinzipielle Konzeption basiert auf Parametern aus öffentlich zugänglichen Quellen [33,35,39]. Der flexible Aufbau des Modells ermöglicht es unterschiedliche Designs virtuell nachzubauen. Plausibilisiert wurde der Sitz beispielsweise mit den kinematischen Ergebnissen (Trajektorien, Beschleunigungen des H350 Dummies) aus einem bekannten validiertem Sitzmodell [24], dargestellt in Bild 1. Für die Beckenbeschleunigung ergibt sich eine gute Übereinstimmung, für den Kopf kommt es vor allem durch die sitzfeste Gurtführung des generischen Sitzmodells im Vergleich zur fahrzeugfesten Gurtführung (Gurtumlenker an der B-Säule) des Plausibilisierungsfalles zu Abweichungen im Bereich der maximalen Verlagerungen, verursacht durch eine initiale Kontaktwinkeländerung an der Schulter.

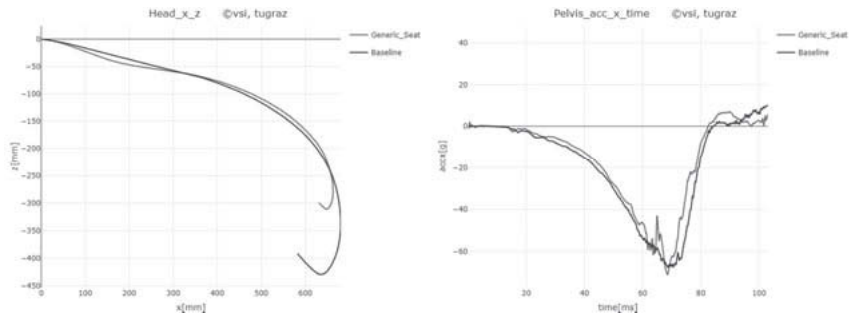


Bild 1: Plausibilisierung des generischen Sitzmodells anhand der Kopf-X-Z Bewegung und der Beckenbeschleunigung in X des H350 Dummies.

Zu den zwei gewählten Sitzpositionen für diese Untersuchung wurden folgende Einstellungen getroffen:

- Rückenlehne: 20 Grad (Upright) und 50 Grad (Lounge).
- Sitzfläche: 15 Grad (Upright) und 20 Grad (Lounge).

Der generische Sitz beinhaltet folgende Funktionalitäten:

- Eine variabel einstellbare aktive Kopfstütze.
- Eine „Femurklappe“ (ähnlich der Wirkungsweise eines Airbags) zur Reduktion von Submarining. Veränderung der Sitzgeometrie damit sich die Kopplung des Einsinkens in den Sitz und die herausfordernde Ankopplung durch ungünstige Becken- und Gurtwinkel vorteilhaft auf eine Verringerung des Submarinings auswirkt.
- Rotatorische, momentenbasierte Rückhaltung des kompletten Sitzes und der Kopfstütze.
- Pre-/in-crash Straffung und in-crash Kraftbegrenzung (an allen Anbindungspunkten).
- Anbindungspunkte des Gurtes liegen am Sitz und bewegen sich mit diesem mit.
- Das Gurtmodell ist aufgrund der geforderten Flexibilität variabel einstellbar.

### Bewertungsmethodik

Verschiedene Definitionen zur Bewertung des Verletzungsrisikos in Crashlastfällen werden in den Protokollen und Veröffentlichungen von beispielsweise EuroNCAP zu den jeweiligen Testverfahren mitgeliefert [7]. Ziel dieser Studie ist es die Ergebnisse aus den Simulationen mit Dummy- und Menschmodellen in den verschiedenen Lastfällen vergleichen zu können und geht damit über die gängige Vorgehensweise hinaus. Deshalb wird als eine mögliche Variante die „Gruppenbewertung“ als methodischer Ansatz zur Bewertung der Ergebnisse herangezogen [23]. Akzeptierte Verfahren der bereits vorhandenen Methoden wie beispielsweise eine

Risikobewertung (USNCAP – Relative Risk Score) und Modifier Funktionalitäten (NCAP) sind darin in angepasster Form enthalten [7,37]. Ein großer Vorteil ist die umfassende Analyse- und Vergleichsmöglichkeit einer Vielzahl an Kriterien (kinematische Kriterien, Risiken, Belastungen, Energien, Qualitätskriterien der Simulation, etc...) sowie einer Einstufung des Users in – Yes / No – eines Tests bzw. Simulationereignisses das in der Berechnung automatisiert berücksichtigt wird. Ein weiterer Vorteil ist, dass die grundsätzliche Methodik universell einsetzbar ist und sich nicht nur auf Insassensimulationen beschränkt. Eine vergleichbare umfassende und automatisierte Methode zur Bewertung der Modelle wurde in der Literatur nicht gefunden. Die softwaretechnische Umsetzung der Bewertungsmethodik als „Open Source“ Tool (MUTANT) steht auf Gitlab zur Verfügung [22,23] und stellt einen Ausgangspunkt zur Harmonisierung zukünftiger Bewertungsmethoden dar. Ebenfalls ist damit eine Diskussionsbasis geschaffen, da die Methode aufgrund der Veröffentlichung des Source-codes mit entsprechender Relevanz einer Modifikationsanfrage adaptiert / optimiert werden kann.

Die enthaltenen Bewertungsgruppen können aus den Kriterien der generischen Insassenmodelle für die jeweilige Lastrichtung spezifisch zusammengesetzt werden und sind in Tabelle 2 dargestellt. Ergebnis der Gruppenbewertung (Group Assessment „GA“) sind einerseits die einzelnen Gruppenergebnisse die bis auf die beeinflussenden Kriterien heruntergebrochen werden können, andererseits das „Load Case Assessment“ (LCA) mit dem Wert von 0 bis 1, der gewichteten Gruppenergebnisse. Die Gewichtung der Gruppen 1 bis 5 und 8 ist frei wählbar. Das LCA ist notwendig für die initial geforderte finale Kategorisierung in:

- **Good** (LCA = 1),
- **Marginal** ( $1 > \text{LCA} > 0$ ) und
- **Poor** (LCA = 0).

Die zu findende Grenze der Rückhaltung kann mit dem LCA beispielsweise wie folgt bestimmt werden:

- Good: keine weiteren Rückhalteeigenschaften erforderlich.
- Marginal & Poor: zusätzliche Rückhaltemaßnahmen können je nach Insasseneigenschaften (Position, Kinematik, Statur, einwirkende Kräfte) das Schutzpotential besser nutzen.

Aus den einzelnen Gruppenergebnissen können bei klar strukturierter Zuordnung der Kriterien Informationen zu bestimmten Details der Simulationen oder Testergebnisse gefunden werden. Wenn in der Gruppe 1 beispielsweise die relevantesten Kriterien definiert sind, können in Gruppe 2 bis 4 eine bestimmte Klasse der Kriterien eingesetzt werden (Kinematik, Energie, wirkende Kräfte, ...). Dies ermöglicht eine schnelle und vor allem nachvollziehbare Übersicht

über den Lastfall. Die Kriterienzuordnung für diese Studie ist in Tabelle 3 für die Gruppe 1 und die Gruppe 5 und darauf folgend für alle weiteren Gruppen zu finden.

Tabelle 2: Gruppenbewertung und Details zur Zuordnung der Kriterien und der Ergebnisdarstellung [23].

Gruppen & Inhalt	Gruppe 1	Gruppe 2 bis 4	Gruppe 5	Gruppe 6	Gruppe 7	Gruppe 8
<b>Definition</b>	Kombinierte Bewertung	Kriterien einer bestimmten Klassifizierung	Risiko-Bewertung	Kriterien-Einstufung	Event Bewertung	Qualitäts-Bewertung
<b>Kriterien-Auswahl</b>	Auswahl relevanter Kriterien	Auswahl der Kriterien die der Klassifizierung entsprechen	Auswahl der Kriterien die der Risk-Identifikation entsprechen	Auswahl aller Kriterien	Auswahl spezifischer Kriterien unter Berücksichtigung einer visuellen Inspektion	Auswahl der Qualitäts-kriterien
<b>GA Ergebnis</b>	0 bis 1	0 bis 1	0 bis 1	Kriterien-Zähler für (good; marginal; poor)	Ja oder Nein	0 bis 1

### Two-Stage Toolchain, Open Source Tools zur Evaluierung

Die zweistufige Toolchain beinhaltet die Programme MUTANT und Dynasaur, die beide auf GITLAB unter GPLv3 zur Verfügung stehen [5,22]. Diese beinhalten folgende Schwerpunkte:

- MUTANT – Visualisierung, Filterung der Ergebnisse, Gruppenauswertung.
- Dynasaur – Aufbereitung der Ergebnisse aus den Rohdaten der Berechnung/Simulation.

Mit Dynasaur können somit alle notwendigen Daten (Kriterien, Kurven) aus den Ergebnisd Dateien des simulativen Ansatzes erzeugt werden. Anschließend wird MUTANT zur Bewertung und Visualisierung, sowie zur Filterung der Simulationen und Ergebnisse herangezogen und dazu verwendet die Herausforderungen zukünftiger Innenraumdesigns besser zu verstehen. Wenn die notwendigen Basisdateien (Scripts, Definitionen) einmal erzeugt sind läuft die Toolchain für diese Art der Auswertung automatisiert. In der Visualisierung können die Ergebnisse mit der Filterung einfach und schnell auf ein bestimmtes „Ergebnis-Set“ reduziert werden und bieten, wenn in den Basisdateien definiert, gleichzeitig alle relevanten Informationen damit das Ergebnis nachvollziehbar dargestellt werden kann und Parameteränderungen für eine Optimierung leichter abzuleiten sind [5,16,21,22,23].

### 3. Der sitzindividuelle Insassenschutz

Der sitzindividuelle Insassenschutz wird im Rahmen einer vergleichenden Simulationsstudie mit Dummies und Menschmodellen basierend auf generischen Innenräumen untersucht. Die

dazu ausgewählten Modelle zur Abbildung des Insassen sowie das generische und flexible Innenraummodell werden mit den Crashpulsen kombiniert (Bild 2). Mit den Randbedingungen der definierten Lastfälle entsteht der multidimensionale Untersuchungsraum für dessen Evaluierung und Verständnis. MUTANT als „multidimensionales Analysetool“ notwendig ist. Mithilfe der bekannten Verletzungsrisiken oder Bewertungskriterien, bezogen auf den Insassenzustand bei Crashbeginn ( $t_0$ ) [24], können Rückschlüsse auf das nicht genutzte Potential aktueller Sitzdesigns und sitzbasierten Rückhaltesystemen für die untersuchten Lastfälle gezogen werden.

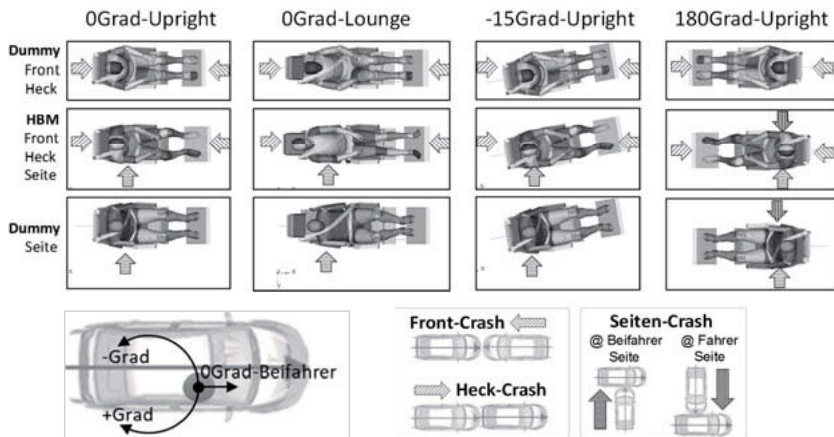


Bild 2: Bestehende Modelle für den „Beifahrer“ und die dem jeweiligen Modell aufgetragenen Lastrichtungen.

#### 4. Ausgewählte Ergebnisse des Untersuchungsraums

Eine detailliertere Vorstellung der Ergebnisse der gesamten Untersuchungsmatrix würde über den Rahmen dieser Veröffentlichung hinausgehen. Die Auswahl beschränkt sich hierbei auf den um 180 Grad gedrehten Sitz in der Upright Position im Frontalcrash, sowie der 0 Grad Sitzeinstellung in der Lounge Position in einem Heckcrash. Zur Evaluierung und zum Vergleich der Ergebnisse werden der H350 und der THUMS definiert.

##### Kriterienauswahl zum „Group Assessment“

Die Kriterienereinteilung in den Gruppen 1 und 5 der Gruppenauswertung kann aus Tabelle 3 entnommen werden. Gruppe 5 stellt die Risikobewertung. Für den H350 können drei Risiken ausgewählt werden, der THUMS bleibt aufgrund der fehlenden Information zur Bestimmung des Risikos ohne Bewertung. Mit den festgelegten Limits der einzelnen Kriterien kann die



Gruppenauswertung berechnet werden. Die Limits sind somit entscheidend für die Berechnung der einzelnen Gruppenergebnisse und das LCA. Diese sind direkt dem Kriterium zugeordnet das bereits in der Toolchain definiert wird als:

- „Part of Object“ : Criteria\_Identifier : Criteria\_Name : [best-,middle-,worst-limit]“.

Tabelle 3: Kriterienzuordnung der Gruppe 1 und 5 mit den jeweiligen Limits zur Berechnung von LCA und den Gruppenergebnissen.

<b>Group 1 H350:</b>	<b>Einheit:</b>
CHEST:injury:Chest_res_a3ms:[60, 75, 90]	[g]
FEMUR:injury:Femur_Comp_max:[-3.8, -6.4, -9.07]	[kN]
HEAD:injury:HIC15:[500, 600, 700]	[-]
NECK:injury:Neck_Compression:[-3.2, -4.0, -4.8]	[kN]
NECK:injury:NIJ:[0.8, 1.0, 1.2]	[-]
NECK:injury:Ext_bending_mom_max:[-42.0, -49.5, -57.0]	[Nm]
PELVIS:injury:Pelvis_LumbS_force_max:[5.2, 6.6, 7.9]	[kN]
PELVIS:injury:Pelvis_res_a3ms:[60, 75, 90]	[g]
TIBIA:injury:Tibia_Index_max:[0.4, 0.8, 1.2]	[-]
<b>Group 1 THUMS:</b>	
CHEST:injury:rib_fractures:[3, 5, 7]	[number]
CHEST:injury:T1_99_0PercLim:[0.0075,0.011,0.015]	[strain]
CHEST:injury:T12_99_0PercLim:[0.0075,0.011,0.015]	[strain]
FEMURLEFT:load:Femur_Left_Comp_max:[-3.8, -6.4, -9.07]	[kN]
FEMURRIGHT:load:Femur_Right_Comp_max:[-3.8, -6.4, -9.07]	[kN]
HEAD:injury:BRAIN_99_0PercLim:[0.1,0.15,0.20]	[strain]
HEAD:injury:BRIC:[0.5, 0.75, 1]	[-]
HEAD:injury:HIC15:[500, 600, 700]	[-]
NECK:injury:C1_99_0PercLim:[0.0075,0.011,0.015]	[strain]
NECK:injury:C7_99_0PercLim:[0.0075,0.011,0.015]	[strain]
<b>Group 5 H350:</b>	
NECK:risk:Neck_PJoint	[%]
FEMUR:risk:Femur_AIS2+	[%]
HEAD:risk:HIC15_AIS3+	[%]
<b>Group 5 THUMS: Keine Kriterien (Risiken)</b>	

Für die restlichen Gruppen wurde folgende Einteilung der definierten Kriterien vorgenommen die bereits in Tabelle 2 angedeutet ist.

Group 2: „Injury Criteria“, Kriterien der Modelle (z.B.: HIC, 99percentile strain).

Group 3: „Load Criteria“, wirkende Kräfte im Modell (z.B.: Kontaktkräfte, Gurtkräfte).

Group 4: „Kinematic Criteria“, kinematische Kriterien im Modell (z.B.: Vorverlagerung).

Group 6: „All Criteria“ (alle Kriterien die ausgewertet werden).

Group 7: „Submarining Criteria“, (z.B.: Kräfte (Iliac-Drop), Verschiebungen).

Group 8: „Quality Criteria“, (z.B.: Energien, Zeit).

Es sei an dieser Stelle betont, dass die folgenden Ergebnisse auf einem generischen Interieur-Modell basieren, das nur einen Basisschutz (Sitz- und Integralgurt) enthält. Die folgenden Einstufungen sind in diesem konkreten Falle ein Indikator zur Beschreibung der Notwendigkeit weiterführender Rückhalteschutzmaßnahmen und des notwendigen relativen technischen Aufwands für die Load-Cases (siehe Abschnitt 5). Würde ein deutlich verfeinertes Interieur-Modell mit ausgearbeitetem Schutzkonzept der vorgestellten Methodik „Group Assessment“ unterworfen, können auch Aussagen über die Machbarkeit oder entsprechende Leistungsfähigkeit des Modells abgeleitet werden.

### **Beispielhafte Ergebnisse der Bewertung des generischen Interieur-Basis-Modells**

Mit der getroffenen Auswahl aus dem Untersuchungsraum und den Definitionen zur Gruppenbewertung ergibt sich mit der Gewichtung von 100 % zur Gruppe 1 ein „Loadcase Assessment“ für:

- 12 Frontcrash - Upright (H350, THUMS) X (Hard, Medium, Soft) X (DV40, DV60) und
- 12 Heckcrash - Lounge (H350, THUMS) X (Hard, Medium, Soft) X (DV34, DV52).

Für den Dummy und das Menschmodell sind alle Belastungsrichtungen Heckunfälle. Folgende 12 Simulationen in den drei Abstufungen von Poor bis Good in Tabelle 4 sind dem Frontcrash in der Upright Sitzeinstellung mit 180 Grad Rotation zugeordnet. Der H350 und der THUMS sind in keinem der Fälle mit Good bewertet. Eine überwiegende Anzahl ist mit Marginal bewertet. In diesen Bereichen überschreitet z.B.: ein selektiertes Kriterium das „Best Limit“ und es kommt zur Einflussnahme auf die Bewertung. Der „Hard Pulse“ bei einem  $\Delta v$  von 60 km/h ist der einzige der für beide Insassenmodelle mit Poor bewertet wird. Bis auf den „Medium Pulse“ bei einem  $\Delta v$  von 60 km/h stimmt die Einstufung des LCA beider Modelle miteinander überein.

Für alle in Tabelle 4 bewerteten Insassenzustände bei  $t_0$  basierend auf der Sitzeinstellung 180 Grad - Upright ist beispielsweise eine Erfassung mit einem geeigneten Innenraumsensorik-

system zu empfehlen [3,9]. Durch die genaue Kenntnis des Insassenzustands bei  $t_0$  kann damit eine erforderliche Änderung der Rückhalteeigenschaften vorgenommen werden und zu einer Reduktion des Verletzungsrisikos beitragen [24].

Tabelle 4: LCA für den Frontcrash mit einer 180 Grad Sitzeinstellung in der Upright-Position.

	$\Delta v = 60 \text{ km/h}$			$\Delta v = 40 \text{ km/h}$		
	Hard	Medium	Soft	Hard	Medium	Soft
H350	Poor	Marginal	Marginal	Marginal	Marginal	Marginal
THUMS	Poor	Poor	Marginal	Marginal	Marginal	Marginal

In Tabelle 5 sind 12 Simulationen des Heckcrashes in der Lounge Position ohne Sitzverdrehung enthalten. Der einzige Lastfall der mit „Good“ bewertet wird und bei dem somit alle Kriterien unter dem „Best Limit“ liegen, ist der 34 km/h Heckcrash mit einer weichen Pulsform für das Menschmodell in der Lounge Position. Die harten Crashpulse sind in der Lounge Position für beide Geschwindigkeiten bereits mit Poor bewertet. Der THUMS ist in der Lounge Position und den Medium/Hard Pulsen bei einem  $\Delta v$  von 52 km/h frühzeitig abgebrochen, was aus der „Simulations-Qualitäts-Gruppe 8“ hervorgeht. Bis zu diesem Zeitpunkt ist er bereits als Poor eingestuft. (LCM) kennzeichnet in der Bewertung des LCA, dass ein Modifier einer Gruppe, in diesem Fall Gruppe 8, angeschlagen hat und eine unzureichende Bewertung erfasst hat. Die Lounge Position mit niedrigeren  $\Delta v$  stellt somit den eindeutig komplexer zu handhabenden Insassenzustand dar.

Tabelle 5: LCA für den Heckcrash mit einer 0 Grad Sitzeinstellung in der Lounge-Position.

	$\Delta v = 52 \text{ km/h}$			$\Delta v = 34 \text{ km/h}$		
	Hard	Medium	Soft	Hard	Medium	Soft
H350	Poor	Poor	Marginal	Poor	Marginal	Marginal
THUMS	Poor (LCM)	Poor (LCM)	Marginal	Poor	Marginal	Good

Da auch die Nachvollziehbarkeit mit der Bewertung gewährleistet ist, wird als ein Beispiel die Gruppe 1 in Tabelle 6 dargestellt. Betrachtet man die 0 Grad Sitzeinstellung in der Lounge-Position für ein  $\Delta v$  von 34 km/h im Detail, ist ersichtlich, dass die zwei Poor Einstufungen vom Kopf (Zuordnung der Kriterien: „Part of Object“ = HEAD) des Menschmodells und der Tibia (H350) verursacht werden. Beide Poor Einstufungen der einzelnen Kriterien, Regionen und schlussendlich des LCA sind dem „Hard Puls“ zuzuordnen. „0“ (Poor) bedeutet, dass zumindest ein Kriterium eines Bereichs „0“ ist und somit über dem „Worst Limit“ liegt (beispielsweise

als Capping-Limit [7]). Die Femurkraft ist in der Auswertung der Gruppe 1 enthalten, liegt jedoch als einziges gewähltes Kriterium für alle Simulationen im Bereich „Good“ und ist somit weniger relevant für die Lastfälle (nicht in der Tabelle enthalten). Für den THUMS zeigt sich, dass vor allem der Kopf und der Nacken in dem für die Bewertung relevanten Bereich von der Pulshärte betroffen sind. Für den H350 ist die Tibia in einem kritischen Bereich. Alle weiteren Kriterienwerte sind noch nicht weiter verschlechtert, dass sie das Ergebnis stark beeinflussen könnten.

Tabelle 6: Gruppe 1 Bereichsergebnis der übergeordneten Körperregion („Part of Object“) in der Lounge-Position bei einem  $\Delta v$  von 34 km/h im Heckcrash.

Simulation	GA - Kriterien- auswahl	Overall Group 1	CHEST	HEAD	NECK	PELVIS	TIBIA
H350_Hard	ATD	<b>0.00</b>	1.00	1.00	0.97	1.00	0.00
H350_Medium	ATD	<b>0.87</b>	1.00	1.00	0.93	1.00	0.01
H350_Soft	ATD	<b>0.94</b>	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50
THUMS_Hard	HBM	<b>0.00</b>	0.80	0.00	0.52	-	-
THUMS_Medium	HBM	<b>0.80</b>	0.86	0.60	0.73	-	-
THUMS_Soft	HBM	<b>1.00</b>	1.00	1.00	1.00	-	-

Bild 3 und Bild 4 zeigen die Kinematik des Dummy- und Menschmodells für die im Detail in Tabelle 6 dargestellten Simulationen. Durch die Begrenzung der steiferen Rückenlehne, ist die Brustkinematik beider Modelle ähnlich und unterscheidet sich nur geringfügig, was aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten der Insassenmodelle zu erwarten ist. Die Kopfkine-matik weicht zwischen den beiden Modellen deutlich ab. Es kommt für das Menschmodell fast zu einer Verdopplung der X-Auslenkung und einer größeren Auslenkung in Z-Richtung. In Bild 5 ist jeweils der Hard Puls in der Lounge Position für den Heckcrash mit einer 0 Grad Sitzein-stellung exemplarisch aus diesen sechs Simulationen in der Visualisierung dargestellt. Der Einfluss des Insassenmodells kann eindeutig in der Streckung der Wirbelsäule identifiziert werden, die aufgrund der Gurtrückhalte-kraft an der Schulter vor allem im Nacken verstärkt auftritt. Der Unterschied der Kopfkine-matik ist neben den Steifigkeitsunterschieden auch den geometrischen Randbedingungen der Insassenmodelle geschuldet, die im Falle des H350 ei-nen erhöhten initialen Abstand zwischen dem Kopf und der Rückenlehne/Kopfstütze aufwei-sen.

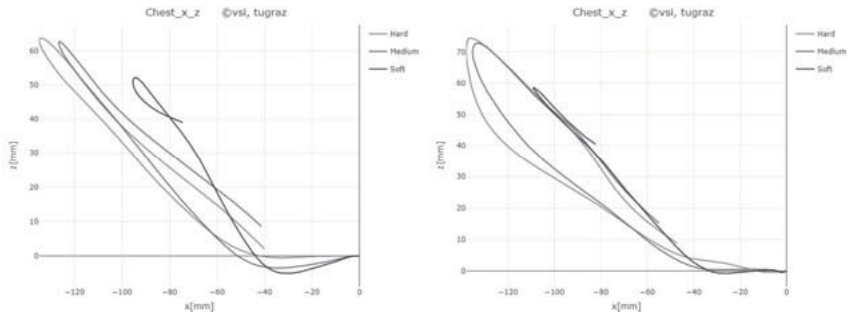


Bild 3: Brustkinematik: X-Z Verschiebung der Modelle bei einem  $\Delta v$  von 34 km/h. THUMS (rechts), H350 (links).

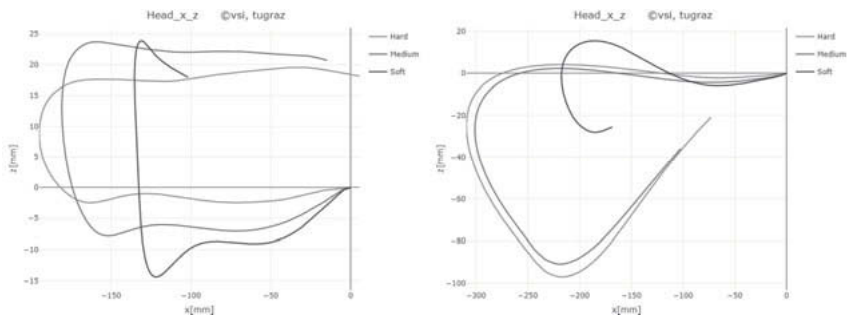


Bild 4: Kopfkinematik: X-Z Verschiebung der beiden Modelle bei einem  $\Delta v$  von 34 km/h. THUMS (rechts), H350 (links).

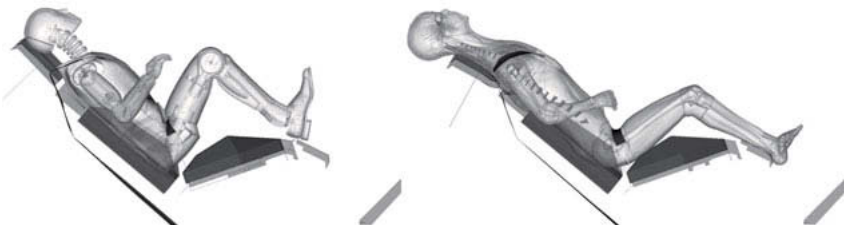


Bild 5: Dummy H350 vs. THUMS, Hard Puls, Lounge 0 Grad nach 80 ms in-crash.

## 5. Diskussion

Die dargestellten Ergebnisse zum individuellen Insassenschutz lassen Rückschlüsse auf zukünftige Herausforderungen im z.B.: autonomen Betrieb von Fahrzeugen zu. Eine klare Grenze kristallisiert sich nicht heraus, es ist jedoch ein Trend mit den ausgewählten Geschwindigkeiten und Pulshärten ersichtlich. Einzelne Kriterien sind zudem von der Positionierung des Modells abhängig. Gerade bei den „steiferen Dummy Modellen“ mit eingeschränkter Flexibilität kann dies einen großen Einfluss nehmen, z.B. der Tibia-Index im Heckcrash aufgrund der angewinkelten unteren Extremitäten (zurückzuführen auf das Beckendesign). Die Lounge Position und 0 Grad Sitzeinstellung liefert mit sechs Poor bewerteten Simulationen aus den zwölf herangezogenen eine niedrigere Grenze für einen zusätzlich zu dem sitzintegrierten Gurtsystem erweiterten Einsatz von Rückhaltemittel als die Upright Position. Für diese Randbedingungen (0 Grad, Lounge) wurden vor allem im Frontcrash Szenario für das Submarining in der Literatur Mechanismen zur Verbesserung beschrieben. Hier seien beispielsweise ein Aufrichten des Sitzes, Beckengurtstraffung oder ein Sitzflächenairbag genannt die das Risiko des Submarinings minimieren können [28]. Ebenfalls ist für die Lounge Position ein eindeutiger Unterschied in der Bewertung, bzw. der Kinematik der Modelle zu erkennen und erfordert somit eine genauere Analyse für das zur Entscheidung heranzuziehende Modell. Der Z-Unterschied ist aufgrund der Positionierung beider Modelle in der Lounge Position auch einer geringfügig flacheren Nackenstütze beim Menschmodell geschuldet. Haupteinflussgröße ist jedoch der Steifigkeitsunterschied des Pelvis, Thorax und Nackens, der beim H350 starr für den Thorax und geringfügig elastisch im Bereich des Nackens und des Beckens ausfällt. In der um 180 Grad gedrehten Upright Position fällt die Bewertung auch bei höheren  $\Delta v$  weitaus weniger kritisch aus. Eine Studie kommt ebenfalls zu dem Schluss, dass in dieser Position mit entsprechendem Energiemanagement des Sitzes, einer aktiven Kopfstütze und Rückenlehne gute biomechanische Werte zu erreichen sind [12].

Mit der Gruppenbewertung als mögliche Lösung können Bewertungen automatisiert über eine Vielzahl an Kriterien erstellt werden. Übersichtlich dargestellt können diese zur schnellen Identifikation von neuen oder aktuellen Problemstellungen des Insassenmodells herangezogen werden. Herausforderungen der Gruppenbewertung sind das Setzen der Limits zur Bewertung der Kriterien mit Good / Marginal / Poor sowie die Zuteilung der Kriterien für die jeweiligen Lastfälle. Im vorliegenden Fall sind hinsichtlich der Sitzeinstellung „Lounge“ und „Upright“ die Auswertegruppen identisch definiert. Für den THUMS kommt hinzu, dass derzeit noch kinematische Kriterien berücksichtigt sind die jedoch durch validierte Kriterien und Risikokurven ersetzt werden sollten.

Das generische Interieur-Basis-Modell sollte basierend auf diesen Ergebnissen vor allem in Hinblick auf hohe Crasheschweren verbessert werden. Mögliche Maßnahmen bei den dargestellten Fällen:

- Die Beschleunigung im Bereich der Brust für die Upright-Position sollte demnach gesenkt werden.
- Zusätzlich müssen die Kinematik und der Kopfkontakt zur Kopfstütze mit der Verschiebung/Verformung der Rückenlehne abgestimmt sein. Eine Verschiebung des gesamten Sitzes könnte dabei ausreichend sein.
- In der Lounge Position ist für ein Gleiten an der Rückenlehne eine frühe Beckengurtstraffung erforderlich. Dies liegt an der Verschiebung beim THUMS die einerseits eine Belastung der Schulter hervorruft (Gurtführung am Sitz) sowie bei zu hoher Streckung der Wirbelsäule den Kopf über den Einfluss der Kopfstütze hinausbewegen kann. Für die Tibia-Belastung muss eine dementsprechend weiche Abstützung des Unterschenkels am Sitz gewährleistet sein.
- Allgemeine Reduktion der Unfallschwere, beispielsweise mit externen Airbags [34] oder automatischen Notbremssystemen mit Umfelderkennung, beispielsweise Lidar, Radar oder Videosensorik.

## 6. Fazit und Ausblick

Mit der Kombination der Methoden ist es möglich die Grenzen von sitzbasierten Rückhaltekomponenten zu bestimmen, auch wenn diese sich aufgrund der Vielzahl an Konstellationen nicht auf einen bestimmten Geschwindigkeitsbereich eingrenzen lassen. Auch die Pulshärte ist mitentscheidend und kann bereits bei niedrigeren  $\Delta v$  (30 km/h - 40 km/h) starke Auswirkungen auf einzelne Kriterien ausüben.

Das „Open Source“ Bewertungstool soll als Ausgangspunkt zur Diskussion zukünftiger Harmonisierungstätigkeiten dienen. Darunter fallen die einzusetzenden Kriterien sowie die dazugehörigen Limits zur Bewertung der Kriterien. Durch die Formulierung der Kriterienbewertung und der zugehörigen Limits unterscheidet die Methode grundsätzlich nicht zwischen einem Verletzungskriterium, einem Verletzungsrisiko oder anderen definierter Kriterien.

Die Grenzen des Schutzpotentials mit den genannten konventionellen Rückhaltesystemen definieren schlussendlich weitere Forschungsfragen die sich mit der Sensierung und der Ansteuerung von zukünftigen Rückhaltesystemen beschäftigen und neue Wirkprinzipien der Rückhaltung einbeziehen die das vorhandene Potential besser nutzen können. Das generische und

individuell gestaltbare Sitzdesign wird in einer weiteren Studie eingesetzt und mit geeigneten Wirkprinzipien der Rückhaltung modifiziert.

## 7. Referenzen

- [1] ATD, „ATD Dummy Models“, (URL: [http://www.atd-models.de/020\\_de\\_dummy-modelle.html](http://www.atd-models.de/020_de_dummy-modelle.html)), visited (2018).
- [2] Davidsson J., Lövsund P., Ono K., Svensson M., „A Comparison between Volunteer, BioRID P3 and Hybrid III performance in Rear-End Sled Collisions Impacts“, Proc. IRCOBI International Conf. on the Biomechanics of Impacts, Spain, pp 165-17, (1999).
- [3] Dreuw P., Leurs A., „Interior Sensing as enabler for occupant safety and comfort in autonomous vehicles“, 14th International Symposium and Accompanying Exhibition on Sophisticated Car Occupant Safety Systems, Airbag2018, p. 19.1-19.13 (2018)
- [4] Dynamore, (URL: <https://www.dynamore.de/de/produkte/dyna>), visited (2019)
- [5] Dynasaur, „Dynamic simulation analysis of numerical results“, (URL: <https://gitlab.com/VSI-TUGraz/Dynasaur>), visited (2019)
- [6] ECE-R 44, „Amtsblatt der Europäischen Union - Regelung Nr. 44 der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Rückhalteeinrichtungen für Kinder in Kraftfahrzeugen („Kinderückhaltesysteme“)“, Anlage 1 und Anlage 2, (2011).
- [7] EuroNCAP, „Assessment protocol–adult occupant protection“, European new car assessment programme (Euro NCAP), Version 8.0.3, (2018).
- [8] Formtrends, „Volkswagen Italdesign Gira Interior Concept“, (URL: <https://www.formtrends.com/volkswagen-italdesign-gira-interior-concept/>), visited (2019).
- [9] Forster A., Zittlau F., „Occupant safety monitor: Key input for integrated safety“, 14th International Symposium and Accompanying Exhibition on Sophisticated Car Occupant Safety Systems, Airbag2018, p. 18.1-18.12 (2018).
- [10] Gayzik F., Moreno D., Vavalle N., Rhyne A., Stitzel J., „Development of the Global Human Body Models Consortium mid-sized male full body model“. Proceedings of the Injury Biomechanics Research Thirty-Ninth International Workshop, (2011).
- [11] Global Human Body Models Consortium. „GHBM Users Manual“, GHBM, (2011).
- [12] Huf A., Sengottu Velavan S., „Development of occupant restraint systems for future seating positions in fully or semi-autonomous vehicles“, 14th International Symposium and Accompanying Exhibition on Sophisticated Car Occupant Safety Systems, Airbag2018, p. 16.1-16.9 (2018).



- [13] Humanetics 2019, „Male Side Impact 5.0 (LS-Dyna) - Version Numbers“, (URL: <https://www.humaneticsatd.com/virtual-models/finite-element/WorldSID> (50th version-numbers), visited (2019).
- [14] Huntley M., „Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 213 - Child Restraint Systems“, NHTSA, (2002).
- [15] Iwamoto M., Nakahira Y., Kimpura H., „Development and validation of the Total Human Model for Safety (THUMS) toward further understanding of occupant Injury mechanisms in precrash and during crash“, Traffic Injury Prevention, 16:sup1,S36-S48, DOI: 10.1080/15389588.2015.1015000, (2015).
- [16] Klug C., Luttenberger P., Schachner M., Micorek J., Greimel R., Sinz W., Postprocessing of Human Body Model Results Introduction of the Open Source Tool DYNA-SAUR, 7 th International Symposium: Human Modeling and Simulation in Automotive Engineering, (2018).
- [17] Krafft M., Kullgren A., Malm S., Ydenius A., „Influence of Crash Severity on Various Whiplash Injury Symptoms: A Study Based on Real-life Rear-end Crashes with Recorded Crash Pulses“, 19th ESV Conf., Paper No. 05-0363, (2005).
- [18] Linder A., Lovsund P., Steffan H., „Validation of the Biorid P3 against volunteer and PMHS test data and comparison to the Hybrid III in low-velocity rear end impacts“, Association for the Advancement of Auto Medicine Proceedings, p. 367-381, (1999).
- [19] Linder A., Svensson M., „BioRID, a crash test dummy for rear impact: a review of development, validation and evaluation,“ in Road Safety Research, Policing and Education Conference, Brisbane, Queensland, Australia, (2000).
- [20] Locey C. M., Garcia-Espana J. F., Toh A., Belwadi A., Arbogast K. B., Maltese M. R., „Homogenization of vehicle fleet frontal crash pulses from 2000-2010“, Analysis of advances in automotive medicine. Association for the Advancement of Automotive Medicine. Annual Scientific Conference, 56, 299-311, (2012).
- [21] Luttenberger P., „Report on final test configuration and evaluation criteria“, Chapter 2.3.2, Deliverable D 3.7, SafeEV - Grant Agreement Number 314265, (2014).
- [22] Luttenberger P., Schachner M., Rajinovic S., Moser J., Leo C., Sinz W., „MUTANT - Analysis Tool - Functionality Report“, version 1.0, published at GITLAB (URL:<https://gitlab.com/VSI-TUGraz/mutant>), (2019).
- [23] Luttenberger P., Schlacher L., Schachner M., Sinz W., „MUTANT - Analysis Tool - Group Assessment Report“, version 1.0, published at GITLAB (URL:<https://gitlab.com/VSI-TUGraz/mutant>), (2019).

- [24] Luttenberger P., Sinz W., D'Addetta G. A., Freienstein, H., „Making integrated occupant safety systems assessable – virtual assessment approach for variable seating positions and pre-crash conditions“, 14th International Symposium and Accompanying Exhibition on Sophisticated Car Occupant Safety Systems, Airbag2018, p. 48.1-48.16 16 p., (2018).
- [25] MeinAuto, „Volvo Concept 26, Neues Sitz und Bedienkonzept“, (URL:<http://www.mein-auto.de/news/volvo-concept-26-neues-sitz-und-bedienkonzept/>), visited (2019).
- [26] Moldenhauer M., „Sicherheitssystem für Fahrzeuginsassen“, World Patent WO2006037685A1, Robert Bosch GmbH, (2005).
- [27] Nirula R., Mock C., Kaufman R., Rivara F., Grossman D. „Correlation of head injury to vehicle contact points using crash injury research and engineering network data“, Accident Analysis & Prevention, 35: 201–210, (2003).
- [28] Oestling M., Sunnevang C., Svensson C., Kock H., „Potential future seating positions and the impact on injury risks in a learning intelligent vehicle“, VDI Wissensforum - Fahrzeugsicherheit (2017).
- [29] OSCCAR „Future occupant safety for crashes in cars“, (URL: <http://osccarproject.eu/>), visited (2019).
- [30] Plugin-Magazin, „Nissan IDs Concept a vision of an electric future and autonomous drive“, (URL:<https://plugin-magazine.com/driving/nissan-ids-concept-a-vision-of-an-electric-future-and-autonomous-drive/>), visited (2019).
- [31] RTZ, „Adient on lightweight customised seating solutions for autonomous driving“, (URL:<http://www.road-to-zero.com/drivers/adient-on-lightweight-customised-seating-solutions-for-autonomous-driving/>), visited (2019).
- [32] Safety-Wissen, „Adient showcases Passenger Protection for Autonomous-driving Vehicles“, (URL: <http://www.safetywissen.com>), visited (2019).
- [33] Smardzewski J., Prekrat S., Pervan S., „Research of contact stresses between seat cushion and human body“, Drvna Industrija 2: 95–101, (2010).
- [34] Song J., Hwangbo S., Park H., Lee K., Bae M., Harm J., Kim T., Jung T., „A study of the rear external airbag to absorbing the rear-end collision energy“, 14th International Symposium and Accompanying Exhibition on Sophisticated Car Occupant Safety Systems, Airbag2018, p. 35.1-35.4 (2018).
- [35] Sung Y., Jong R., Key S., „A Study on the stiffness characteristics according to the body pressure on the seat cushion for vehicle“, Indian J. of Science and Tech.. (2016).

- [36] THOR50 male Dummy, „Freies zugängliches THOR 50 FE Dummy-Modell der UVA“, (URL: <https://www.nhtsa.gov/document/thorfels-dynav21wcertzip>), „distributed by University of Virginia and NHTSA/USDOT“ (2019).
- [37] USC NAP, „Consumer Information“, New Car Assessment Program, Final decision notice“73 Federal Register 134, (URL: <https://www.federalregister.gov/documents/2008/07/11/E8-15620/consumer-information-new-car-assessment-program>), pp 40035- 40038. (2008).
- [38] Varat M.S., Husher S.E., „Crash Pulse Modeling For Vehicle Safety Research“, 18th ESV Paper, KEVA Engineering, USA, (2003).
- [39] Zhang X., Qui Y., Griffin MJ., „Developing a simplified finite element model of a car seat with occupant for predicting vibration transmissibility in the vertical direction“, *Ergonomics*. 58(7):1220–1231. (2015).



## **Gurtbasierte, taktile Rückmeldekonzeppte in Übernahmesituationen beim automatisierten Fahren**

**Dr. Gert Weller, Roland Schnabl, Dr. Christian Strümpfer,**  
Joyson Safety Systems Aschaffenburg GmbH, Berlin und Ulm;  
**Lars Möller,** Frankfurt a.M.

### **Zusammenfassung**

Im Beitrag wird eine experimentelle Untersuchung im Fahrsimulator zur Überprüfung der Wirksamkeit gurtbasierter vibrotaktile Warnungen in Übernahmesituationen beim automatisierten Fahren vorgestellt. Hierbei wurde zwischen einer unkritischen Situation (stellvertretend für SAE Level 4) und einer kritischen Situation (entsprechend Level 3) unterschieden. Die Umsetzung der vibrotaktile Warnung erfolgte mit dem Motorized Seatbelt (MSB). In der kritischen Situation wurde ein positiver Effekt der vibrotaktile Warnung auf die Reaktionszeiten und die Fahrsicherheit erwartet. In der unkritischen Situation standen dagegen die subjektive Bewertung und die Fahrgüte im Mittelpunkt. Beide Merkmale sollten idealerweise zu keinen Nachteilen der vibrotaktile Warnung führen, um so die erhofften Effekte auf die Übernahmesicherheit unter Level 3 nicht zu gefährden. Die Ergebnisse bestätigten sowohl die angenommenen Effekte in der kritischen als auch in der unkritischen Situation. Insbesondere die positiven Effekte hinsichtlich Reaktionszeiten und Sicherheit zeigen das Potential des Einsatzes vibrotaktile, gurtbasierter Warnungen beim automatisierten Fahren. Im Ausblick wird auf den weiteren Forschungsbedarf hingewiesen.

### **Abstract**

The effect of seatbelt initiated vibrotactile warnings for take-over in automated driving were experimentally researched in a driving simulator study. The implementation of the vibrotactile warning in the seatbelt was done with the Motorized Seatbelt (MSB) which allows to adjust warning parameters based on the use case. It was distinguished between a critical take-over situation representing a level 3 use case and a non-critical one representing level 4. For the non-critical situation it was important that no negative effects in driving quality and subjective ratings were found. This was supported by the results. While this was also the case for the critical situation, here, safety aspects were in the focus. With the results showing significant faster reaction times and higher TTC values the results strongly support the use of vibrotactile warnings in take-over situations for automated driving.

## Einleitung

Das automatisierte Fahren bietet zahlreiche Vorteile, sowohl für den individuellen Nutzer als auch für die Gesamtheit der – nicht nur automobilen - Gesellschaft. Letzteres ist bedingt durch die zu erwartende Erhöhung der Verkehrssicherheit und des Verkehrsflusses, ist aber abhängig von der technischen Umsetzung, den gesetzlichen Rahmenbedingungen und der tatsächlichen Verbreitung und Nutzung. Eine Situation, deren Gestaltung und Umsetzung auf diese Aspekte einen großen Einfluss haben dürfte, ist die Übernahme vom automatisierten hin zum manuellen Fahren.

In der vorliegenden Studie wurden die Level 3 und 4 nach SAE [1] verwendet. Der Hauptunterschied zwischen beiden Stufen liegt in der Funktionalität der Automation, den damit verbundenen Anforderungen an die Fahrer und entsprechend den Freiheitsgraden hinsichtlich Aufmerksamkeit im weitesten Sinne. In Level 3 muss der Fahrer im Rahmen der gesetzlichen Anforderungen nach StVG §1b „wahrnehmungsbereit“ bleiben und – entweder nach Aufforderung durch das System oder aufgrund „offensichtlicher Umstände“ (StVG, §1b) - übernahmefähig sein. Dagegen stellt in Level 4 die Automation selber die Rückfallebene dar und bringt das Fahrzeug bei Erreichen der Systemgrenzen – und fehlendem Fahrereingriff – selbstständig in einen „risikominimalen Systemzustand“ [2] zurück.

## Warnkonzepte / Modalitäten

Während die oben genannten „offensichtlichen Umstände“ weitgehend außerhalb der Einflussmöglichkeiten durch Human Factors liegen, erlaubt die Übernahmeaufforderung durch das System Gestaltungsspielräume [3]. Der Gesetzgeber fordert lediglich, dass das Erfordernis zur Übernahme dem Fahrer „wahrnehmbar“ angezeigt wird (StVG §1a). Hier ist allerdings zu erwarten, dass Warnkonzepte, die für das manuelle und assistierte Fahren unter Level 2 entwickelt wurden beim automatisierten Fahren an ihre Grenzen kommen.

So ist die Wahrnehmung optischer Anzeigen notwendig an die näherungsweise dorthin gerichtete visuelle Aufmerksamkeit gebunden – was in Level 3 und 4 nicht mehr zwingend gegeben ist. Das gilt ebenso für akustische Warnungen deren Wahrnehmung durch konkurrierende Töne – z.B. aus Entertainmentsystemen [4] – gestört werden kann. Werden diese wahrgenommen, werden sie häufig sogar als störend empfunden. Dies gilt insbesondere in nicht-kritischen Situationen, wenn sich der Fahrer bereits ausreichend informiert fühlt, hier insbesondere bei Anwesenheit von Beifahrern („gefühlte Bloßstellung“ [5]).

Bisher wenig umgesetzt wurden Warnungen über den Tastsinn. Da haptische Wahrnehmung an die aktive Exploration insbesondere mit der Hand angewiesen sind, bieten sich in der

Automation passiv wahrgenommene taktile Warnungen an [6]. Diese werden idealerweise nur vom Fahrer wahrgenommen, sind aber gleichzeitig nicht an die Fahreraufmerksamkeit gebunden. Vibrotaktile Warnungen, also taktile Informationen an die Haut über Vibrationen, bieten sich für den vorliegenden Anwendungsfall durch deren Wiederholung und die zusätzlichen Informationen, die darüber vermittelbar werden können, besonders an [7]. Zu beachten sind die Rahmenbedingungen der Wahrnehmbarkeit vibrotaktile Reizungen, beschrieben etwa in [8], [9], [10].

### Übergeordnete Fragestellungen

Aus den bisher geschilderten Rahmenbedingungen ergibt sich die übergeordnete Fragestellung für vorliegende Arbeit: lassen sich durch den gezielten Einsatz vibrotaktile Rückmeldung über den Sicherheitsgurt die Übernahmezeiten und die Sicherheit sowie der Übernahmekomfort vom automatisierten zum manuellen Fahren optimieren?

### Methodik

In einer Vorstudie (N=20 interne Probanden) wurden neun verschiedene vibrotaktile Warnkonfigurationen auf ihre Eignung als Warnsignal untersucht. Die Ergebnisse dieser Studie flossen in die Hauptstudie ein.

Die Hauptuntersuchung fand im statischen Fahrsimulator mit dreikanaliger Projektion der Joyson Safety Systems Aschaffenburg GmbH in Berlin statt. Zusätzlich wurde in der Mittelkonsole ein Tablet befestigt, auf dem den Probanden Videos gezeigt wurden. Zu diesen waren von den Probanden über eine manuelle Eingabe Fragen zu beantworten.

Die Videoaufzeichnung der Kopfbewegung als Proxy für die Blickrichtung erfolgte mit Hilfe von drei handelsüblichen Webcams. Die Handposition am Lenkrad wurde mit der im Lenkrad integrierten Hands-on-Detection erhoben.

Vor den eigentlichen Versuchsfahrten absolvierten die Probanden jeweils eine etwa fünfminütige Eingewöhnungsfahrt im automatisierten Modus mit der Richtgeschwindigkeit von 130 km/h mit zwei wenig kritischen Übernahme-situationen.

Die Umsetzung der vibrotaktile Warnung erfolgte im Fahrzeug Mockup des Simulators mit dem Motorized Seatbelt (MSB). Der MSB ist ein elektromechanischer Retraktor, mit dem der Sicherheitsgurt reversibel angezogen und gelöst werden kann. Über die einzustellenden Parameter können so verschiedene Funktionen erfüllt werden:





- Reduktion der Gurtlose nach dem Einsteigen und gegebenenfalls während der Fahrt.
- Warnung der Insassen bei möglicher bevorstehender Kollision. Diese Funktion kann mehrstufig erfolgen, in einem frühen Stadium durch mehrmaliges Anziehen und Lö-

sen, in einem späten Zeitpunkt durch vollständiges Einziehen des Gurtes zur Vermeidung lockerer Gurtbandführung.

- Optimierung der Position des Insassen an den Sitz bei unerwarteten oder erwarteten starken Bewegungen in Längs- oder Querrichtung.
- Unterstützung des Fahrers beim Abschnallen durch gezieltes Einziehen des Gurtbandes.

Die eigentlichen Testfahrten bestanden aus zwei Fahrten auf einer Autobahn mit einer Länge von jeweils etwa 50 Kilometern. Hierbei wurde randomisiert eine Fahrt mit und eine Fahrt ohne vibrotaktile MSB-Warnung durchgeführt. Innerhalb jeder Fahrt wurde den Probanden – ebenfalls in randomisierter Reihenfolge – jeweils eine kritische (entsprechend einer zu erwartenden Situation in Level 3) und eine unkritische Übernahme-situation [11], passend für das Level 4, dargeboten. Als unkritische Übernahme-situation wurde das Erreichen des Endes der Operational Design Domain ODD [1] als Abfahrt von der Autobahn gewählt. Die Aufforderung zu Übernahme (Take over Request TOR) erfolgte in einer Entfernung von 50 Metern vor dem Abfahrtsschild das etwa 500 Meter vor dem Beginn der Autobahn-Abfahrt postiert war. Als kritische Übernahme-situation wurde ein auf dem rechten Fahrstreifen lieengebliebenes Fahrzeug definiert. Dieses war erst nach Ausscheren eines vor dem Ego fahrenden Fahrzeugs erkennbar. Der Zeitpunkt der Warnung orientierte sich an dem Überblicksartikel von [12], bei denen eine durchschnittliche TOR von etwa sechs Sekunden verwendet wurde. Je nachdem ob die Strecke mit oder ohne MSB-Vibration gefahren wurde, variierte die dargebotene Warnung (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht Warnmodalitäten

Warnmodalität	Kritische Situation		Unkritische Situation	
	Ohne MSB	Mit MSB	Ohne MSB	Mit MSB
Vibrotaktile		7 Pulse a 50N		2 Pulse a 30N
Visuell				
Akustisch*	Ja	Ja	Ja	

\* Die Gestaltung der Warnung orientierte sich an [13]: zwei Warntöne zu je 240ms mit 100ms Pause, Tonhöhe 2700Hz, Schalldruckpegel 66,8 db(A).

In der MSB Bedingung bestand die dritte Warnmodalität aus der vibrotaktile Warnung durch den MSB. Die Dauer der Warnung von etwa 700ms orientierte sich an der Länge der akustischen Warnung wodurch über die Redundanz und räumlich-zeitliche und semantische



Stimmigkeit eine erhöhte Wahrnehmbarkeit der Warnung erreicht werden sollte [10], [14], [15].

Entsprechend der übergeordneten Fragestellung stellte das Vorhandensein oder nicht-Vorhandensein dieser Warnung die einzige unabhängige Variable dar. Deren Auswertung erfolgte getrennt nach kritischer und unkritischer Situation. Die Auswahl der abhängigen Variablen orientierte sich an der Fragestellung und getrennt nach kritischer und unkritischer Situation. Während in der kritischen Situation diejenigen Variablen im Vordergrund standen, die Aspekte des Reaktionsverhaltens in Anlehnung an [16], der objektiven Sicherheit und der Fahr- bzw. Übernahmegüte in Anlehnung an [17] und [18] betreffen, waren dies in der unkritischen Situation insbesondere Komfortaspekte.

Insgesamt nahmen 40 externe Probanden an der Untersuchung teil. Die gleichmäßige Verteilung von Frauen und Männern in der Stichprobe auf vier Altersgruppen (18-24, 25-39, 40-54 und älter; MW 34,4 Jahre) orientierte sich an [19]. Die Darbietung der einzelnen Bedingungen erfolgte als Wiederholungsmessung. Aufgrund teils vollkommen fehlender Reaktionen wurde ein Proband (männlich, Altersgruppe 55+) von der Auswertung (mit Ausnahme der Unfälle) ausgeschlossen.

Die Auswertung der Daten erfolgte mit dem Statistikprogramm R. Da die vorhandene Literaturlage für die Wirkung gurtbasierter vibrotaktiler Warnungen keine Ableitung gerichteter Hypothesen zuließ, erfolgte die statistische Testung auf Unterschiede ungerichtet [20]. Abhängig davon, ob die Voraussetzungen erfüllt waren [20], wurden t-Tests für gepaarte Stichproben oder entsprechend nicht-parametrische Wilcoxon-Tests verwendet.

## Ergebnisse Hauptstudie

Für die unkritische Situation wurden entsprechend der inhaltlichen Ausrichtung insbesondere die Übernahmequalität und das Erleben der Übernahme ausgewertet. Für keine der den Konstrukten zugrundeliegenden Variablen (Details zu den erhobenen Variablen s.u., zu den Ergebnissen siehe [21]) ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen der Bedingung mit versus ohne vibrotaktiler Warnung.

In der kritischen Situation stand nicht das subjektive Empfinden der Probanden im Vordergrund, sondern die Schnelligkeit und Güte der Reaktion, um einen potentiellen Unfall verhindern zu können. Subjektive Maße wurden mit erhoben und ausgewertet, um sicherzugehen, dass die Akzeptanz der Warnung gegeben war.

Für die Orientierungsreaktion, die die Zeit zwischen TOR und erstem Blick auf die Straße bezeichnet, zeigten sich signifikant kürzere Reaktionszeiten für die Warnung mit MSB im Vergleich zur Warnung ohne MSB (mit MSB: MW: 0,96; M: 0,86; SD: 0,63; ohne MSB: MW:

1,32; M: 1;03 SD: 0,73; V = 46;  $p < .01$ ;  $r = -0.43$ ). Wegen technischer Probleme konnten die Videodaten allerdings nur von 21 der 40 Probanden ausgewertet werden.

Die obigen Ergebnisse zur Orientierungsreaktion werden von den Daten zur motorischen Handlungsbereitschaft (Zeit zwischen TOR und erster Hand am Lenkrad) gestützt (siehe Bild 1): in der Bedingung mit vibrotaktile Warnung haben die Probanden das Lenkrad mit durchschnittlich etwa einer halben Sekunde hoch signifikant schneller gegriffen als in der Bedingung ohne vibrotaktile Warnung (mit MSB: MW: 1,53; M: 1,48; SD: 0,31; ohne MSB: MW: 2,10; M: 2,13 SD: 0,42; V = 32;  $p < .001$ ;  $r = -0,91$ ).

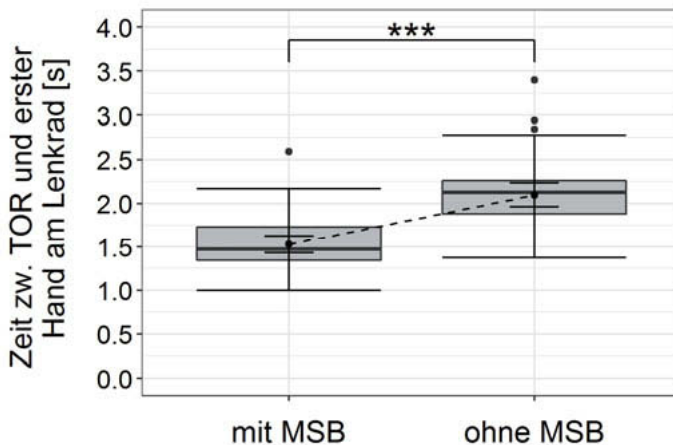


Bild 1: Motorische Handlungsbereitschaft (Zeit zwischen TOR und erster Hand am Lenkrad) in der kritischen Situation mit und ohne vibrotaktile Warnung mittels MSB (Boxplot und Mittelwert mit Standardabweichung).

Die mentale Handlungsbereitschaft als ersten Blick in einen der drei simulierten Spiegel (linker und rechter Außenspiegel und Innenspiegel) ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Bedingungen (mit MSB: MW: 5,05; M: 4,48; SD: 2,46; ohne MSB: MW: 5,60; M: 4,57 SD: 2,44; V = 56;  $p = n.s.$ ). Einschränkung muss darauf hingewiesen werden, dass von den 40 Probanden nur 15 in beiden Bedingungen in irgendeinem Spiegel geblickt hatten und somit nur diese Probanden im paarweisen Vergleich auswertbar waren.

Für die Zeit zwischen TOR und erstem Lenken zum Einleiten des Überholvorgangs („Handlungseinleitung“) ergaben sich bei der zweiseitigen Testung knapp keine signifikanten Unter-

schiede (mit MSB: MW: 3,06; M: 3,27; SD: 0,84; ohne MSB: MW: 3,33; M: 3,22 SD: 0,70;  $t = -1.91$ ,  $df = 38$ ,  $p = n.s.$ ).

Die Variable Handlungsabschluss, die die Zeit von TOR bis Ende des Spurwechsels bezeichnet, ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen der Bedingung mit versus ohne vibrotaktile Warnung (mit MSB: MW: 7,16; M: 6,89; SD: 1,58; ohne MSB: MW: 6,95; M: 6,77 SD: 1,28;  $V=382$ ,  $p = n.s.$ ).

Für die Spurhaltegüte ergaben sich ebenso keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Bedingungen (mit MSB: MW: 6,92; M: 6,53; SD: 3,40; ohne MSB: MW: 6,24; M: 5,93 SD: 3,09;  $V=466$ ,  $p = n.s.$ ).

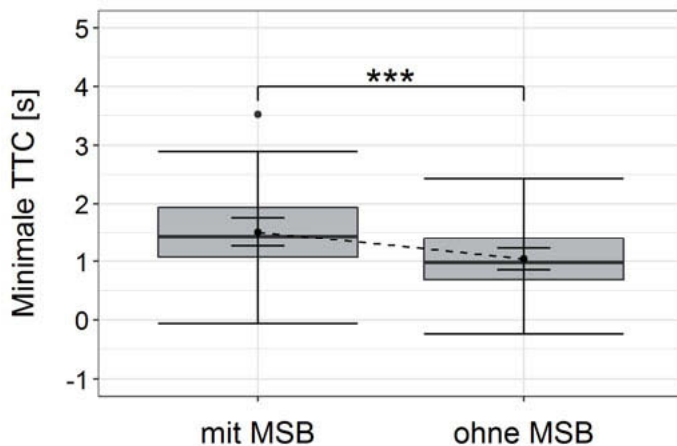


Bild 2: Minimale TTC in der kritischen Situation mit und ohne vibrotaktile Warnung mittels MSB (Boxplot und Mittelwert mit Standardabweichung).

Die Auswertung der maximalen Querbeschleunigung, einem Gütemaß beim Spurwechsel, ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Bedingungen (mit MSB: MW: 2,10; M: 1,94; SD: 0,92; ohne MSB: MW: 2,58; M: 2,15 SD: 1,56;  $V=296$ ;  $p = n.s.$ ).

Für das Abbremsen vor dem Spurwechsel wurde die longitudinale maximale Verzögerung im Bereich TOR plus 400 Meter als Gütemaß definiert. Hier zeigten sich bei der vibrotaktile Warnung signifikant stärkere Verzögerungen als bei der Warnung ohne Vibration (mit MSB: MW: -5,92; M: -6,78; SD: 3,19; ohne MSB: MW: -4,86; M: -4,67; SD: 3,43;  $V=245$ ;  $p < .05$ ,  $r = -0,32$ ).

Für die Standardabweichung der Geschwindigkeit, erhoben über die Zeit zwischen TOR und TOR plus 20 Sekunden, ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Bedingungen (mit MSB: MW: 19,3; M: 20,5; SD: 10,4; ohne MSB: MW: 16,6; M: 12,6; SD: 12,4;  $V=515$ ;  $p=n.s.$ ).

Für die Beurteilung der Wirkung der vibrotaktilen Warnung in der kritischen Situation war die Time-to-Collision (TTC) als Maß der Sicherheit relevant. Hier ergaben sich für die TTC mit vibrotaktiler Warnung hoch signifikant längere TTC-Werte im Vergleich zur Warnung ohne vibrotaktiler Warnung (siehe Bild 2). Die Steigerung der TTC um gemittelt eine halbe Sekunde entspricht etwa einer Erhöhung um 50% im Vergleich zur Warnung ohne MSB und kann damit als hoch relevant angesehen werden (mit MSB: MW: 1,51; M: 1,43; SD: 0,77; ohne MSB: MW: 1,04; M: 0,98 SD: 0,58;  $V = 648$ ;  $p<.001$ ,  $r = -0.59$ ). Da sich die Werte für TTC und zeitlichem Abstand (eng. Time Headway) bei stationären Bezugsobjekten nicht unterscheiden, gelten oben genannte Ergebnisse für die TTC analog für die Time Headway.

Rein deskriptiv ergaben sich zudem bei der Warnung mit MSB nur eine, bei der Warnung ohne MSB dagegen drei Kollisionen mit dem liegengebliebenen Fahrzeug. Wegen der geringen absoluten und relativen Fallzahlen wurde keine statistische Auswertung durchgeführt.

Ergänzend zu den objektiven Daten wurden die subjektiven Daten ausgewertet. Die Erhebung der subjektiven Akzeptanz-Maße erfolgte mit Hilfe der van der Laan Skala [22] mit den beiden Variablen Zufriedenheit und Nützlichkeit, und der aus beiden Variablen gemittelten Gesamtakzeptanz. Analog zur unkritischen Situation gab es bei der kritischen Situation weder für die Zufriedenheit (mit MSB: MW: 0,83; M: 1; SD: 0,97; ohne MSB: MW: 0,99; M: 1; SD: 0,64;  $V = 303,5$ ;  $p=n.s.$ ) noch für die Gesamtakzeptanz (mit MSB: MW: 1,31; M: 1,38; SD: 0,59; ohne MSB: MW: 1,22; M: 1,25 SD: 0,50;  $V = 433,5$ ;  $p=n.s.$ ) signifikante Unterschiede zwischen beiden Bedingungen. Anders als bei der unkritischen Situation gab es für die kritische Situation jedoch Unterschiede in der wahrgenommenen Nützlichkeit (siehe Bild 3): diese wurde für die Warnung mit MSB signifikant höher bewertet als für diejenige ohne MSB (mit MSB: MW: 1,78; M: 2,0; SD: 0,39; ohne MSB: MW: 1,50; M: 1,6 SD: 0,59;  $V = 319$ ;  $p<.001$ ,  $r=-0,42$ ).

Der erlebte Komfort der beiden Warnstrategien nach [23] hat sich zwischen der Warnung mit versus ohne MSB nicht signifikant unterschieden (mit MSB: MW: 0,36; M: 1,00; SD: 1,86; ohne MSB: MW: 0,72; M: 1,00 SD: 1,88;  $V = 187$ ;  $p=n.s.$ ). Ebenso wenig ergaben sich signifikante Unterschiede hinsichtlich der erlebten Gefahr nach [23] (mit MSB: MW: 3,46; M: 3,00; SD: 2,00; ohne MSB: MW: 3,23; M: 3,00 SD: 2,16;  $V = 250,5$ ;  $p=n.s.$ ). Die kritische Situation wurde zwar etwa zwei Punkte kritischer bewertet als die unkritische Situation, wurde damit aber nach wie vor als lösbar empfunden.

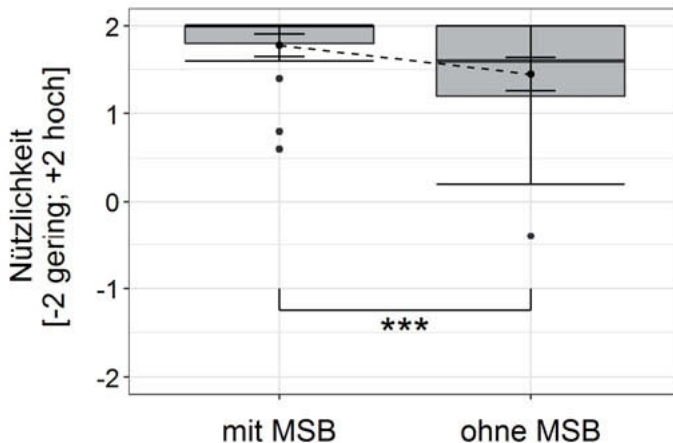


Bild 3: Subjektive Nützlichkeit nach [22] in der kritischen Situation mit und ohne vibrotaktile Warnung mittels MSB (Boxplot und Mittelwert mit Standardabweichung).

Die erlebte Beanspruchung zwischen der Situation mit und ohne MSB, erhoben mit der Skala nach [25], war tendenziell etwas höher für die Warnung mit MSB, war jedoch nicht signifikant (mit MSB: MW: 39,5; M: 37,0; SD: 25,0; ohne MSB: MW: 33,5; M: 23,0 SD: 25,9;  $V = 454,5$ ;  $p = n.s.$ ).

### Zusammenfassung & Ausblick

Die Auswertung der Daten zeigte für die unkritische Situation keine Unterschiede zwischen konventioneller und vibrotaktile Warnung hinsichtlich Komfort, Akzeptanz und Beanspruchung. Dies galt ebenso für die ebenfalls mit erhobenen objektiven Fahrdaten. Somit kann bestätigt werden, dass sich die Fahrer und Fahrerinnen in der unkritischen Situation nicht durch die vibrotaktile Warnung gestört fühlen oder diese zu Nachteilen hinsichtlich der Übernahmequalität führt.

Für die kritische Situation zeigten sich überwiegend signifikant positive Effekte der vibrotaktile Warnung für die sicherheitsrelevanten Fahrparameter wie Time-to-Collision und die ebenfalls sicherheitsrelevanten Reaktionszeiten. Auch wenn sich aus den geringen absoluten Fallzahlen der Unfallzahlen in der Studie keine statistischen Aussagen ableiten lassen, sind die relativen Unterschiede unter Berücksichtigung der Bedeutsamkeit des Ereignisses für die Praxis dennoch bedeutsam. Darüber hinaus gab es keine negative Bewertung im

Vergleich zu konventionellen Warnungen. Hervorzuheben ist die höhere Bewertung der Nützlichkeit in der kritischen Situation, ohne dass die Situation selber als gefährlicher eingestuft wird. Kritisch diskutiert werden könnte die tendenziell stärkere Bremsung in der Bedingung mit vibrotaktile Warnung. Auch wenn diese mit die Ursache der positiven, höheren TTC darstellen, könnten sie ihrerseits zur Gefahr für nachfolgenden Verkehr werden.

Insgesamt zeigt die gurtbasierte vibrotaktile Warnung jedoch positive Effekte für die Sicherheit in der dafür relevanten kritischen Situation bei gleichzeitig hoher Akzeptanz sowohl in der kritischen als auch in der unkritischen Übernahme-situation.

In weiteren Simulatorstudien sollten Aspekte einer adaptiven Warnung untersucht werden. Insbesondere ist damit zu rechnen, dass eine Anpassung der Warnung an den Fahrerzustand zu besseren Reaktionen und auch höherer Akzeptanz führen kann. Denkbar ist die Anpassung des Warnzeitpunktes: früher bei Abwendung oder Müdigkeit, später oder nur unterstützend bei übernahmebereitem Fahrer oder bereits eingeleiteter Übernahme.

Weiter kann auch daran gedacht werden, verschiedene vibrotaktile Warnmuster zu untersuchen (vgl. auch [26]). So könnte durch gezielte Variation der Warnungen eine noch deutlichere Unterscheidung in kritische und unkritische Warnungen erreicht werden.

Um die Übertragbarkeit der hier gefundenen Ergebnisse zu prüfen, sollten Fahrversuche im Feld durchgeführt werden. In diesen Versuchen muss insbesondere die Wahrnehmbarkeit der vibrotaktile Warnungen in Realbedingungen getestet werden. Dies betrifft insbesondere die Abgrenzung der Warnungen von Vibrationen, die durch die Straßenoberfläche entstehen (vgl. [13], [26]) und die Wahrnehmbarkeit durch dicke Kleidung (vgl. [27]).

## Literatur

- [1] SAE International (2018). *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. SAE Standard J3016\_201806. Zugriff am 27.09.2019 unter [https://www.sae.org/standards/content/j3016\\_201806/](https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/)
- [2] WDB 2018. Zugriff am 27.09.2019 unter: <https://www.bundestag.de/resource/blob/562790/c12af1873384bcd1f8604334f97ee4b9/wd-7-111-18-pdf-data.pdf>
- [3] Carsten, O. & Martens, M.H. (2019). *How can humans understand their automated cars? HMI principles, problems and solutions*. Cognition, Technology & Work (21, S. 3-20). <https://doi.org/10.1007/s10111-018-0484-0>
- [4] Mohebbi, R., Gray, R. & Tan, H. Z. (2009). *Driver reaction time to tactile and auditory rearend collision warnings while talking on a cell phone*. Human Factors, 51 (1), 102-110.
- [5] Fecher, N. & Hoffmann, J. (2015). Fahrerwarnelemente. In: H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3. Aufl.) (S. 675-685). Wiesbaden: Springer-Vieweg.
- [6] Grunwald, M. (2009). *Der Tastsinn im Griff der Technikwissenschaften? Herausforderungen und Grenzen aktueller Haptikforschung*. LIFIS online. Zugriff am 27.09.2019 unter [https://leibniz-institut.de/archiv/grunwald\\_martin\\_09\\_01\\_09.pdf](https://leibniz-institut.de/archiv/grunwald_martin_09_01_09.pdf)
- [7] Gaffary, Y. & Lécuyer, A. (2018). *The Use of Haptic and Tactile Information in the Car to Improve Driving Safety: A Review of Current Technologies*. Frontiers in ICT, 5 (5), 1-11.
- [8] Jones, L. A. & Sarter, N. B. (2008). *Tactile Displays: Guidance for Their Design and Application*. Human Factors, 50 (1), 90-111.
- [9] Gescheider, G. A., Bolanowski, S. J. & Verrillo, R. T. (2004). *Some characteristics of tactile channels*. Behavioural brain research, 148 (1-2), 35-40.
- [10] van Erp, J. B., Toet, A. & Janssen, J. B. (2015). *Uni-, bi-and tri-modal warning signals: Effects of temporal parameters and sensory modality on perceived urgency*. Safety science, 72, 1-8.
- [11] Gold, C., Naujoks, F., Radlmayr, J., Bellem, H. & Jarosch, O. (2018). Testing Scenarios for Human Factors Research in Level 3 Automated Vehicles. In: N. Stanton (Hrsg.), *Advances in Human Aspects of Transportation*. AHFE 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, 597 (S. 1-9). Cham: Springer.

- [12] Eriksson, A. & Stanton, N. A. (2017). *Take-over time in highly automated vehicles: non-critical transitions to and from manual control*. Human Factors, 59 (4), 689-705.
- [13] Petermeijer, S., Bazilinskyy, P., Bengler, K. & de Winter, J. (2017). *Take-over again: Investigating multimodal and directional TORs to get the driver back into the loop*. Applied Ergonomics, 62, 204-215.
- [14] Wickens, C. D., Hollands, J. G., Banbury, S. & Parasuraman, R. (2013). *Engineering psychology & human performance* (Fourth Edition). Hove: Psychology Press.
- [15] Kolers, P. A., & Brewster, J. M. (1985). *Rhythms and responses*. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 11(2), 150-167
- [16] Vogelpohl, T., Vollrath, M., Kühn, M., Hummel, T. & Gehlert, T. (2016). *Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung. Teil 1: Review der Literatur und Studie zu Übernahmezeiten*. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Unfallforschung der Versicherer, 39, 1-159.
- [17] Jones, P. (2013). *Development and application of a questionnaire for evaluating the subjective Steering Feel of Steer-by-Wire steering systems*. Masterarbeit, Technische Universität, Berlin.
- [18] Wiedemann, K., Naujoks, F., Wörle, J., Kenntner-Mabiala, R., Kaussner, Y. & Neukum, A. (2018). *Effect of different alcohol levels on take-over performance in conditionally automated driving*. Accident Analysis and Prevention, 115, 89-97.
- [19] 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. Zugriff am 24.05.2018 unter <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2013-04-26/pdf/2013-09883.pdf>
- [20] Field, A, Miles, J, & Field, Z (2012). *Discovering Statistics Using R*. London: Sage
- [21] Möller, L. (2018). *Gurtbasierte, taktile Rückmeldekonzpte für Übernahme-situationen*. Masterarbeit am Institut für Psychologie und Arbeitswissenschaft der Technischen Universität Berlin.
- [22] Van der Laan, J.D., Heino, A., & De Waard, D. (1997). *A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics*. Transportation Research - Part C: Emerging Technologies, 5, 1-10. Zugriff am 27.09.2019 unter: <https://www.hfes-europe.org/accept/accept.htm>
- [23] Damböck, D., Bengler, K., Farid, M. & Tönert, L. (2012). *Übernahmezeiten beim hoch-automatisierten Fahren*. Tagungsband der VDI-Tagung Fahrerassistenz in München, 15, 16-27.



- [24] Neukum, A., Lübbecke, T., Krüger, H.-P., Mayser, C. & Steinle, J. (2008). *ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen*. In: M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), 5. Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS 2008 (S. 141-150). Karlsruhe: fmrt.
- [25] Hill, S. G., Lavecchia, H. P., Byers, J. C. Bittner, A. C., Zaklad, A. L. & Christ, R. E. (1992). *Comparison of 4 Subjective Workload Rating-Scales*. Human Factors, 34 (4), 429-439.
- [26] NHTSA (2018). *Design Guidance for Level 2 & 3 Automated Driving Concepts*. DOT HS 812 555. Zugriff am 27.09.2019 unter:  
[https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/13494\\_812555\\_l2l3automatichfguidance.pdf](https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/13494_812555_l2l3automatichfguidance.pdf)
- [27] Spence, C. & Ho, C. (2008). *Tactile and multisensory spatial warning signals for drivers*. IEEE Trans. Haptics, 1 (2), 121-129.



## Tiefen- und Volumenadaptive Frontalairbags

### Rückhaltekonzpte für die Anforderungen des Automatisierten Fahrens

**Bernd Cyliax, Ingo Kalliske**, Joyson Safety Systems, Berlin;  
**Ernst Glas, Christoph Vieler**, Volkswagen AG, Wolfsburg

#### Zusammenfassung

Zukünftige Fahrzeugkonzepte für den Individualverkehr werden sowohl das aktive Fahren als auch das automatisierte Fahren ermöglichen. Bereits heute können erweiterte Fahrerassistenzsysteme verschiedene Fahrfunktionen übernehmen und den Fahrer bei der Fahraufgabe unterstützen. Aktuelle Prognosen zeigen, dass der Anteil an Fahrzeugen, die hochautomatisiert fahren können in den nächsten Jahren deutlich steigen wird. Da die Fahrzeugüberwachung im automatisierten Fahrmodus nicht mehr erforderlich ist, hat der Insasse in diesem Zeitraum die Möglichkeit, andere Sitzpositionen einzunehmen. In einer von der Volkswagen AG initiierten Gemeinschaftsstudie wurde untersucht, welche Auswirkungen die freie Positionierung des Insassen, im Falle eines Crashes hat und welche Anpassungen im Rückhaltesystem erforderlich sind.

Aktuelle Rückhaltesysteme haben in den heute üblichen Sitzpositionen die beste Schutzwirkung. Bei den zukünftig möglichen Sitzpositionen im automatisierten Fahrmodus kann der Körper im Crash anders belastet werden, wodurch eine Anpassung der Rückhaltekomponenten erforderlich wird. Ursache ist insbesondere die große Spreizung der Abstände zwischen dem Insassen und den Frontalbags in verschiedenen Sitzpositionen. Aus diesem Grund wurden tiefen- und volumenadaptive Airbagsysteme entwickelt und hinsichtlich ihrer Systemperformance bewertet. Voraussetzung für das neue Airbagkonzept war eine vergleichbare Schutzwirkung in der aktiven Fahrposition, wie sie bereits heute mit konventionellen Airbagsystemen erzielt werden kann. Zusätzlich sollten Insassen, die eine abweichende Sitzposition einnehmen und sich hierbei von den Rückhaltekomponenten entfernen, mit Hilfe eines größeren Airbagvolumens in Verbindung mit höherer Luftsacktiefe besser geschützt werden.

Im Rahmen dieser Studie wurden verschiedene Randbedingungen betrachtet. In einer Stufenaufnahme wurden die Insassenbelastungen mit einem konventionellen Airbagsystem unter Berücksichtigung unterschiedlicher Dummygrößen, Sitzpositionen und Crashkonfigurationen analysiert. Das Potential eines tiefenadaptiven Airbagkonzepts wurde anschließend mittels numerischer Simulation bewertet und optimiert. Die finale Absicherung erfolgte in dynamischen Versuchen. Insbesondere in den neuen Sitzpositionen konnte mit dem tiefenadaptiven Konzept das Verletzungsrisiko deutlich reduziert werden.

## Abstract

Technological developments in the automotive industry will soon make both active driving and automated driving possible. An increasing number of modern cars are already equipped with advanced driver-assistance systems (ADAS). Adaptive cruise control, lane keeping and automated emergency braking support the driver and increase road safety by mitigating human error. Current projections show that such systems will advance over the next years to provide fully functional automated driving. In automated driving mode the system will take full control of the vehicle, thus releasing the driver not only from the responsibility of driving, but also monitoring the system. At this point the occupant has the opportunity to change the seating position using the full range of seat travel and seat back angle. For this reason Volkswagen AG initiated a collaborative study to evaluate the impact of seating position and occupant posture on safety in case of an accident, and to determine how the restraint system needs to be able to adapt as a consequence.

All occupant restraint systems perform best when the occupant is exactly located in the manufacturer's predefined position. With increasing deviation from this position, the load distribution on the human body changes, resulting in an increased risk of injury in case of an accident. An adaptive driver and passenger airbag design, with variable volume and depth, is necessary in order to optimize occupant protection in a variety of different seating positions and postures. The goal is to provide an adaptive cushion volume depending on the distance between the occupant and the steering wheel or instrument panel. The dual depth driver and passenger airbag concept is designed to cover occupants in a relaxed position without compromising the current protection level for occupants in an active driving position.

Various boundary conditions were considered in this study. The baseline performance was initially established with a conventional restraint system incorporating different size dummies, seating positions and crash configurations. Smaller occupants with an increased distance to

the frontal airbags are especially prone to a higher risk of injury in the head region. After identifying areas in need of optimization, the potential of an adaptive driver and passenger airbag design with variable volume was assessed by numerical simulation and subsequently verified in dynamic sled tests. Occupants in a relaxed seating position clearly benefited from the adaptive dual depth airbag concept, as their risk of injury was explicitly reduced.

## Einleitung

Das automatisierte Fahren könnte als zukünftiges Mobilitätskonzept zahlreiche Vorteile bieten. Auch wenn aktuell noch nicht alle rechtlichen Rahmenbedingungen geklärt sind, hat diese Technologie das Potential einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Verkehrssicherheit zu leisten und durch positive Effekte auf den Verkehrsfluss zur Reduktion des Energieverbrauchs und der Emissionen beizutragen. Darüber hinaus profitiert der Nutzer von einem zusätzlichem Komfort und Zeitgewinn, durch die Verwendung der Fahrzeit für andere Aktivitäten oder auch durch das automatisierte Parken des Fahrzeugs in Parkhäusern. Zusätzlich eröffnen sich Chancen, die individuelle Mobilität für Bevölkerungsgruppen zu verbessern, die bislang ausgeschlossen waren, wie etwa fahruntüchtige ältere Menschen oder Menschen mit Behinderungen [1].

Der Automationsgrad von Fahrzeugen wird nach SAE J3016 in sechs verschiedenen Stufen unterteilt [2]. Stufe 0 beschreibt ein Fahrzeug ohne automatisierte Fahrfunktionen und Fahrerassistenzsysteme. Der Fahrer übernimmt zu jeder Zeit die vollständige Kontrolle und Verantwortung. In einem Fahrzeug der höchsten Automationsstufe 5 ist keine menschliche Intervention mehr erforderlich. Die Verantwortung für den fehlerfreien Betrieb liegt beim Hersteller. Ein Lenkrad ist nur noch optional.

Tabelle 1: Automatisierungsstufen von Fahrzeugen gemäß SAE J3016 [2]

SAE level	Name	Narrative Definition	Execution of Steering and Acceleration/Deceleration	Monitoring of Driving Environment	Fallback Performance of Dynamic Driving Task	System Capability (Driving Modes)
<b>Human driver monitors the driving environment</b>						
<b>0</b>	<b>No Automation</b>	the full-time performance by the human driver of all aspects of the dynamic driving task, even when enhanced by warning or intervention systems	Human driver	Human driver	Human driver	n/a
<b>1</b>	<b>Driver Assistance</b>	the driving mode-specific execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the human driver perform all remaining aspects of the dynamic driving task	Human driver and system	Human driver	Human driver	Some driving modes
<b>2</b>	<b>Partial Automation</b>	the driving mode-specific execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the human driver perform all remaining aspects of the dynamic driving task	System	Human driver	Human driver	Some driving modes
<b>Automated driving system ("system") monitors the driving environment</b>						
<b>3</b>	<b>Conditional Automation</b>	the driving mode-specific performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task with the expectation that the human driver will respond appropriately to a request to intervene	System	System	Human driver	Some driving modes
<b>4</b>	<b>High Automation</b>	the driving mode-specific performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task, even if a human driver does not respond appropriately to a request to intervene	System	System	System	Some driving modes
<b>5</b>	<b>Full Automation</b>	the full-time performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task under all roadway and environmental conditions that can be managed by a human driver	System	System	System	All driving modes

Im Fokus dieser Studie stehen Fahrzeuge mit bedingter Automation (Automationsstufe 3). Der Fahrer kann die Fahraufgabe unter bestimmten Randbedingungen vollständig an das Fahrzeug delegieren und sich dauerhaft vom Verkehrsgeschehen abwenden, muss jedoch in der Lage sein die Fahraufgabe nach Aufforderung innerhalb weniger Sekunden wieder zu übernehmen. Diese Einschränkung lässt aktuell nur begrenzte Modifikationen bei der Innenraumgestaltung von Fahrzeugen zu.

Die Verfügbarkeit von hochautomatisierten Fahrfunktionen in Kraftfahrzeugen wird in den nächsten Jahren deutlich wachsen. In einer vom ADAC beauftragten Studie der Prognos AG wird davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2050 zwischen 50-70 Prozent der Fahrzeuge über eine Automatisierungsfunktion der Stufe 4 verfügen [3].

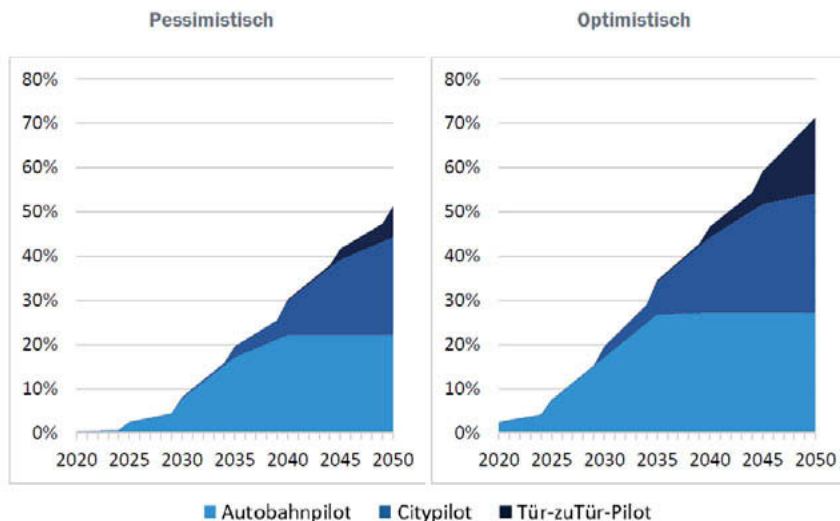


Bild 1: Anteil der Fahrzeuge mit Automatisierungsfunktionen an den Neuzulassungen [3]

Je höher der Anteil an automatisiert betriebenen Fahrzeugen im Gesamtbestand ist, desto besser kann das Potential dieser Technologie hinsichtlich Verkehrssicherheit und Effizienzsteigerung genutzt werden.

### Ausgangslage

Auch wenn das automatisierte Fahren das Unfallrisiko reduziert, können Unfälle insbesondere im Mischverkehr von automatisierten und manuell betriebenen Fahrzeugen nicht ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund müssen die Insassenrückhaltesysteme an die zukünftigen Anforderungen angepasst werden.

Bislang wurde der Sitzverstellbereich genutzt um Insassen mit verschiedener Körpergröße eine sichere und bequeme Bedienung des Fahrzeugs zu ermöglichen. Zukünftig wird die Sitzverstellung zusätzlich genutzt werden, um eine entspanntere, ausschließlich auf Komfort ausgerichtete Sitzposition im automatisierten Fahrmodus einzunehmen. In Zusammenarbeit mit der Volkswagen AG wurde untersucht, welche Auswirkungen die freie Positionierung des Insassen, unter Berücksichtigung des gesamten Sitzverstellfeldes inklusive der Lehnenneigung, im Falle eines Crashes hat und welche Anpassungen im Rückhaltesystem erforderlich

sind. Zielstellung war es, ein Fahrer- und Beifahrerairbagkonzept zu entwickeln, dass den Insassen sowohl in der konventionellen, aktiven Fahrposition als auch in einer entspannten Sitzposition bestmöglich schützt.

Die entspannte Sitzposition wurde definiert durch eine Verschiebung des Sitzes nach hinten in Verbindung mit einem flachen Lehnwinkel. Zusätzliche Verstellmöglichkeiten wurden nicht vorgesehen, um die kurzen Übernahmezeiten eines Level 3 Fahrzeugs von wenigen Sekunden nach Aufforderung, vom automatisierten auf den manuellen Fahrmodus sicherzustellen und dem Fahrer die Möglichkeit zu geben, seine reguläre Position wieder einzunehmen. Alle weiteren Parameter des Rückhaltesystems wurden im Rahmen dieser Studie beibehalten. Die grundsätzliche Fahrzeugarchitektur wie Gurtsystem, Gurtanbindungspunkte, Airbagposition und Sitzverstellfeld blieb weitgehend unangetastet.

Die Untersuchungen umfassten verschiedene Crashesituationen, Insassengrößen und Sitzpositionen. Bewertet wurde ein Frontalcrash mit 50 km/h gegen die starre Barriere gemäß ECE R137 [4]. Diese Konfiguration wurde sowohl mit dem 5% H-III Dummy, der eine kleine Frau repräsentiert, als auch mit dem 50% H-III Dummy, der einen Mann durchschnittlicher Statur repräsentiert, durchgeführt. Weiterhin wurde ein Offsetcrash gegen die deformierbare Barriere gemäß ECE R94 mit einem 50% H-III Dummy berücksichtigt [5]. Die Geschwindigkeit für diesen Lastfall wurde von 56 km/h auf 64 km/h angehoben um die Ergebnisse bei Bedarf nach EuroNCAP Kriterien bewerten zu können. Diese Untersuchungen wurden jeweils für den Fahrer und Beifahrer in der regulären Sitzposition für den manuellen Betrieb, als auch in der entspannten Sitzposition des automatisierten Fahrmodus durchgeführt. In der Summe ergeben sich somit 12 Lastfälle, die mittels numerischer Simulation bewertet und in dynamischen Tests abgesichert wurden.

Mit den neuen Komfortsitzpositionen ergeben sich zusätzliche Herausforderungen im Crash, da sich der Abstand zwischen Airbag und Insasse erhöht. Zur Statusaufnahme wurden die Insassenbelastungswerte für alle beschriebenen Lastfälle mit einem konventionellen Rückhaltesystem bewertet. Der direkte Vergleich zwischen der Standardsitzposition und der Komfortposition offenbart deutlich höhere Kopf- und Nackenbelastungen in der entspannten Position (siehe Bild 2 und 3). Die erhöhten Belastungen resultieren aus dem größeren Abstand zu Fahrer- und Beifahrerairbag, wodurch Oberkörper und Kopf später an die Rückhaltekomponenten ankoppeln. Insbesondere bei kleinen Insassen, die initial im vorderen Bereich des



Verstellfeldes sitzen, erhöhen sich die Belastungen im Frontalcrash wenn der Sitz im automatisierten Fahrmodus in eine hintere Position mit geneigter Lehne verstellt wird.

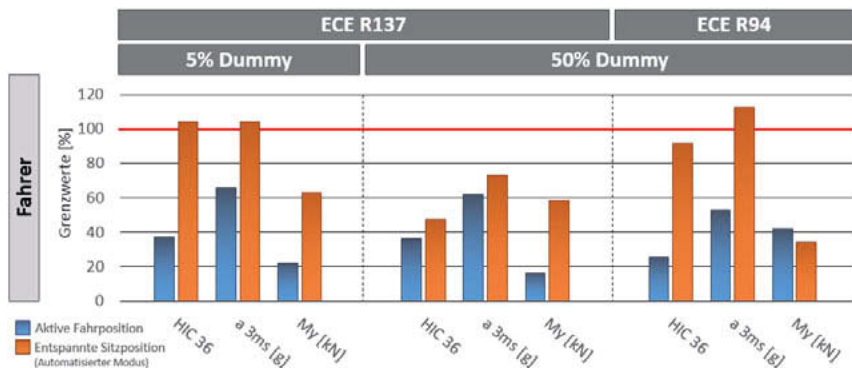


Bild 2: Vergleich der Belastungswerte mit konventionellem Rückhaltesystem (Fahrer)

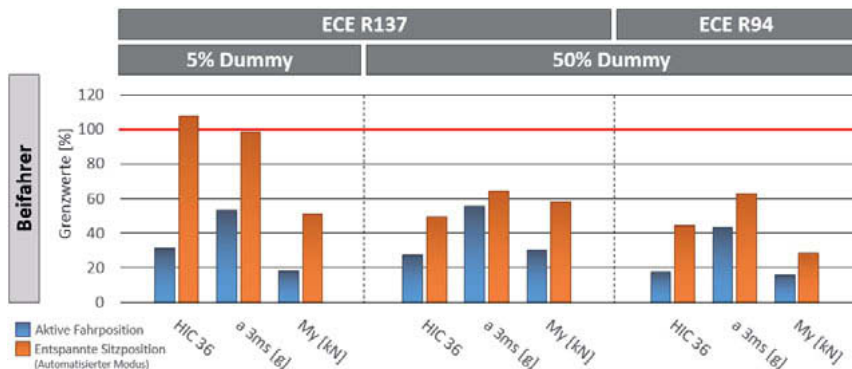


Bild 3: Vergleich der Belastungswerte mit konventionellem Rückhaltesystem (Beifahrer)

Um die variierenden Abstände des Insassen zu den Frontalairbags zu kompensieren wurden im Rahmen dieser Studie tiefen- und volumenadaptive Airbagsysteme entwickelt und hinsichtlich ihrer Systemperformance bewertet. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Position und Lage der Insassen im Fahrzeug eindeutig ermittelt und als Eingangsparameter für die Auslösestrategie genutzt werden kann. Voraussetzung für das neue Airbagkonzept war eine vergleichbare Schutzwirkung in der aktiven Fahrposition, wie sie bereits heute mit konventionellen Airbagsystemen erzielt werden kann. Zusätzlich sollten Insassen, die im automatisierten Fahrmodus eine entspannte Sitzposition einnehmen und sich hierbei von den

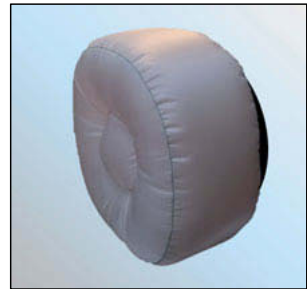
Rückhaltekomponenten entfernen mit Hilfe eines größeren Airbagvolumens in Verbindung mit höherer Luftsacktiefe besser geschützt werden.

### Konzeptbeschreibung Fahrerairbag

Aktuell basieren Fahrerluftsäcke im Allgemeinen auf einem 2-D-Konzept bestehend aus einer kreisrunden Ober- und Unterplatte. Die maximale Luftsackausdehnung in Richtung des Insassen wird, ohne die Berücksichtigung von Fangbändern, ausschließlich über den Luftsackdurchmesser definiert. Diese Luftsäcke sind einfach zu fertigen und ohne zusätzliche Vorfaltung oder aufwendige Überwachungsprozesse in einer Faltmaschine zu positionieren.

Für die Anforderungen des automatisierten Fahrens ist insbesondere in der hinteren Sitzposition eine höhere Luftsackausdehnung Richtung Insasse erforderlich, um eine optimale Rückhalteperformance zu ermöglichen. Diese zusätzliche Luftsacktiefe ausschließlich über einen vergrößerten Durchmesser zu realisieren, hätte eine deutliche Volumenerhöhung des Fahrerairbags bereits in der aktiven Fahrposition zur Folge. Um die erforderliche zusätzliche Luftsacktiefe bereitzustellen wurde auf ein 3-D-Konzept umgestellt. Hierzu wurde eine zusätzliche Ringfläche aus Luftsackgewebe zwischen Ober- und Unterplatte eingefügt (Bild 4). Durch die Formänderung verbessert sich auch der Abdeckbereich für Insassen in der aktiven Fahrposition, was zu einem zusätzlichen Schutzpotential in Offset- und Schrägaufprallsituationen beiträgt.

Bild 4: 3-D-Fahrerairbag



Die Tiefenadaptivität des Konzepts wird über auslösbare Fangbänder umgesetzt. Der Fahrerairbag verfügt über kurze und lange Fangbänder. Mit den kurzen Fangbändern kann eine Luftsacktiefe realisiert werden, die einem herkömmlichen Luftsack entspricht. Die langen Fangbänder ermöglichen eine erhöhte Luftsackausdehnung in Richtung des Insassen, verhindern aber das Überspringen in der Entfaltungsphase und verringern somit das Kontakt und Anschussrisiko. Die Auslösung erfolgt pyrotechnisch über einen separaten Zündkreis.

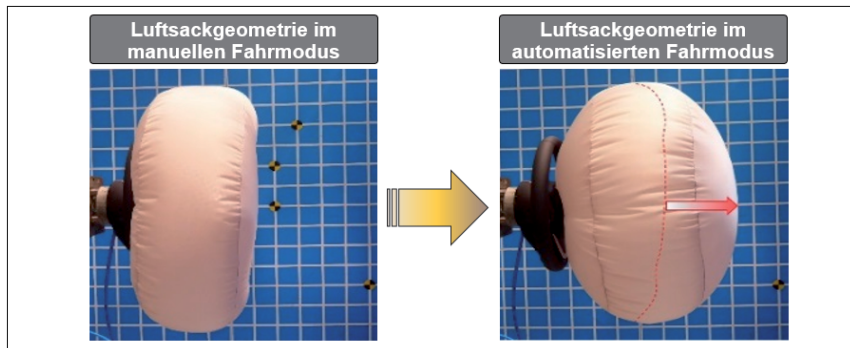


Bild 5: Fahrerluftsackgeometrie im manuellen und automatisierten Fahrmodus

Zielstellung bei der Konzeptauslegung war es, in Abhängigkeit des Luftsackvolumens eine angepasste Generatorleistung bereitzustellen. Auf der Fahrerseite wurde hierzu ein konventioneller zweistufiger Gasgenerator verwendet. Bei Auslösung der ersten Stufe wird das kleinere Volumen für den manuellen Fahrmodus gefüllt, für das größere Volumen im automatisierten Fahrmodus werden beide Generatorstufen aktiviert und zusätzlich die Fangbänder ausgelöst.

### Konzeptbeschreibung Beifahrerairbag

Der Beifahrerairbag ist konzeptionell vergleichbar mit dem Fahrerairbag aufgebaut. Auch auf der Beifahrerseite erfolgt die Tiefen- und Volumenadaptivität mit Hilfe von variablen Fangbandlängen.

Um problemlos das erforderliche Luftsackvolumen von über 160 Litern im automatisierten Fahrmodus bereitstellen zu können wurde auf ein Modulkonzept mit 2 Gasgeneratoren gewechselt. Zum Füllen des kleineren Volumens wird nur der Gasgenerator der ersten Stufe benötigt. Für das vollständige Volumen im automatisierten Fahrmodus werden beide Gasgeneratoren aktiviert.

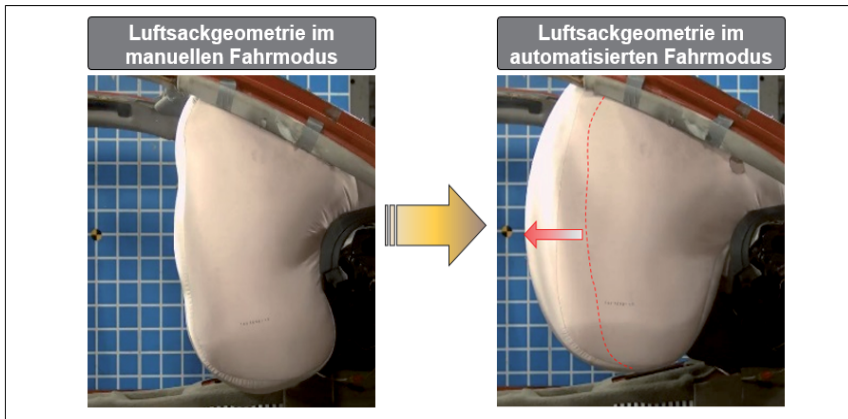


Bild 6: Beifahrerluftsackgeometrie im manuellen und automatisierten Fahrmodus

Auf Grund der zwei nebeneinander angeordneten Generatoren, ist eine separate dritte Aktivierungsstufe für die Fangbandauslösung in diesem Modulkonzept nicht erforderlich. Das maximale Volumen wird automatisch mit der Aktivierung des zweiten Gasgenerators freigegeben. Eine dritte Aktivierungsstufe kann für eine weitere Adaptivität zur Innendrucksteuerung (Active Vent) vorgehalten werden. Zusätzlich bietet dieses Konzept eine höhere Flexibilität bei der Anpassung der Gasgeneratorleistung auf das jeweilige Luftsackvolumen. Je nach Ausführung konnte für den automatisierten Fahrmodus eine zusätzliche Luftsacktiefe von 200 – 250 mm generiert werden.

## Bewertung der Insassenbelastungen

Um eine optimale Rückhalteperformance zu erzielen ist es erforderlich, alle Komponenten des Gesamtsystems anzupassen und aufeinander abzustimmen. Im Rahmen dieser Studie sollte aber vorrangig das Potential des tiefen- und volumenadaptiven Airbags bewertet werden. Aus diesem Grund bleiben alle weiteren Komponenten unangetastet. Eine Potentialanalyse für eine Gesamtsystemoptimierung wurde für einen spezifischen Lastfall durchgeführt und ist unter dem Absatz „Weitere Optimierungspotentiale“ beschrieben.

Aus den bereits dargestellten Lastfällen, werden für die Bewertung exemplarisch folgende Konfigurationen herangezogen:

- ECE R94, 64 km/h, 50% Dummy, Fahrer
- ECE R137, 50 km/h, 5% Dummy; Fahrer
- ECE R137, 50 km/h, 5% Dummy; Beifahrer

Für diese drei Konfigurationen werden die Insassenbelastungen in beiden Sitzpositionen, der aktiven Fahrposition und der entspannten Sitzposition für den automatisierten Modus, nachfolgend dargestellt. Für alle Varianten wurden die Belastungswerte in der numerischen Simulation analysiert und optimiert. Anschließend wurden die Ergebnisse in Schlittenversuchen verifiziert.

### *ECE R94, 64 km/h Offset, 50% Dummy, Fahrer*

Für die Bewertung der Insassenbelastungen wurden die Grenzwerte der ECE R94 herangezogen [5]. In diesem Lastfall überschreitet die kumulierte Kopfbeschleunigung  $a_{3ms}$  mit einem konventionellen Airbagsystem den Grenzwert um 12 Prozent in der entspannten Sitzposition. Durch den Einsatz des tiefen- und volumenadaptiven Airbagkonzepts konnten die Belastungswerte im dynamischen Schlittenversuch um 34 Prozent gesenkt werden. Somit konnte ein Belastungsniveau von 74 Prozent des Grenzwertes erzielt werden. Das Kopfverletzungskriterium  $HIC_{36}$  konnte mit dem tiefenadaptiven Airbag von initial 92 Prozent mit dem konventionellen System, auf 56 Prozent reduziert werden. Somit konnte insbesondere im Kopfbereich eine signifikante Verbesserung des Schutzpotentials für Insassen in der entspannten Sitzposition erreicht werden. Die verbleibenden Belastungswerte in den anderen Körperregionen befanden sich alle in einem unkritischen Bereich. In der Sitzposition für den manuellen Fahrbetrieb sind die Belastungswerte im Vergleich von konventionellem und tiefenadaptiven Airbagkonzept weitgehend identisch auf einem unkritischen Niveau.

In diesem Lastfall konnte das Potential eines tiefen- und volumenadaptiven Airbagsystems nachgewiesen werden. Der Abgleich der Versuchsergebnisse mit der Simulationsprognose bestätigt eine gute Korrelation zwischen Versuch und Simulationsmodell für nahezu alle Belastungswerte.

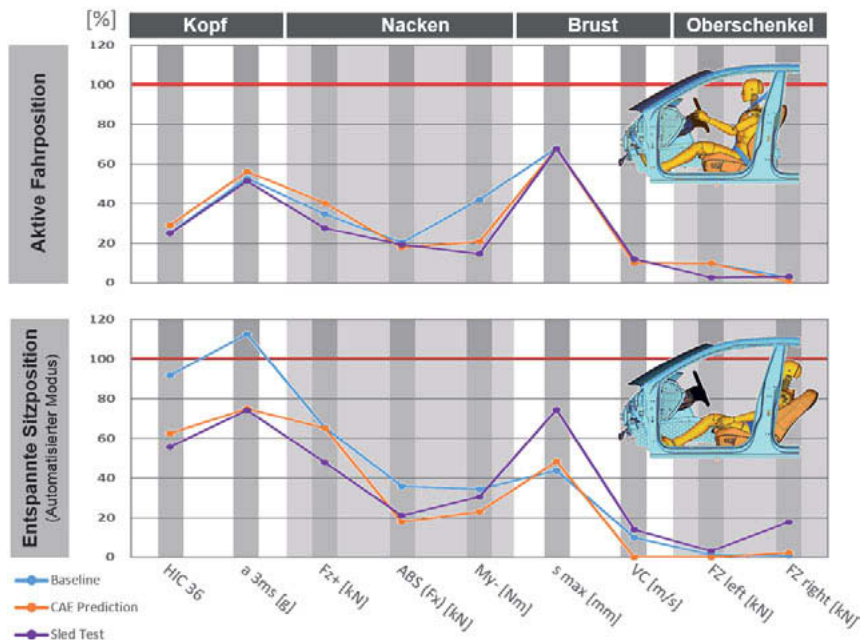


Bild 7: Ergebnisübersicht im Lastfall ECE R94, 64 km/h, 50% Dummy, Fahrer

#### ECE R137, 50 km/h, 5% Dummy, Fahrer

Für die Bewertung der Insassenbelastungen wurden die Grenzwerte der ECE R137 herangezogen [4]. In diesem Lastfall überschreiten beide Kopfbelastungskriterien die Grenzwerte, bei Einsatz eines konventionellen Airbagsystems in der Komfortposition. Die kumulierte Kopfbeschleunigung  $a_{3ms}$  und das Kopfverletzungskriterium  $HIC_{36}$  liegen beide 5 Prozent über dem Limit.

Mit Hilfe des tiefen- und volumenadaptiven Airbagkonzepts konnte der  $HIC_{36}$  um 14 Prozent auf ein Gesamtniveau von 90 Prozent gesenkt werden. Bei der kumulierten Kopfbeschleuni-

gung  $a_{3ms}$  war nur eine Reduktion um 7 Prozent auf ein Gesamtniveau von 98 Prozent möglich. Insgesamt konnten alle Belastungswerte auf ein Niveau unterhalb der Grenzwerte reduziert werden. In der Sitzposition für den manuellen Fahrbetrieb sind die Belastungswerte im Vergleich von konventionellem und tiefenadaptiven Airbagkonzept weitgehend identisch auf einem unkritischen Niveau.

Trotz des positiven Trends konnte das tiefen- und volumenadaptive Airbagkonzept sein Optimierungspotential in diesem Lastfall nur begrenzt darstellen. Der Einsatz als singuläre Modifikation ohne Anpassung der weiteren Rückhaltekomponenten ist insbesondere bei kleinen und leichten Insassen nur bedingt zielführend. Die dargestellte Reduktion des Belastungsniveaus, basiert auf einer früheren Ankopplung des Insassen an die Gesamtfahrzeugverzögerung, durch die zusätzlich bereitgestellte Luftsacktiefe. Somit steht dem Insassen aber auch ein deutlich größerer Vorverlagerungsweg zur Verfügung. Ohne eine Anpassung des Gurtkraftniveaus, sowie einer optimierten Energieabsorption des Airbagsystems, durch aktive Anpassung der Abströmöffnung, kann dieser zusätzliche, zur Verfügung stehende Weg nicht genutzt werden. Dieser Effekt wird insbesondere bei kleinen und leichten Insassen durch den geringen Energieeintrag in das Rückhaltesystem offensichtlich. Bei einem konventionellen Airbagkonzept besteht diese Optimierungsmöglichkeit nicht, da durch die späte Ankopplung kein zusätzlicher Vorverlagerungsweg zur Verfügung steht.

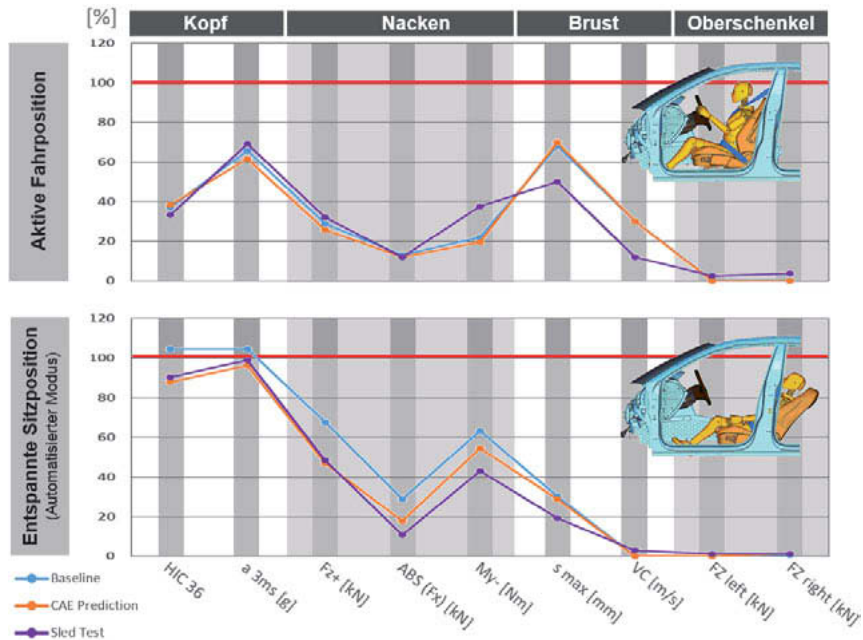


Bild 8: Ergebnisübersicht im Lastfall ECE R137, 50 km/h, 5% Dummy, Fahrer

#### ECE R137, 50 km/h, 5% Dummy, Beifahrer

Wie auch auf der Fahrerseite, wurden für die Bewertung der Insassenbelastungen die Grenzwerte der ECE R137 herangezogen [4]. Vergleichbar mit den beiden vorangegangenen Lastfällen ist auch auf der Beifahrerseite die Kopfbelastung bei einem Unfall als kritisch zu bewerten, wenn sich der Insasse in der Komfortposition, im hinteren Bereich des Sitzverstellfeldes befindet. Die Grenzwerte für das Kopfverletzungskriterium HIC<sub>36</sub> wurden bei Verwendung eines konventionellen Airbagsystems um 8 Prozent überschritten.

Durch den Einsatz des tiefen- und volumenadaptiven Airbagkonzepts konnten der HIC<sub>36</sub> im dynamischen Schlittenversuch um 25 Prozent gesenkt werden. Somit konnte ein Belastungsniveau von 81 Prozent des Grenzwertes erzielt werden. Die kumulierte Kopfbeschleunigung a<sub>3ms</sub> konnte mit dem tiefenadaptiven Airbag von initial 99 Prozent mit dem konventionellen System, auf 84 Prozent reduziert werden. Die verbleibenden Belastungswerte in den



anderen Körperregionen befanden sich alle in einem unkritischen Bereich. Insgesamt konnten alle Belastungswerte auf ein Niveau unterhalb der Grenzwerte reduziert werden.

In der Sitzposition für den manuellen Fahrbetrieb sind die Belastungswerte im Vergleich von konventionellem und tiefenadaptiven Airbagkonzept weitgehend identisch auf einem unkritischen Niveau

Auch in diesem Lastfall konnte das Potential eines tiefen- und volumenadaptiven Airbagsystems nachgewiesen werden. Der Abgleich der Versuchsergebnisse mit der Simulationsprognose bestätigt eine gute Korrelation zwischen Versuch und Simulationsmodell für alle Belastungswerte mit Ausnahme der Brusteindrückung.

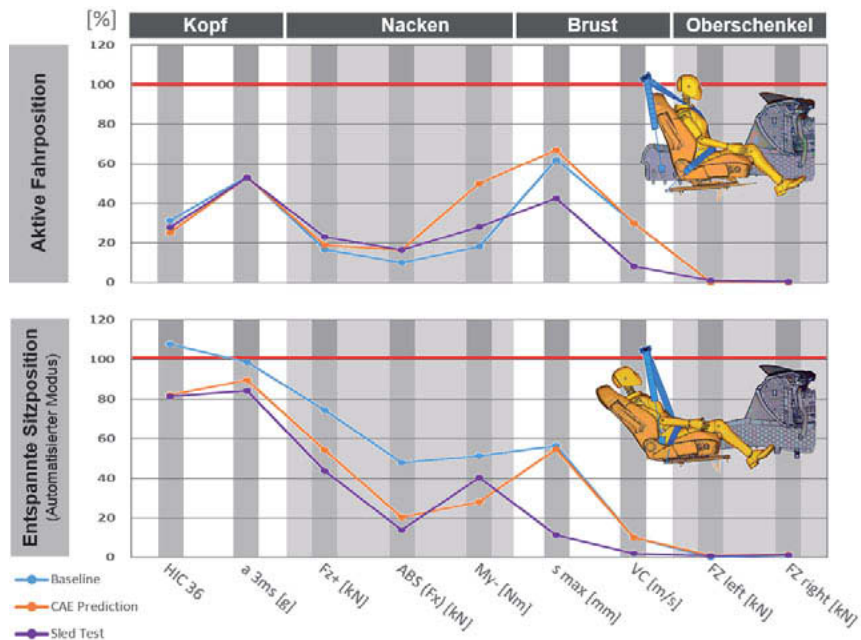


Bild 9: Ergebnisübersicht im Lastfall ECE R137, 50 km/h, 5% Dummy, Beifahrer

### Erweiterte Optimierungspotentiale

In der Konfiguration „ECE R137, 50 km/h, 5% Dummy, Fahrer“ konnten mit Einsatz des tiefen- und volumenadaptiven Airbags die Insassenbelastungen bereits reduziert werden. Die kumulierte Kopfbeschleunigung  $a_{3ms}$  liegt mit 98 Prozent des Grenzwertes jedoch nur geringfügig unterhalb des Limits.

Weitere Optimierungspotentiale bestehen in der Ausnutzung des zur Verfügung stehenden zusätzlichen Vorverlagerungsweges. Hierzu ist eine lastfall- und insassenabhängige Anpassung der Gurtkraft und des Airbaginnendrucks erforderlich um das gesamte Potential des tiefen- und volumenadaptiven Airbags zu nutzen. Mit Hilfe der numerischen Simulation wurden die Effekte auf das Gesamtsystem analysiert. Die Bewertung der erweiterten Optimierungspotentiale durch Implementierung zusätzlicher Technologien erfolgt in folgender Reihenfolge:

- Ausgangsbasis
- + Tiefen- und volumenadaptiver Airbag
- + Schaltbarer Gurt mit 2-stufigem Kraftniveau
- + Adaptive Abströmöffnung zur Anpassung der Energieabsorption

Unter Berücksichtigung der aufgeführten Optimierungsmaßnahmen ist eine Gesamtreduktion des Kopfbelastungskriteriums  $HIC_{36}$  um 47 Prozent möglich. Somit konnte das Belastungsniveau von ursprünglich 105 Prozent des Grenzwertes auf 56 Prozent gesenkt werden. Die kumulierte Kopfbeschleunigung  $a_{3ms}$  konnte insgesamt um 29 Prozent reduziert werden. Das initiale Belastungsniveau von 105 Prozent konnte somit auf 75 Prozent des Grenzwertes herabgesenkt werden.

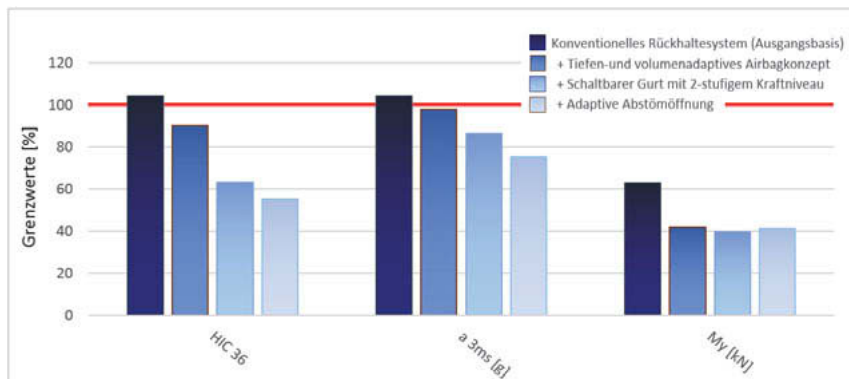


Bild 10: Insassenbelastungen unter Ausnutzung weiterer Optimierungspotentiale

Die aktive Auslösung der adaptiven Abströmöffnung mittels Pyrotechnik über einen separaten Zündkreis ist in dieser Konstellation nicht zwingend erforderlich. Sobald die Tiefenadaptivität aktiviert wurde und das vollständige Airbagvolumen zur Verfügung steht, ist es zielführend, auf Grund des größeren Vorverlagerungsweges auch eine höhere Energieabsorption, durch Öffnen einer zusätzlichen Abströmöffnung zu ermöglichen. Diese kann auch als passive Adaptivität ausgeführt und automatisch mit Bereitstellung der maximalen Luftsacktiefe freigegeben werden. Eine entsprechende Technologie wurde bereits auf Komponentenbasis abgeprüft.

## Schlussbetrachtung

Im Rahmen dieser Studie wurde festgestellt, dass konventionelle Rückhaltesysteme nicht in allen Sitzpositionen, die das automatisierte Fahren zukünftig ermöglicht, eine ausreichende Schutzwirkung bieten. Mit zunehmender Abweichung des Insassen von der Standardposition, steigt das Verletzungsrisiko bei einem Unfall. Insbesondere für kleinere und leichtere Insassen konnten die Zielwerte in der entspannten Sitzposition, mit nach hinten verschobenem Sitz und geneigter Lehne, nicht mehr erreicht werden. Auf Grund der erhöhten Belastungswerte im Kopfbereich ist eine Anpassung des Rückhaltesystems erforderlich.

Um die verschiedenen Sitzpositionen zu adressieren, wurde ein tiefen- und volumenadaptives Fahrer- und Beifahrerairbagkonzept entwickelt, dass den Insassen sowohl in der konventionellen, aktiven Fahrposition als auch in einer entspannten Sitzposition ein optimiertes Rückhaltesystem zur Verfügung zu stellt. Die Belastungswerte für Insassen in der entspann-

ten Sitzposition konnten somit reduziert werden ohne die Rückhaltewirkung in der aktiven Fahrposition zu beeinträchtigen. Bereits ohne zusätzliche Modifikationen an weiteren Komponenten, konnten mit diesem Konzept die gesetzten Zielwerte in allen Lastfällen eingehalten werden.

Durch die frühere Ankopplung des Insassen an die Fahrzeugverzögerung, erfüllt dieses Konzept eine Grundvoraussetzung bei der Auslegung von Rückhaltesystemen. Das vollständige Potential kann aber erst ausgeschöpft werden, wenn der zur Verfügung stehende Vorverlagerungsweg vollständig genutzt wird. Durch die Anpassung des Gesamtsystems mit Hilfe von zusätzlichen Technologien, wie schaltbaren Gurten und adaptiven Abströmöffnungen war eine weitere Optimierung der Rückhalteperformance möglich.

Die in dieser Gemeinschaftsstudie mit der Volkswagen AG erzielten Ergebnisse belegen die Vorteile von tiefen- und volumenadaptiven Frontalairbags bei variierenden Sitzpositionen und bestätigen das Konzept in Verbindung mit zukünftigen automatisierten Fahrzeugen.

## Literatur

- [1] VDI Statusreport, Automatisiertes Fahren, Juli 2018
- [2] SAE Standard J3016, Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, 2016
- [3] Prognos, "Einführung von Automatisierungsfunktionen in der PKW-Flotte", Studie im Auftrag des ADAC, August 2018
- [4] ECE R137, Uniform provisions concerning the approval of passenger cars in the event of a frontal collision with focus on restrain system, July 2016
- [5] ECE R94, Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a frontal collision, July 2016



## **Novel restraint system for highly automated vehicles (HAV) evaluated in frontal impact**

**Tetsuya Matsushita**, Autoliv Japan Ltd., Japan;  
**Anders Jansson**, Autoliv Sverige AB, Sweden;  
**Abhiroop Vishwanatha**, Autoliv India Pvt. Ltd., India

### **Zusammenfassung**

As Es wird erwartet, dass hochautomatisiertes Fahren neue Fahrzeugkonzepte und Sitzpositionen ermöglichen wird, z.B. weiter vom Armaturenräger zurückfahrbare Sitze, die auch während der Fahrt mit großen Lehnenwinkeln benutzt werden können.

Ein neues sitzintegriertes Rückhaltesystem wurde unter anderen für diesen Anwendungsfall entwickelt. Es besteht aus zwei Airbags, die sich aus dem Sitz heraus entfalten und sich um Schultern und Oberkörper des Insassen legen. Vergleichende Untersuchungen dieses neuen Rückhaltesystems mit einem Standardsystem im Frontalaufprall mit dem Thor-Dummy in der zurückgefahrenen Sitzposition wurden in numerischer Simulation durchgeführt.

Anhand der Dummy-Werte zeigt sich zwar generell eine Zunahme des Verletzungspotentials, verursacht sowohl durch Zurückfahren des Sitzes als auch durch den größeren Lehnenwinkel, diese Zunahme fällt jedoch mit dem neuen Rückhaltesystems deutlich geringer aus. Das neue Rückhaltesystem erscheint daher robuster gegenüber zukünftigen Veränderungen der Sitzpositionen.

### **Abstract**

As automated driving further penetrates the market, opportunities continue to arise for new vehicle interior designs, including a wider range of seating positions. Flexible seating will require new restraint systems that are independent of the steering wheel and instrument panel. The aim of this study was to evaluate a novel seat-integrated restraint system which can accommodate a variety of seating positions.

The seat-integrated restraint system was evaluated using a virtual simulation model correlated to physical sled tests. The CAE model included a generic seat, the seat-integrated belt system with a 2 kN shoulder belt load, and the new Dual Shoulder Airbag system (DSA). The DSA was mounted to the seat back on both sides of the seat. For reference, a standard system (3-point 4 kN shoulder belt load and driver airbag) was used. Occupant injury assessment reference values (IARVs) were evaluated, using the AM50\_THOR model as a standard male body,

and compared to IARVs from the new proposed New Car Assessment program in the U.S (US NCAP). The IARVs compared were HIC15, BrIC, Nij and Chest deflection. The load case evaluated is a full rigid-barrier frontal crash with crash pulses representing a mid-size sedan. The occupant protection was evaluated for the standard seating position (23 degrees from vertical) as well as for a reclined position (45 degrees from vertical) in two seat track positions, standard (midway between the foremost and rearmost positions) and rearmost (150mm behind standard, the rearmost position of frontal seat tracks in usual cars today).

The new restraint system resulted in lower IARVs than the reference system in every case. A comparison of the standard and reclined positions revealed that every IARV was increased in the latter for both seat track positions (mid and rearmost).

The new proposed airbag system has the potential to offer equivalent or lower IARVs compared to the reference system in frontal crash mode (forward-facing seat condition).

## Introduction

Over the last decade, highly automated vehicles (HAV) have been a focus of future mobility innovations. The participants—automobile manufacturers, automotive suppliers, IT professionals, mobility-service providers, and governments—are working to develop technology enabling a more flexible seat layout, as there will no longer be a need for someone to drive the vehicle. In fact, as summarized by Filatov et al. (2019) [1], many people have realized that one of the benefits of HAV technology is that the vehicle interior can transform from a cabin just for driving and riding into a living space, where many daily activities like reading, working, and relaxing can be performed. Mercedes introduced the “F015 Luxury in Motion” research vehicle [2], equipped with four rotating seats which allow occupants to select their preferred seat orientation. Volkswagen’s “ID BUZZ electric minivan” [3] also employs the rotated-seats concept. Volvo introduced “Concept 26” [4], which allows the driver’s seat to be repositioned away from the steering wheel and instrument panel when the car is in automated driving mode. Fig. 1 shows some possible seat layouts (seats that are deeply reclined, far from the steering wheel, and rotated). Jorlöv et al. (2017) [5] and Östling et al. (2019) [6] used normal chairs to investigate which seat layout consumers prefer in automated driving mode in static conditions. Consumers’ preference depended on the situation, but they generally preferred seats that could rotate and recline. The ensuing challenge is to make flexible seating as safe as the seating in current vehicles.

Current occupant restraint systems comprising seat belts and airbags are designed to protect passengers in traditional seating positions from either frontal or side impacts. The occupants are moved by the inertia force produced by crash deceleration, and the airbags are located in



line with the frontal or side force (i.e., at the steering wheel, the instrument panel, the side window, and between the seat and the door's inner panel). Seat belts are usually anchored through the upper part of the B-pillar, although for some vehicles the upper anchorage is placed on the top of the seat back.

Given the future possible sitting positions (Fig. 1) and the current airbag layout (Fig. 2), it should be pointed out that the current conventional airbag system will need adjustments. The occupants in the rotated seats have no airbags directly in front, and seatbelts anchored onto the B-pillar cannot be routed to restrain them in their initial position.

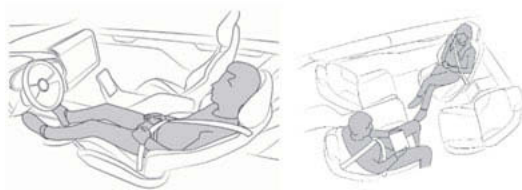


Fig. 1: Examples of future flexible seat layouts

This study evaluates a novel concept with the potential to protect the occupant in any type of crash event, independent of seat position. The upcoming New Car Assessment program in the U.S (US NCAP) serves as a reference for both the loading condition and injury assessment reference values (IARVs). The target was to achieve IARVs equivalent to or below those of the current conventional restraint system in a frontal 56 km/h crash [7].

The New system was evaluated to determine whether it could achieve target IARVs for occupants seated in the potential seat positions of full rigid-barrier frontal crash. The conditions are explained in more detail in the "Evaluation conditions" section.

This study is a continuation of the study described by Matsushita et al. (2019) [8] which compared the two systems with respect to occupant size (AM50\_THOR, AF05\_Hybrid III and AM95\_Hybrid III), occupant posture (Standard and Reclined) in standard seat track position (middle fore-aft), and load case (Full rigid-barrier frontal crash and NHTSA Oblique Impact). The proposed new system ("New system"), with seat-integrated restraints, was evaluated by numerical simulation and compared to the current standard system ("Reference system"). The systems were evaluated for standard and reclined seating positions and standard and rearward seat track positions. The crash dummy model AM50\_THOR was selected for the occupant, providing the parameters of an average male.

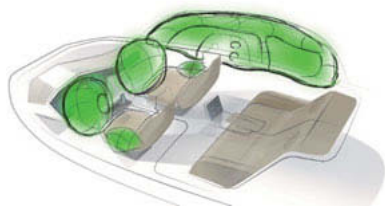


Fig. 2: Diagram of current airbag layout

## Method

Restraint performance was evaluated using the IARVs for HIC15, BrIC, Nij, and Chest deflection, developed for the head, brain, neck, and chest regions, respectively.

HIC15 and Nij have both already been authorized and applied to regulations and assessment programs. The AM50\_THOR applied with updated reference values of  $F_{zc}$ : +4200N (tension), -6400N (compression); Myc, +88.1Nm (flexion), and -117Nm (extension). These values were proposed in the NHTSA US NCAP upgrade protocol's second request for comments (RFC) in 2017 [9]. (The first RFC in 2015 proposed different values, based on those of Nightingale et al. (2009) [10], which were then updated to the second version.) The BrIC criterion is new and still being developed; in this study the one proposed by Takhounts et al. (2013) [11] was used. The AM50\_THOR model has four measuring points that quantify displacement in the x, y and z directions. The maximum of the four resultant peak deflections ( $R_{max}$ ) was applied to quantify Chest deflection.

Since the IARVs for BrIC, Nij, and  $R_{max}$  for THOR are still under discussion, they were used only to compare the two methods—not for the actual injury assessment.

The numerical simulations were performed using LS-DYNA software V971 R7.1.2 (Livermore Software Technology Corporation, Mich., U.S.A.). The conditions are explained below.

## Numerical models

The applied vehicle environment geometry was a generic vehicle interior, representing a mid-size sedan (MY 2010). For occupants, the THOR v1.3 US NCAP model, produced by Humanetics Innovative Solutions, Inc., was used to simulate an average-sized male. The model was positioned according to the seating protocol designated in US NCAP. The seat had a deformable seat pan and rigid seat back; the dimensions were obtained from the same vehicle used for the interior geometry setting. In addition, the knee bolster, steering wheel (SW) column, and toe board were all assigned simple force deflection properties which reflected physical testing data. Each property is shown in Fig. 3.

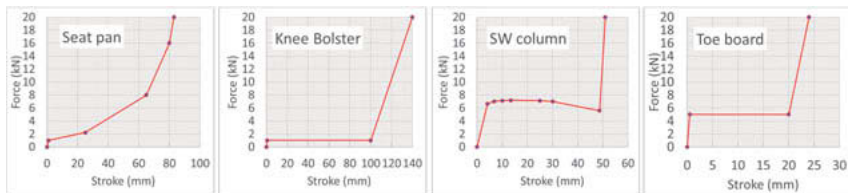


Fig. 3: Vehicle interior force deflection properties

### The Reference restraint system

The Reference system was set up with the vehicle conditions which achieved a 5-star rating in the current US NCAP protocol. The system was developed to meet the current US NCAP requirements with the Hybrid III dummy. It comprises a conventional 3-point seat belt installed in the B-pillar, with a pre-tensioner activated 10 ms after the crash start (TTF 10 ms), a load limiter of 4 kN (at shoulder), a 60-liter driver airbag with a peak pressure of 55 kPa (left in Fig. 5), and a 30mm-diameter vent hole. The airbag, activated at the same time as the pre-tensioner, is supported by a steering wheel with a collapsible steering column which allows the steering wheel to collapse approximately 50 mm.

### Concept description for New system

One of the features of HAV interiors is the more relaxed sitting position, with a deeply reclined seat back, more legroom, and rotating seat arrangement. The relative positioning of an occupant and the interior parts, such as the steering wheel and instrument panel, can be changed according to occupant preference—except for the actual seat. Because the occupants are always seated, the relative position of the seat is always constant.

In principle, the in-crash protection system comprising seat belts and airbags is affected by the relative position of the occupant, as its function is to absorb the kinetic energy from the occupant, who either strikes the airbag or pulls out the seat belt. To keep this relative position between the restraint system and the occupant constant, it is natural that the novel protection system be fitted into the seat, a seat-centric restraint system.

### System composition

The New system, shown to the right in Fig. 4, comprises a 3-point belt with the same function as the Reference system, but installed in the back of the seat (the so-called Belt-in-Seat system: BiS). The BiS also has a pre-tensioner (TTF 10 ms) and a load limiter, but the latter's force is only 2 kN (at shoulder). Further, the New system is equipped with a novel type of

airbag, the dual-shoulder airbag (DSA), which deploys from the seat back and goes around both sides of the occupant's shoulders; see Fig. 5. Each DSA has a volume of 45 liters and a peak pressure of 50 kPa with no vent holes. The DSAs are triggered at the same time as the BiS pre-tensioner. Each DSA is supported by a virtual vertical reaction plane (VRP); their sizes and locations are indicated in Fig. 5. These VRPs, representing fabric membranes to be deployed with DSAs in real vehicles, were introduced to simplify simulations. The actual method to retain the DSAs has not been developed yet; although the door inner panel can be used on one side, some new device or structure will be required for the other side. Hence VRPs are used at this time. The distance between the two VRPs (670mm) is twice the distance from the dummy's center to the door's inner panel. The VRP is rigid and the friction coefficient with the DSA is zero. The DSAs are connected to the seat pan through an Engage belt (EnB); see Fig. 4.

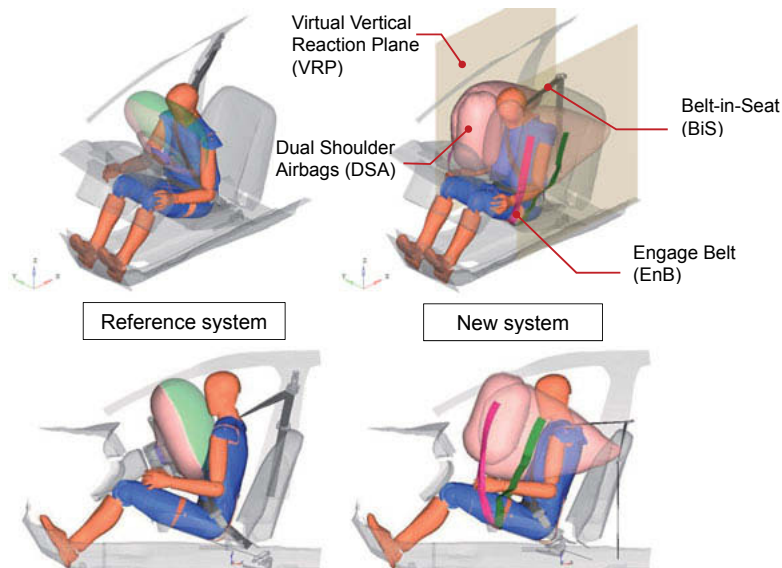


Fig. 4: Restraint system comparison

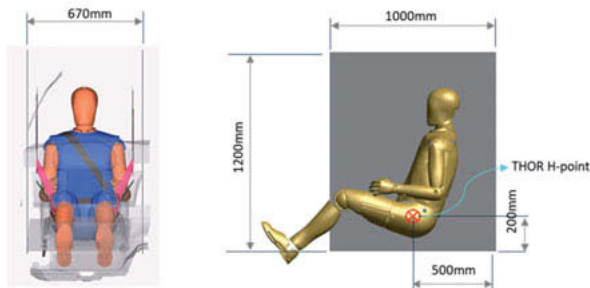


Fig. 5: Virtual vertical reaction plane (VRP) setting

### How it works

In a frontal crash, the BiS enables the seat belt to fit an occupant with the same relative positioning regardless of seat arrangement, and the DSA provides more distributed loading than the Reference system across the chest and shoulders. Distributed loading has been shown to reduce injury risk [12][13]. Each DSA also has a sub-chamber located at the front, which restrains the head and neck less stiffly than the main chamber. This is an important design feature, since the mass of the head is lower than the mass of the chest. The DSA would play a main role in stopping the upper body in a crash. Therefore we theorized that the New system would be more protective in more severe crashes.

The DSA can adapt to differences in occupant size. It is retained by the VRP, which is always in the same location relative to the seat, independent of occupant size. The DSA inflates in the gap between the occupant and the VRP, so the gap changes depending on the occupant size: the bigger the occupant, the smaller the gap; the smaller the occupant, the bigger the gap. If the inflator output level is the same, then with a bigger occupant (and a smaller gap) the DSA's inner pressure would be higher when it makes contact, resulting in a stronger restraint force—and the opposite would hold for a smaller occupant. Hence, the DSA could achieve occupant adaptivity with a single inflator setting and airbag design. We have named this quality the “self-adaptive function”. Fig. 6 illustrates the concept.

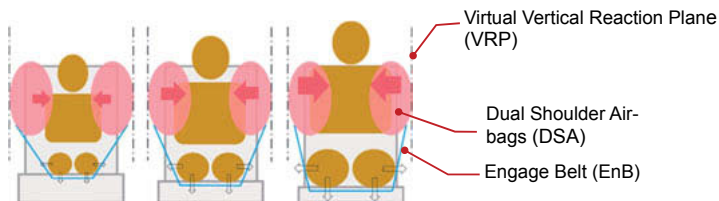


Fig. 6: Self-adaptive function to occupant size

### Evaluation condition

Table 1 shows the test matrix of eight (2x2x2) simulations comparing the New system to the Reference system. The parameters are System type (Reference/New), Seat track position (Standard/Rearmost) and Occupant posture (Standard/Reclined).

Table 1: Simulated configurations

ID#	System	Seat track position	Occupant Posture	Load case	Occupant Size
1	Reference	Standard	Standard	FRB	AM50_THOR
2			Reclined		
3		Rearmost	Standard		
4			Reclined		
5	New	Standard	Standard		
6			Reclined		
7		Rearmost	Standard		
8			Reclined		

FRB: Full-Rigid-Barrier frontal crash

### Parameters

Significant factors that differ between the systems are airbag type, seat belt load limiter level, and the fact that no steering wheel was used when evaluating the New system. The settings of the two systems are described in Table 2. Detailed information about the properties of the vehicle interior is given in the "Numerical model" section.

Table 2: Parameter descriptions for New and Reference systems

		Reference system	New system
Vehicle interior	Knee bolster	Common (deformable)	
	Toe board	Common (slightly deformable)	
	Seat back	Common (rigid, no rotation)	
	Seat pan	Common (deformable)	
	Steering wheel	Yes	N/A
	Steering column	Yes (deformable)	N/A
Restraint devices	Driver airbag	Yes	N/A
	Seat belt	3-point thru B-pillar	3-point belt (BiS)
	Load limiter at shoulder	4 kN	2 kN
	Shoulder airbags	N/A	Yes
	Engage Belt (EnB)	N/A	Yes

**Parameter: Occupant posture**

The Occupant posture can be either Standard (23 degrees from vertical) or Reclined (45 degrees from vertical); see Fig. 7.

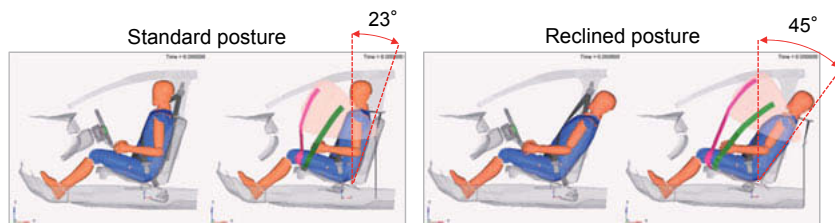


Fig. 7: Parameter description: Occupant posture

### Parameter: Seat track position

The Seat track position can be either Standard (middle fore-aft position), or Rearmost (moved back 150mm from Standard); see Fig. 8. The Rearmost position is expected to be a user preference in HAVs because of the extra legroom it provides.

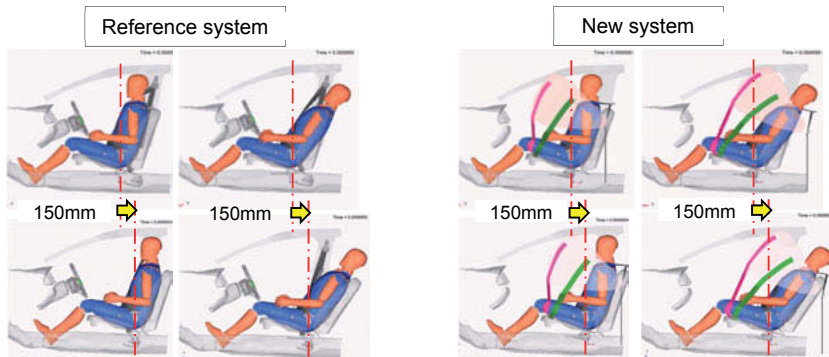


Fig. 8: Parameter description: Seat track position

### Base condition: Load case

The load case applied in this study is the same full-rigid barrier frontal crash applied in the US NCAP test protocol [14], illustrated in Fig. 9. In a full-rigid barrier frontal crash the vehicle impacts a full-width rigid barrier directly in front at 56km/h. The impact pulse of the load case simulates a mid-size sedan.

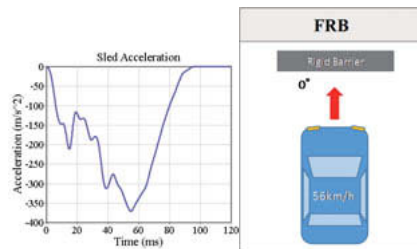


Fig. 9: FRB description

### Base condition: Occupant size

The AM50\_THOR model was used. It is a newly developed dummy with higher biofidelic properties than the Hybrid III series.



## Results

### Comparison based on Occupant posture

For configurations 1 (System: Reference; Seat track position: Standard; Occupant Posture: Standard), 2 (System: Reference; Seat track position: Standard; Occupant Posture: Reclined), 5 (System: New; Seat track position: Standard; Occupant Posture: Standard), and 6 (System: New; Seat track position: Standard; Occupant Posture: Reclined) (see Table 1), the two types of posture (Standard and Reclined) were compared in Standard seat track position (see Fig. 10).

For configurations 3 (System: Reference; Seat track position: Rearmost; Occupant Posture: Standard), 4 (System: Reference; Seat track position: Rearmost; Occupant Posture: Reclined), 7 (System: New; Seat track position: Rearmost; Occupant Posture: Standard), and 8 (System: New; Seat track position: Rearmost; Occupant Posture: Reclined) (see Table 1), the same comparisons were made for the Rearmost seat track position (see Fig. 11).

The Reclined posture produced higher IARVs than the Standard posture in every case, except for Rmax in the Reference system with the Standard seat track position (rightmost graph in Fig. 10). The New system resulted in lower IARVs for the head and neck regions than the Reference system in every case, regardless of seat track position

For Rmax, the New system showed lower IARVs and a narrower range of values between postures. However, it must be stated that the AM50\_THOR model is not validated for the reclined sitting posture, so the values should be interpreted with caution.

The head region deceleration started later with the Reference system (i.e., the free-flight motion continued longer), because the relative distance between the head and the driver airbag in the Reclined posture is much greater than in the Standard posture. The New system creates equivalent relative distances between the head and the DSA in both Standard and Reclined postures and due to that the HIC15 performance gap is much smaller than that of the Reference system.

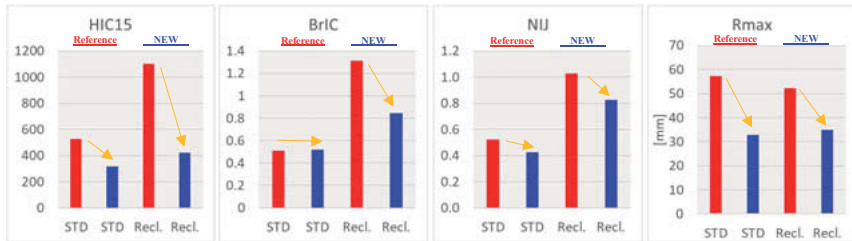


Fig. 10: IARV comparison based on Occupant posture (Standard seat track position)  
(Red: Reference system; Blue: New system)

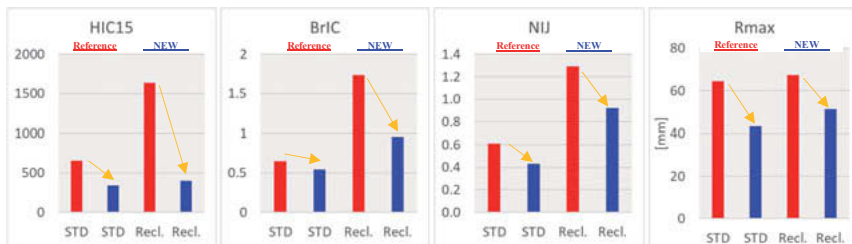


Fig. 11: IARV comparison based on Occupant posture (Rearmost seat track position)  
(Red: Reference system; Blue: New system)

### Comparison based on Seat track position

For configurations 1 (System: Reference; Seat track position: Standard; Occupant Posture: Standard), 3 (System: Reference; Seat track position: Rearmost; Occupant Posture: Standard), 5 (System: New; Seat track position: Standard; Occupant Posture: Standard), and 7 (System: New; Seat track position: Rearmost; Occupant Posture: Standard) (see Table 1), the two seat track positions (Standard and Rearmost) were compared in Standard posture (see Fig. 12).

For configurations 2 (System: Reference; Seat track position: Standard; Occupant Posture: Reclined), 4 (System: Reference; Seat track position: Rearmost; Occupant Posture: Reclined), 6 (System: New; Seat track position: Standard; Occupant Posture: Reclined), and 8 (System: New; Seat track position: Rearmost; Occupant Posture: Reclined) (see Table 1), the same comparisons were made for the Reclined posture (see Fig. 13).

The New system produced lower IARVs than the Reference system in all body regions in both Standard and Rearmost seat track positions, regardless of occupant posture (Standard and Reclined).

Both systems produced higher head and neck region IARV results at the Rearmost seat track position than the Standard one, but the increases with the New system are much smaller than those with the Reference system. The reason is the same as previously described: the different relative distance between airbag and occupant head means that the New system can catch the head earlier, to reduce the deceleration.

However, for the chest region, the deflection change is nearly the same; the effect of early coupling at the chest by the New system seems to be limited.

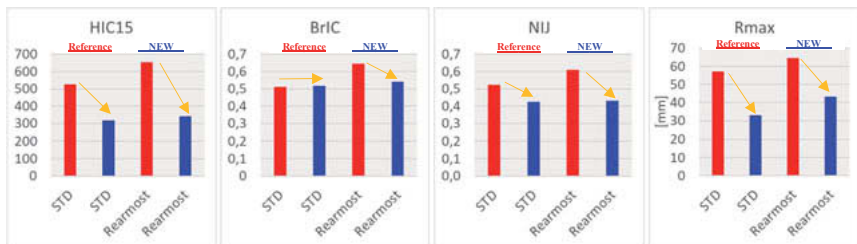


Fig. 12: IARV comparison based on Seat track position (Standard posture)  
(Red: Reference system; Blue: New system)

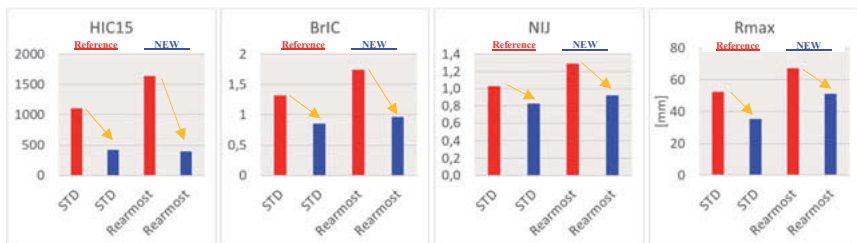


Fig. 13: IARV comparison based on Seat track position (Reclined posture)  
(Red: Reference system; Blue: New system)

## Discussion

The New system had lower IARVs than the Reference system in almost all cases.

We would like to make the following two points about the evaluation of the New system.

First, the results show that chest loading is more broadly distributed in the New system (Fig. 14), providing a great advantage over the Reference system. The DSA restrains the chest and shoulders, so the load on the chest is less localized. As a consequence, the seat belt load-limiting force can be reduced (it was 2 kN in this study), contributing to lower Chest deflection values in every case. The main contributor to the restraint is not the seat belt; it is the DSA.

The 2016 findings of Knobloch et al. [15], who used an accident database to make comparisons between several restraint systems, indicate that a restraint system designed to provide distributed loading reduces rib fracture risk. Thus this New system, by distributing the loading across the chest more widely, could contribute to reducing risk in real-world accidents.

Second, in the reclined posture, the New system can restrain the occupant earlier than the Reference system does because the DSA restrains the chest earlier. Thus the potential kinetic energy of the upper body is reduced before the head contacts the airbag, reducing the velocity of the head when it contacts the airbag and the concomitant head injury risk.



Fig. 14: Chest deflection results in Standard seat track position (Left: Reference system; Right: New system)

## Limitations

This study shows the potential of the New system. The system was, however, only evaluated by numerical simulations of mechanical crash dummies and not verified by mechanical tests. The DSA needs to be validated with physical material prior to further development. It should also be validated using more complex human body models.

The only seat condition evaluated was forward-facing; future seat layouts should also be investigated, through simulations and mechanical testing.

The New system uses a unique restraint concept which deploys from both sides of an occupant instead of from the front, thereby providing more distributed loading (including the shoulders). The existing crash dummy and its model in this study have been developed and verified with the conventional restraint system and airbag, both of which restrain the chest from the front. As pointed out by Shaw et al. (2009) [16], rib cage deformation (as commonly defined by relative uniaxial displacement toward the spine) is insufficient to characterize the observed multi-axial deformation patterns.

In addition, it is possible that early restraint, even in the reclined posture, increases the axial spine force and leads to spine compression. However, we did not measure the spine force, so we cannot evaluate this possibility. Further, because spine flexibility greatly affects the load

level, even the state-of-the-art dummy THOR may not be the proper tool since it has not yet been evaluated in terms of spine force.

## Conclusion

The New system was confirmed to have the potential for equivalent or lower IARVs compared to the Reference system in the Full-Rigid-Barrier load case and forward-facing seat condition. The reclined posture produces higher IARVs than the Standard posture, and the Rearmost seat track position produces higher IARVs than the Standard one. However, thanks to its earlier restraint, the seat-centric system produced much smaller increases than standard system. In other words, the New system appears to have a higher potential for more robust performance in future seating conditions than the current Reference system.

## References

- [1] Filatov, et al. "Effects of Innovation in Automated Vehicles on Occupant Compartment Designs, Evaluation, and Safety: A Review of Public Marketing, Literature, and Standards" presented at WCX SAE World Congress Experience, SAE International, issn: 0148-7191, 2019
- [2] The Mercedes-Benz F 015 Luxury in Motion. - Mercedes-Benz, <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/innovation/research-vehicle-f-015-luxury-in-motion/>, Oct. 2018.
- [3] Volkswagen I.D. Buzz EV Concept Photos and Info | News | Car and Driver, <https://www.caranddriver.com/news/volkswagen-id-buzz-ev-concept-photos-and-info-news>, Oct. 2018.
- [4] Volvo - Concept 26, <https://www.futureofdriving.com/concept26.html>, Oct. 2018.
- [5] Jorlöv S., Bohman K., and Larsson A., 2017. "Seating Positions and Activities in Highly Automated Cars—A Qualitative Study of Future Automated Driving Scenarios." In Proceedings of IRCOBI conference. Antwerp, Belgium
- [6] Östling M., and Larsson A., 2019. "Occupant activities and sitting positions in automated vehicles in China and Sweden." "Proceedings of 26th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Eindhoven, Netherlands.
- [7] National Highway Traffic Safety Administration. 2012. "Laboratory Test Procedure For New Car Assessment Program Frontal Impact Testing.

- [8] Matsushita T., Sunnevång C., and Vishwanatha A, 2019. "Evaluation of the Protective Performance of a Novel Restraint System for Highly Automated Vehicles (HAV)." The 26th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Eindhoven, Netherlands.
- [9] National Highway Traffic Safety Administration (2017) New Car Assessment Program; Request for comments; [Docket No. NHTSA-2015-0119].
- [10] Nightingale R., et al. "THOR Head and Neck IARVs," SAE THOR Evaluation Task Group, 2009
- [11] Tackhounts E., et al. "Development of Brain Injury Criteria (BrIC)" Stapp Car Crash Journal, vol. 57 (November 2013), pp. 243-266
- [12] Forman J., et al. "Biomechanical Considerations for The Optimization of an Advanced Restraint System: Assessing The Benefit of a Second Shoulder Belt" IRCOBI Conference - Prague (Czech Republic) - September 2005
- [13] Bostrom O., et al. "Mechanism of Reducing Thoracic Deflections and Rib Strains Using Supplemental Shoulder Belts During Frontal Impacts" The 23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) Seoul, Republic of Korea, May 27-30, 2013.
- [14] National Highway Traffic Safety Administration (2015) New Car Assessment Program; Request for comments; Docket No. NHTSA-2015-0119.
- [15] Knobloch K., et al. "Sternal Fractures Occur Most Often in Old Cars to Seat-Belted Drivers Without Any Airbag Often With Concomitant Spinal Injuries: Clinical Findings and Technical Collision Variables Among 42,055 Crash Victims", The Annals of Thoracic Surgery, 82(2): 444-450
- [16] Shaw G., et al. "Impact Response of Restrained PMHS in Frontal Sled Tests: Skeletal Deformation Patterns Under Seat Belt Loading" Stapp Car Crash Journal, vol. 53 (November 2009), pp.1-48

## Schwerpunkte der Sicherheitsentwicklung des neuen Volkswagen ID.3

### Priorities of Safety Development of the New Volkswagen ID.3

Dipl.-Ing. **S. Hagen**, Dr.-Ing. **C. Zorn**, Dipl.-Ing. **M. Biewendt**,  
Dipl.-Ing. **A. Gresens**, Dipl.-Ing. **A. Gaertner**, Dipl.-Ing. **D. Navarro**,  
Volkswagen AG, Wolfsburg

#### Kurzfassung

Der Volkswagen ID.3 ist das erste Fahrzeug einer neuen Elektrofahrzeugengeneration des Volkswagen Konzerns. Der ID.3 basiert auf dem Modularen E-Antriebs-Baukasten (MEB). Die kompromisslose Ausrichtung des MEB auf den E-Antrieb ermöglicht die Unterbringung einer großen Hochvolt-Batterie (HV-Batterie) für eine hohe alltagstaugliche Reichweite. Eine große Herausforderung bei der Sicherheitsentwicklung des Fahrzeugs war der Schutz der HV-Batterie bei Unfällen.

Der ID.3 setzt als innovatives Fahrzeug auch neue Maßstäbe beim passiven Insassenschutz. Für den ID.3 wurde ein neuartiger Centerairbag entwickelt, der während eines Unfalls einen möglichen Kontakt zwischen Fahrer und Beifahrer verhindert.

Der Vortrag geht auf die wesentlichen Merkmale der Fahrzeugstruktur und die Leistungsfähigkeit des Centerairbags in Fahrzeugcrashes ein.

#### Abstract

The Volkswagen ID.3 is the first vehicle of a new generation of electric vehicles from the Volkswagen Group. The ID.3 is based on the modular electric drive matrix (MEB). Focusing the MEB uncompromisingly on electric drives made it possible to accommodate a large highvoltage (HV) battery pack, which provides a long range suitable for everyday use. The protection of the HV battery pack during a crash has been a significant challenge during the vehicle's safety development.

Being an innovative vehicle, the ID.3 sets also new standards for passive occupant protection. A novel center airbag was developed for the ID.3 that prevents a possible contact between driver and front passenger during a crash.

The presentation covers the key features of the vehicle structure and the system's performance of the center airbag in vehicle crashes.

## 1. Einleitung

Die Folgen des Klimawandels rücken weltweit immer stärker in den gesellschaftlichen Fokus. Bei der notwendigen Dekarbonisierung des Straßenverkehrs spielt der Umstieg auf CO<sub>2</sub> neutrale Antriebstechnologien eine entscheidende Rolle. Der Volkswagenkonzern setzt hierbei konsequent auf das batteriebetriebene Elektrofahrzeug. Es ist allerdings festzustellen, dass es trotz großer technologischer Fortschritte bei den Kunden derzeit Vorbehalte gibt, die gegen die Anschaffung eines Elektrofahrzeuges sprechen. Die Sorgen vor zu geringer Reichweite, unzureichender Ladeinfrastruktur, geringer Lebensdauer der Batterie und zu hohen Anschaffungskosten sind hierbei am weitesten verbreitet. Damit der Umstieg auf die E-Mobilität gelingen kann müssen die Kunden im Volumensegment durch attraktive Produkte angesprochen werden. Als erstem Vertreter der neuen Elektrofahrzeugengeneration auf Basis des MEB kommt dem ID.3 hierbei eine besondere Bedeutung zu. In dem Fahrzeug wird das erste Mal der Technologiestand sichtbar, den sich Volkswagen in den vergangenen Jahren mit dem MEB erarbeitet hat. Ein wichtiger Punkt für die Akzeptanz dieses neuartigen Fahrzeuges bei den Kunden ist ein höchstmögliches Maß an Sicherheit. Dabei spielen die Anforderungen der Verbraucherschutztests, in Europa die des Euro NCAP, eine wichtige Rolle. Der ID.3 wurde auf 5 Sterne im Euro NCAP nach den Bewertungskriterien für 2020 entwickelt. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Entwicklung eines modernen Elektrofahrzeuges ist der Schutz der HV-Batterie bei Unfällen durch robuste Strukturen.

## 2. Der modulare E-Antriebs-Baukasten

Volkswagen entwickelt bereits seit 2016 einen kompromisslos auf Elektrofahrzeuge zugeschnittenen Baukasten, den Modularen E-Antriebs-Baukasten (MEB). Die Vision des MEB ist das massentaugliche Elektrofahrzeug. Bis 2025 sollen mehr als 25 Modelle in hoher Stückzahl weltweit produziert werden. Der Baukasten muss deshalb in hohem Maße skalierbar sein, um die Spreizung unterschiedlicher Fahrzeuggewichte, Radstände und Reichweiten abdecken zu können. Zentrales Merkmal des MEB ist die flache HV-Batterie, die unter dem ebenen Fahrzeugboden angeordnet ist. Die Zellmodule und deren Anordnung sind standardisiert und ermöglichen die wirtschaftlich notwendige Vereinheitlichung der Breite der Batteriekiste und deren Schnittstelle zum Fahrzeug. Die Staffelung der



Reichweite wird über unterschiedliche Längen der Batteriekiste und die Anzahl der Zellmodule realisiert (Bild 1).

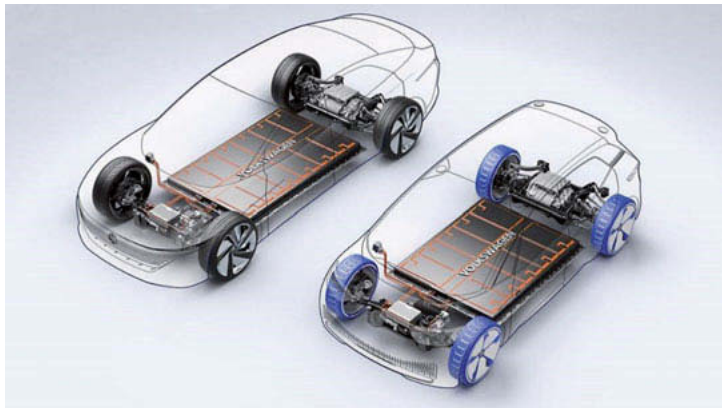


Bild 1: Anordnung der HV-Batterie in MEB Fahrzeugen

### 3. Struktur

Elektrofahrzeuge des Volkswagenkonzerns sollen den Kunden die gleiche Sicherheit bieten wie konventionelle Fahrzeuge. Aus diesem Anspruch heraus bestehen erhöhte Anforderungen an den Schutz der HV-Batterie und der Hochvoltkomponenten bei Unfällen.

Bei Front- und Heckcrashes können Hochvoltkomponenten wie Klimakompressor, Ladegeräte und HV Leitungen getroffen und beschädigt werden. Um Kurzschlüsse und Fahrzeugbrände zu verhindern muss per Crashesensierung aktiv eine Trennung der HV-Batterie vom Hochvoltbordnetz erfolgen, wenn aufgrund der Crasheschwere kritische Beschädigungen der Komponenten zu erwarten sind. Die HV-Batterie selbst ist durch die vergleichsweise großen zur Verfügung stehenden Deformationswege in Vorder- und Hinterwagen gut geschützt

(Bild 2).

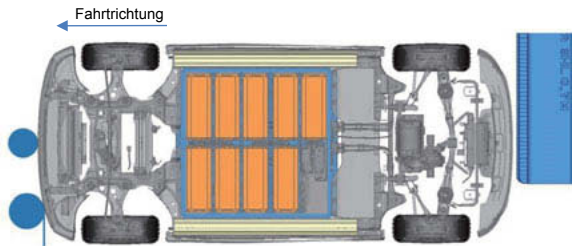


Bild 2: Auslegungslastfälle Batterieschutz Front- und Heckcrash

Gänzlich anders ist die Situation beim seitlichen Pfahlaufprall. Hier steht im Bereich des Schwellers zugunsten einer großen Batteriekapazität nur sehr wenig Deformationsweg zur Verfügung. Der Schutz der HV-Batterie kann nur durch eine umgebende Crashstruktur gewährleistet werden, die einerseits ein definiertes, hohes Kraftniveau zum Energieverzehr aufweist, den Deformationsweg aber andererseits möglichst wenig durch Verblockung einschränkt. Als Auslegungslastfall wurde der Pfahlaufprall nach UN-R 135 herangezogen. Hier sind die Kalkulation des Crashgewichtes und die Aufprallgeschwindigkeit beschrieben. Wegen des Anspruchs an den vollständigen Schutz der HV-Batterie werden Pfahltrefferlagen entlang der gesamten Länge des Batteriesystems betrachtet (Bild 3). Auslegungsziel ist es, eine Deformation der Zellmodule in Folge eines Unfalls zu verhindern.

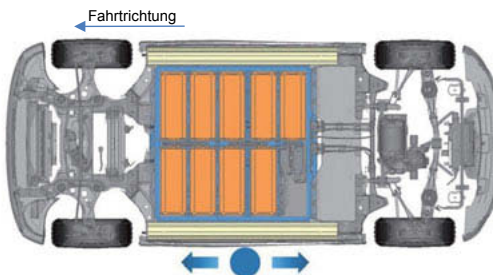


Bild 3: Auslegungslastfälle Batterieschutz Seitencrash

Die Zellmodule sind in zwei Reihen im Batteriegehäuse angeordnet mit der Längsachse quer zur Fahrtrichtung. Seitlich erstrecken sich die Zellmodule fast bis an die Innenseite des Schwellers. Mit dem Auslegungsziel die Zellmodule deformationsfrei zu halten wird der Schweller zum primären Deformationselement. Für eine definierte Deformationszone außerhalb der HV-Batterie muss sich der Schweller im Crash am Batteriesystem abstützen

können. Zur Aussteifung des Batteriegehäuses sind deshalb zwischen den einzelnen Zellmodulen massive Querlastpfade angeordnet die mit dem umlaufenden Batterierahmen verbunden sind. Die gesamte HV-Batterie wird über den Batterierahmen mit den Schwellern verschraubt. Als zusätzliche Queraussteifung sind karosserie-seitig die Sitzquerträger aus höchstfesten Material und als durchgehende Bauteile ausgeführt (Bild 4).

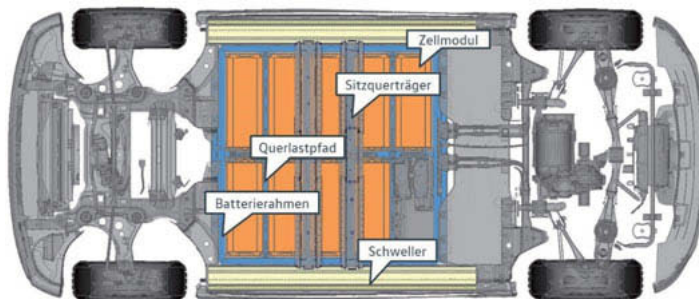


Bild 4: Strukturelemente zum Schutz der Zellmodule bei Seitencrash

Besondere Bedeutung kommt der Auslegung des Schwellers als Deformationselement zu. Das Schwellerprofil wird durch die beiden Halbschalen des inneren und äußeren Schwellers gebildet. Im Schweller ist über die gesamte Länge ein Aluminium Strangpressprofil angeordnet. Die Gestaltung dieses Profils ist maßgeblich für die zugeordnete Crashfunktion mit folgenden Auslegungsprämissen. Um die Crashenergie auf begrenztem Deformationsweg zu verzehren, ist ein sehr hohes Kraftniveau der Schwellerstruktur notwendig, welches jedoch das Tragvermögen des Batteriesystems nicht übersteigen darf. Dafür ist es wichtig, dass der zur Verfügung stehende Deformationsweg möglichst optimal ausgenutzt wird. Dazu muss der Widerstand des Schwellers gegen Eindringen des Pfahls schon auf den ersten Millimetern steil ansteigen und sich die deformierte Struktur bei maximaler Eindringung auf ein möglichst geringes Blockmaß komprimieren lassen (Bild 5).

Die Auslegung der Schwellerstruktur und die Abstimmung der Kraftniveaus zwischen Schweller und Batteriesystem kann nur mit Hilfe der Crashsimulation geleistet werden. Neben der großen Herausforderung durch den geringen Deformationsweg lag hier aufgrund der Größe der Schwellerbauteile und des notwendigen hohen Materialeinsatzes ein enormes Gewichts- und Kostenpotenzial. Dementsprechend wurde ein hoher Aufwand in die Optimierung investiert.

In einem ersten Schritt wurde die Topologie des Aluminiumprofils mit Hilfe eines numerischen, Graphen und Heuristik basierten Algorithmus hinsichtlich mehrerer kritischer Lastfälle optimiert und so festgelegt, dass innerhalb des gegebenen Bauraums die grundsätzliche Kinematik der Profilwände, der Verlauf des Kraftniveaus und das verbleibende Blockmaß die Anforderungen erfüllt. Die resultierende Topologie wurde anschließend unter Aus-

nutzung eines klassischen Wandstärkenoptimierers einer Feinabstimmung unterzogen. Eine der Herausforderungen bei der numerischen Optimierung stellen die herstellungsbedingten Anforderungen an Wanddickenverhältnisse, Topologie der Knoten und Kammern, Abkühlbarkeit, usw. dar. Diese wurden gemeinsam mit dem Lieferanten identifiziert und als Nebenbedingungen in der Optimierung berücksichtigt.



Bild 5: Schnittdarstellung durch den undeformierten (links) und deformierten Schweller (rechts)

Wegen des neuartigen Strukturkonzeptes konnte nicht auf die Erfahrung aus Vorgängerprojekten zurückgegriffen werden. Um bereits lange vor den ersten Versuchen mit Prototypen Entwicklungsrisiken auszuschließen wurden statische und dynamische Komponentenversuche durchgeführt. Es wurden Druckversuche mit dem Aluminium Strangpressprofil und mit ganzen Schwellerabschnitten durchgeführt. Die Belastungsgrenze der Batterie-kiste wurde in Fallturmversuchen ermittelt (Bild 6). Diese Komponentenversuche sind hervorragend zur Bestätigung der Modellbildung geeignet und tragen zur Prognosegüte der Gesamtfahrzeugsimulation bei.

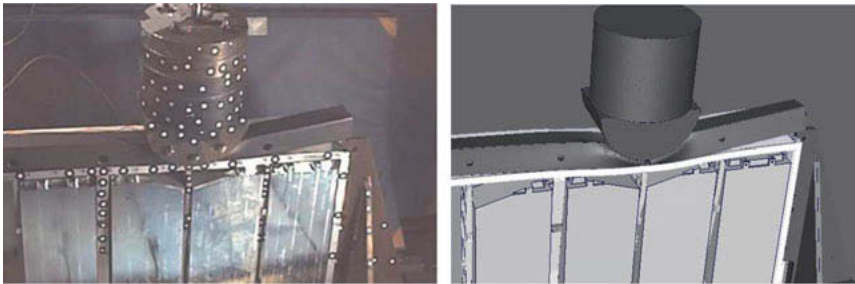


Bild 6: Fallturmversuch auf die Batteriekiste – Vergleich von Versuch (links) und Simulation (rechts)

Die hohe Leistungsfähigkeit des Strukturkonzeptes konnte in sämtlichen Crashversuchen bestätigt werden. Dank der robusten Plattform sind die Verformungen des ID.3 bei einem Crash verglichen mit einem konventionellen Fahrzeug deutlich geringer.



Bild 7: Fahrzeugdeformation eines ID.3 nach einem seitlichen Pfahlaufprall nach [2]

#### 4. Insassenschutz

Das bereits hohe Schutzpotential bei Unfällen kann weiter gesteigert werden, indem die Betrachtung auf zusätzliche anspruchsvolle Szenarien ausgedehnt wird. Im Seitencrash werden Insassen auf der stoßabgewandten Fahrzeugseite, der sogenannten far side, betrachtet (Bild 8). Der Insassenschutz kann hier durch die Einführung von Interaktionschutzmaßnahmen verbessert werden, die einen harten Kontakt zwischen Fahrer und Beifahrer verhindern. Als weltweit erste Verbraucherschutzorganisation berücksichtigt Euro NCAP ab 2020 den far side Unfall bei der Bewertung des Insassenschutzes [1].



Bild 8: Insassenbewegung von Fahrer und Beifahrer bei einem far side Unfall

Als Schutzmaßnahme bei far side Unfällen wurde für den ID.3 ein neuartiger Centerairbag entwickelt, der auch zur umfangreichen serienmäßigen Sicherheitsausstattung gehört. Der Centerairbag ist in die Lehne des Fahrersitzes oberhalb der Mittelkonsole integriert und entfaltet sich bei Seiten- und Überschlagunfällen zwischen den beiden vorderen Sitzplätzen. Eine große Herausforderung bei der Konstruktion des Centerairbags war die optimale Nutzung des verfügbaren Bauraumes in der Sitzlehne. Der Bauraum ergibt sich durch den Strak des Sitzpolsters und der Kontur der Lehnenstruktur. Aus Qualitätsgründen darf sich der Centerairbag nicht auf der Sitzoberfläche abzeichnen. Deswegen ist der Airbag im Bereich des Gasgenerators von einem zusätzlichen Kunststoff Hardcover umschlossen. Aufgrund der Luftsackgröße wird das Kopfblech der Sitzlehne als zusätzliche Anbindungsfläche genutzt, um den gefalteten Luftsack unterbringen zu können (Bild 9). Das Bauteil ist über den Halter des Gasgenerators, einen Kunststoffclip und ein Fangband mit der Lehnenstruktur verbunden.

Das konzeptbedingt größere Platzangebot im Innenraum eines Elektrofahrzeuges soll gezielt betont werden, um eine sogenannte „Open Space“ Anmutung entstehen zu lassen. Die Mittelkonsole wurde deshalb sehr flach ausgeführt und die Armauflage ist an der Sitzlehne befestigt. Die Gewährleistung der Funktion des Centerairbags im Zusammenspiel mit der Armauflage an der Sitzlehne war eine große Herausforderung.



Bild 9: Centerairbag am Sitz

Der Centerairbags soll zwei nebeneinander sitzende Insassen bei Seitencrashes vor einem harten Zusammenprall schützen. Betrachtet man ein Interaktionsereignis mit Centerairbag am Beispiel eines seitlichen Pfahlaufpralls lässt sich dieser in 4 Phasen unterteilen.

- Phase 1: Beide Insassen bewegen sich in Richtung Pfahl. Der near side Insasse trifft auf den aufgeblasenen Kopf- und Seitenairbag. Ein Teil der Bewegungsenergie des near side Insassen wird dissipiert.
- Phase 2: Der near side Insasse geht in den Rebound über. Beide Insassen bewegen sich aufeinander zu. Der unbelastete Centerairbag ist zu diesem Zeitpunkt bereits vollständig befüllt und positioniert.
- Phase 3: Die beiden Oberkörper bekommen Kontakt zum Centerairbag. Dadurch erfährt der Centerairbag eine zusätzliche Stabilisierung seiner Lage im Raum. Der Kopfschutzbereich befindet sich nun optimal zwischen den Köpfen der beiden Insassenköpfen.
- Phase 4: Die beiden Köpfe treffen auf den Luftsack. Der Centerairbag verhindert einen harten Kontakt.

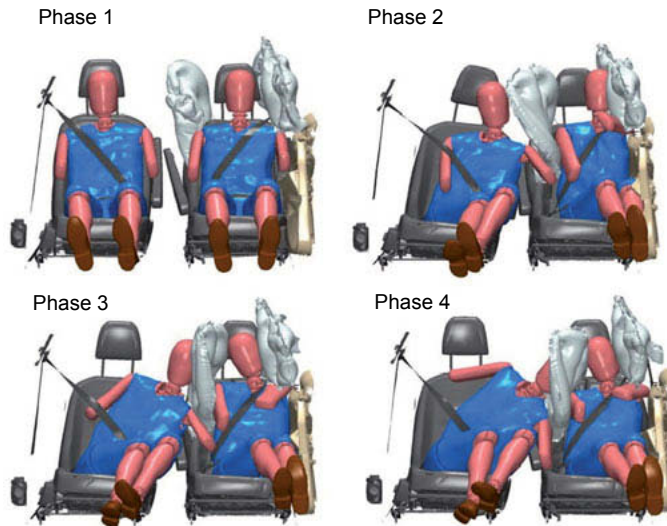


Bild 10: Ablauf einer Insasseninteraktion mit Centerairbag

Um auch im Feldgeschehen eine Wirkung erzielen zu können kann der Centerairbag nicht nur auf eine einzige Laborkonfiguration ausgelegt werden. Deshalb wurden zunächst Betrachtungen zu den relevanten Crashlastfällen, dem Spektrum der Sitzpositionen, den Sitzeinstellungen, den unterschiedlichen Insassenpercentilen und deren Kombinationen angestellt. Dabei entsteht schnell eine große Lastfallmatrix aus der die relevanten Lastfälle ausgewählt werden müssen. Die Luftsackgeometrie wurde unter Berücksichtigung der beschriebenen komplexen

Randbedingungen in einem iterativen Designprozess mit Hilfe der Simulation entwickelt. Eine große Herausforderung dabei war es das Bagshape so zu optimieren, dass der Kopfschutzbereich zu Beginn des Interaktionsereignisses optimal zwischen den beiden Köpfen liegt. Gleichzeitig müssen die Wechselwirkungen zwischen Gasgeneratorleistung und Bau- raum auf der einen Seite und Luftsackgröße, Kammerdicke und Innendruck auf der anderen Seite optimal aufeinander abgestimmt werden.

Eine reproduzierbare Positionierung des unbelasteten vollständig befüllten Centerairbags ist Grundvoraussetzung für die Eignung als Interaktionsschutz. Der Designprozess wurde deshalb fortlaufend durch Standversuche mit Prototypenteilen begleitet.

Die Auslegung des Centerairbags stellt höchste Anforderungen an die Simulation. Wegen der hohen Bedeutung der Positionierung und Endlage des aufgeblasenen Luftsacks muss



mit hohem Aufwand die Faltung des Luftsacks modelliert werden. Zusätzlich muss in der Simulation der Einfluss der Gasdynamik berücksichtigt werden. Die Rechenzeit steigt dadurch deutlich an. Zur Validierung des Entfaltungsvorgangs wurden Standversuche in der Fahrzeugumgebung durchgeführt. Diese Versuche wurden durch mehrere Kameras aus unterschiedlichen Ansichten aufgezeichnet. Gütekriterium der Simulation ist die Übereinstimmung von Versuchsfilm und Animationssequenz (Bild 11).

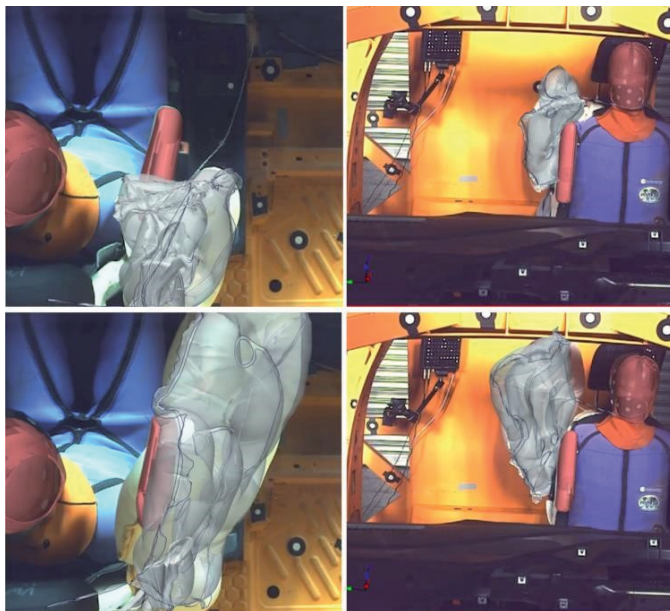


Bild 11: Entfaltung des Centerairbags - Überlagerung von Versuch und Simulation

Der Nachweis des Interaktionschutzes durch den Centerairbag wurde abschließend in Crashversuchen erbracht. Getestet wurde u.a. die Konfiguration Euro NCAP side pole dual occupancy test [2]. Im Versuch konnte die Einhaltung der biomechanischen Grenzwerte und eine ausreichende Abdeckung der beiden Köpfe durch den Centerairbag nachgewiesen werden

(Bild 12).



Bild 12: Insasseninteraktion im Crashversuch Euro NCAP side pole dual occupancy test [2]

## 5. Zusammenfassung

Mit dem ID.3 hat Volkswagen innerhalb von nur 3 Jahren ein modernes batteriebetriebenes Elektrofahrzeug entwickelt. Das Fahrzeugkonzept stellt auch die Fahrzeugsicherheit vor ganz neue Herausforderungen. Mit dem derzeitigen technologischen Stand der Batterietechnik sind robuste Crashstrukturen zum Schutz der HV-Batterie bei Unfällen unverzichtbar. Diese Strukturen wurden mit modernen Simulationsverfahren ausgelegt und optimiert. Die Wirksamkeit des Strukturkonzeptes konnte in Komponenten- und Crashversuchen bestätigt werden. Um das bereits hohe Niveau des Insassenschutzes bei Unfällen weiter zu verbessern wurde für den ID.3 ein neuartiger Centerairbag entwickelt. Der Centerairbag verhindert einen harten Kontakt zwischen Fahrer und Beifahrer bei Seitencrashes. Die Wirksamkeit des Centerairbags als Interaktionsschutz konnte in Crashversuchen nachgewiesen werden.

## Quellenangaben

- [1] FAR SIDE OCCUPANT TEST & ASSESSMENT PROCEDURE, Implementation 2020 Version 2.0, EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME, June 2019
- [2] OBLIQUE POLE SIDE IMPACT TESTING PROTOCOL, For 2020 Implementation Version 7.1, EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME, June 2019

## Individual adaptive occupant protection

### How does the world of passive safety looks like tomorrow, especially the occupant detection?

**Maik Ketels, 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. Hierdurch ergeben sich Möglichkeiten und Herausforderungen für die passive Sicherheit mit ihren Rückhaltesystemen in der Erkennung und Identifizierung der Insassen und/ oder Gegenstände sowie deren Verhalten während der Fahrt.

#### Abstract

The increasing automation of driving and the application of alternative drive units leads to new interior concepts. Hereby new chances and challenges for passive safety and its restraint systems are introduced, the detection of passengers, stuff and also their movements while driving.

#### 1. Ausgangssituation

Die allgegenwärtige Klima- und CO<sub>2</sub>-Debatte wird kurzfristig zu unvermeidlichen Veränderungen gerade im stark involvierten Mobilitäts- und Verkehrssektor führen. Zum Erreichen der Klimaziele wird auch die Einhaltung der vereinbarten Flottenverbräuche eine mitentscheidende Rolle spielen. Da die zukünftigen Grenzwerte rein konventionell angetriebenen Stand heute nur von kleineren Fahrzeugen erreicht werden können, reicht eine weitere Optimierung verbrennungsmotorischer Antriebe bei Weiterverwendung von rein fossilen Brennstoffen allein nicht aus. Eine Verlagerung auf Elektro-Fahrzeuge mit batterieelektrischen Speichern oder Brennstoffzellen wird von den Autoherstellern vor diesen Hintergrund als alternativlos angesehen werden. Erste Hersteller haben zudem bereits angegeben, keine Verbrennungsmotoren mehr neu entwickeln zu wollen. Um eine Verlagerung der Problematik zu vermeiden, dürfen zukünftig aber nicht nur die lokalen Emissionen beim Betrieb betrachtet werden, sondern auch die globalen bei der Herstellung aller Komponenten und bei der Erzeugung des Ladestroms, des Wasserstoffs oder synthetisch erzeugter Kraftstoffe in Verbrennungsmotoren.

Durch den zunehmenden Einsatz von batterieelektrischen Energiespeichern rechnen sich zusätzlich zur klassischen Karosseriestruktur mit ausgeprägtem Mitteltunnel auch spezielle E-Plattformen mit flachem teilweise gedoppelten Unterboden zur Aufnahme der Zellen. Der zusätzliche Freiraum in der Fahrgastzelle kann unter anderem für eine bisher nur von Kleinbussen bekannte Drehung von Sitzen genutzt werden. Eine Lounge-Anordnung, in der sich während der Fahrt alle nicht mit der Fahrzeugführung beschäftigten Insassen einander (um einen Tisch) zuwenden und sich in die Augen schauen können, könnte den Reisekomfort deutlich steigern und wird in einer Vielzahl von Studien schon heute thematisiert. Hierdurch wird ein Umdenken in der Anordnung und Auslegung von Rückhaltesystemen erforderlich, um sich auf neue Rahmenparameter einzustellen. Aus sicherheitstechnischer Sicht erfordert dies Anpassungen in Richtung sitzintegrierter Gurt- und Airbagsysteme, was wiederum die B-Säule als Befestigungspunkt für den Gurtumlenker überflüssig macht. Es entstehen weitere Freiräume für vereinfachten Einstieg mit beispielsweise hinten angeschlagenen Hintertüren. Um diese Anpassungen gemäß Gesetzes- und/ oder Kundenanforderungen abzusichern, werden neue Test- und Prüfkonzepte und Verfahren erforderlich. Das Deformationsverhalten der Karosserie in einen solchen Fahrzeug nicht nur auf die Belastungswerte und zulässigen Verformungen bezüglich der Insassen, sondern zusätzlich auch der Energiespeicher abgestimmt werden muss.



Bild 1: Zukünftiges Innenraumkonzept [IAV]

Zusätzlich zur Elektrifizierung der Antriebsstränge wird parallel über Assistenzsysteme eine immer weitergehende Unterstützung des Fahrers bis hin zur Autonomisierung der Fahraufgabe eingeleitet. Hierdurch entstehen im ersten Schritt für Beifahrer und Passagiere wie später

dann auch für den Fahrer zusätzliche Freiheitsgrade bezüglich ihrer Sitzposition und der Ausrichtung zum Fahrzeug. Eine Liegeposition einzunehmen wird nicht nur für die Passagiere der hinteren Reihen denkbar, sondern kann auch für die Passagiere der ersten Sitzreihe eine Alternative sein.

Auch beim Nutzungsverhalten werden Änderungen vorhergesagt. Das eigene Fahrzeug könnte gerade in den Städten mit ausgeprägtem Öffentlichen Nahverkehr und beschränkter Park- und Verkehrsfläche an Bedeutung verlieren und durch Car-Sharing-Ansätze ergänzt. Um hier eine unkomplizierte Bedienbarkeit für alle Nutzer zu ermöglichen, spielen einfache automatisierte Anpassungen der Fahrzeuge an den Nutzer eine wichtige Rolle.

Durch all diese Aspekte (wie der Anpassungen im Nutzungsverhalten und dem Einzug neuer Technologien ins Kraftfahrzeug) werden sowohl Auswirkungen auf die Fahrzeuge an sich, die Verkehrszusammensetzung als auch auf die auftretenden Konflikte zu beobachten sein. Ähnlich wie durch die Einführung des ESP mit einem Rückgang der Schleuderunfälle werden früher typische Unfallkonfigurationen wie Auffahrunfälle, die durch entsprechende Sensorik erkannt werden können, weiter an Bedeutung verlieren und neue Konstellationen mit komplexeren Randbedingungen anteilig zunehmen.

Hieraus wird die wichtige Rolle die Sensorik bei der korrekten Erfassung der Verkehrssituation, aber auch zur Detektion der zu schützenden Individuen im Fahrzeug bzw. im Fahrzeugumfeld deutlich und ersichtlich. Über eine geeignete Vorhersage des Unfalls auf Basis fahrzeugeigener oder ggfs. über eine Fusion mit externen Daten, kann dann eine Strategie zur Minimierung der Unfallfolgen für alle erkannten Beteiligten ermittelt werden. Zudem kann aber auch eine Anpassung der Systeme notwendig werden, die ggf. das eigentliche „Losfahren“ gar nicht erst ermöglichen, falls Risiken erkannt werden.

## **2 Innenraumsensorik**

Wie schon bei den Umfellsensoren im Fahrzeugaußenbereich wird auch die Zahl und Bedeutung der Sensoren zur Erfassung des Innenraums weiter zunehmen. Diese werden heute unter anderem zur Erkennung der Sitzbelegung, der Gurnutzung oder der Müdigkeit des Fahrers genutzt. Darauf aufbauend können auch die Anforderungen an den Insassenschutz bei zunehmender Autonomisierung der Fahraufgabe (Fahrerzustands-erkennung) und sich ändernden Innenräume von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten, Sitzposition und -ausrichtung berücksichtigt werden. Hierzu werden bei IAV aktuell neue Sensor-Technologien

wie z.B. Kameras (IR, Time-of-Flight, 3D), Radar-Systeme, Ultraschall-Systeme sowie Möglichkeiten einer Fusion der Sensordaten untersucht.

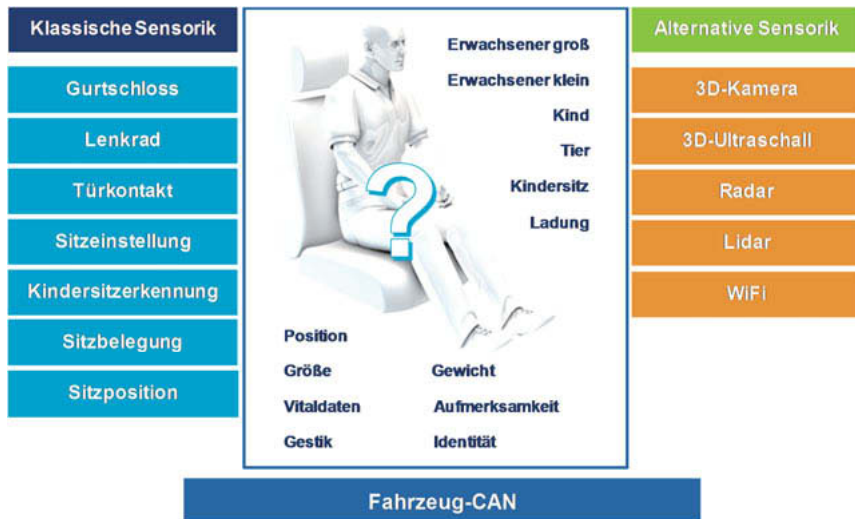


Bild 2: Überblick Innenraumsensorik [IAV]

## 2.1 Sitzbelegungs-/Sitzpositionserkennung

Moderne Rückhaltesysteme benötigen für eine Zündung irreversibler Gurtstraff- und Airbagkomponenten eine explizite Aussage, ob der jeweilige Sitz mit einem auslöserrelevanten Insassen und nicht mit einem Gegenstand bzw. leeren Kindersitz belegt ist. Diese Entscheidung erfolgt üblicherweise über sitzschäumintegrierte Schalter oder Sensormatten. Zudem erfolgt in Teilen der Welt zusätzlich über Sensoren an der Sitzlängsverstellung eine indirekte Abschätzung des Insassengewichts /-größe, um die Gurtrückhaltekräfte in der vordersten Sitzposition abzuschwächen. Bei der Sitzbelegungserkennung ist oftmals für jede Sitz- und Bezugsvariante eine Validierung der Funktion im gesamten Temperaturbereich und eine sicherere Detektion von Misuse-Lastfällen notwendig. Hier hat IAV ein Verfahren entwickelt, das die Positionierung des Sensors vereinfacht und eine schnelle Integration gewährleistet. Dennoch wird zur weiteren Reduzierung des Abstimmungsaufwandes an sitzstrukturunabhängigen Systemen geforscht, die den Innenraum mit seinen Insassen mittels Reflektionen unterschiedlichster Schall- oder elektromagnetischer Wellen erfassen. Hierbei bieten Sensoren mit abgegrenztem Frequenzbereich z.B. Radarsensoren Vorteile, da bei ihnen im Vergleich zu Kameras oder

WiFi-Systemen keine Umgebungsstörungen im gleichen Spektrum herausgefiltert werden müssen. Da sich viele Anforderungen im Gesetz oder beim Verbraucherschutz an den derzeit umgesetzten technischen Lösungen orientieren, ist es eine Herausforderung, die Belegung in dem mit haptischen Schalter und Drucksensoren umsetzbaren kurzen geforderten Zeitrahmen auch mit anderen Sensortypen, die eine nachgeschaltete zeitintensive Datenverarbeitung von Rohdaten benötigen oder durch Verdeckungen beeinflusst werden können, sicher zu erkennen [1].

In weiteren Untersuchungen wurde bei IAV eine Sitzbelegung über die Änderung des Schwingungsverhaltens eines Sitzes bei unterschiedlichen Beladungs- oder Besetzungszuständen betrachtet. Hierzu wurden die Signale eines Beschleunigungssensors an der Federmatte der Sitzfläche mit einem Referenzsensor verglichen. Die ermittelten Signale lassen sich recht eindeutig den korrekten Belegungszuständen zuordnen, benötigten dafür aber eine gewisse Zeit. Die benötigte schnelle Anzeige einer Änderung im Fahrbetrieb ist über dieses Messprinzip allein nicht umsetzbar.

## 2.2 Insassensensorik

Darüber hinaus gibt es bereits viele auch automobiler Anwendungen, die über Kameras und eine nachgeschaltete Nutzung von Algorithmen zur Verarbeitung der Daten, ein Gesicht, die Augenschließzeiten oder die Blickrichtung erfassen können. Ein erkanntes Gesicht kann in obigen Anwendungsfall direkt mit einem belegten Sitz gleichgesetzt werden. Weitere Informationen sind eine mögliche Ablenkung/Müdigkeit, die Übernahmefähigkeit des Fahrers nach einem autonom gefahrenen Abschnitt oder in letzter Instanz eine Identifikation. Die Funktion von Kameras im sichtbaren Lichtbereich wird beim Autofahren allerdings durch schnell wechselnde Umgebungsbedingungen, wie Schattenschläge auf Alleen, Tunnel oder Nachtfahrten sowie personenabhängige Merkmale wie Kleidung, Brillen und Frisuren erschwert. Mittels integrierter Infrarot-Beleuchtung können beim Ausweichen in dieses Spektrum Verbesserungen bei der Erkennung erzielt werden. Im Rahmen von Grundlagenuntersuchungen wurden bei IAV viele Testfahrten und Standversuche durchgeführt. Um hierbei unterschiedliche Kameras direkt vergleichen zu können, erfolgte eine Bewertung der Detektionsgüte in identischen Szenarien über das prozentuale Verhältnis der Messwerte, die die korrekte Belegung angeben zu den Falschmeldungen.



Bild 3: Gesichtserkennung [IAV]

Auch automotivfremde Sensoren auf Ultraschallbasis, die nicht direkt durch Umgebungssignale beeinflusst werden, wurden in verschiedenen Entwicklungsstufen in der Fahrzeugumgebung getestet. Systeme mit mehreren Sendern in einem Gehäuse ermöglichen sogar die 3D-Erfassung von Strukturen im Raum. Durch große Öffnungswinkel ist hier die gemeinsame Überwachung beider Vordersitze oder der gesamten Rückbank realisierbar. Allerdings erschwert das Reflektionsverhalten durch die Oberflächenbeschaffenheit, den Materialmix im Fahrzeug und die Ausrichtung der reflektierenden Fläche einheitliche Ausgabesignale. Zwischen verschiedenen Baustufen sind deutliche Verbesserungen der Detektionsgüte und -genauigkeit zu erkennen, aber für eine sichere Unterscheidung differenzierter Sitzbelegungszustände (Kindersitz, Person, Beladung), die über Leer/Belegt-Anzeige hinausgehen, reicht die beschränkte Anzahl der ermittelten Reflektionspunkte derzeit noch nicht aus.

Bei Time of Flight-Kameras wird beim Aussenden eines kurzen Lichtimpulses die Laufzeit bis zur Rückkehr an einen Empfänger erfasst. Durch Variation der Abstrahlposition und des Abstrahlwinkels kann so prinzipiell ein 3D-Abbild der Umgebung erzeugt werden.

Auch mit WiFi-Signalen kann über das Reflektionsverhalten der ausgesendeten Strahlung zwischen einem Sender und einem Empfänger ein Abbild der Umgebung dargestellt werden. Die Auswertung der Channel State Information (CSI) herkömmlicher WLAN Geräte bietet eine Vielzahl denkbarer Fahrzeugfunktionen, welche von Vitalzeichenerkennung über Gestensteu-



erung und Personenlokation bis hin zur Personenidentifikation reichen. Mit einer auf KI-basierenden Signalanalyse konnte in Versuchsreihen eine hohe Vorhersagegenauigkeit für eine Sitzbelegung erzielt werden, während klassische Analysemethoden zu keinen nutzbaren Ergebnissen geführt haben.

Kamera- bzw. laserbasierte Sensoren werden bereits zur berührlosen Pulsmessung über minimale Farbänderungen der Haut eingesetzt. Hiermit kann neben einem besetzten Sitz auch der körperliche Stresszustand des Insassen erkannt werden.

Radarsensoren werden mittels Entfernungsmessung unter anderem zur Erfassung von Atembewegungen eingesetzt, womit neben einer Sitzbelegung auch zurückgelassene Kinder oder Tiere bei Fahrzeugstillstand erkannt und bewarnt werden könnten.

Da die unterschiedlichen Detektions-Anforderungen im Fahrzeug nicht über einen einzelnen Sensor bzw. ein Messprinzip erfüllt werden können und sich die Sensorausstattung einzelner Fahrzeug-Modelle stark unterscheidet, ist eine geschickte Fusion der Einzelergebnisse notwendig, um ein Gesamtergebnis zu erzielen, das größer ist die Summe ihrer Einzelergebnisse.

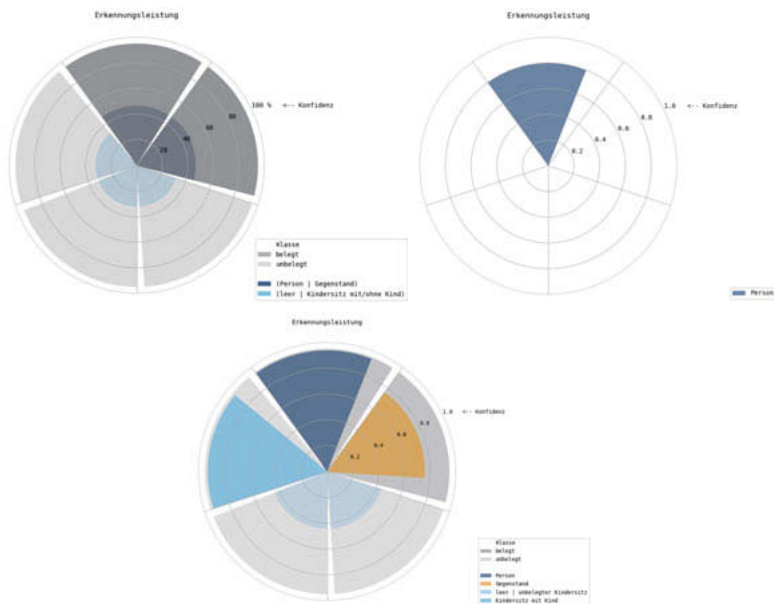


Bild 4: Sensorfusion: Diagramme mit Kenngröße und Konfidenz [IAV]

## 2.3 Insassenposition

Über die Anpassung einiger der oben genannten Systeme wäre es bei gesteigerter Abtastgenauigkeit möglich, die statische Position der Insassen zu erkennen, die im Pkw direkt mit der Einstellung/Drehung des Sitzes, des Lenkrades, ggfs. der Kopfstütze und des Gurthöhenverstellers zusammenhängt und in die Auslösestrategie des Rückhaltesystems einbezogen werden könnte. Derzeit wird bei IAV an einer kamerabasierten Innenraumüberwachung von autonom fahrenden Shuttles geforscht, um neben der Ausrichtung der Fahrgäste auch die Besonderheit von im Fahrbetrieb stehenden Insassen und ihre Nutzung von Halteeinrichtungen mit zu berücksichtigen, insbesondere da kein Busfahrer mehr auf die Passagiere achten kann.

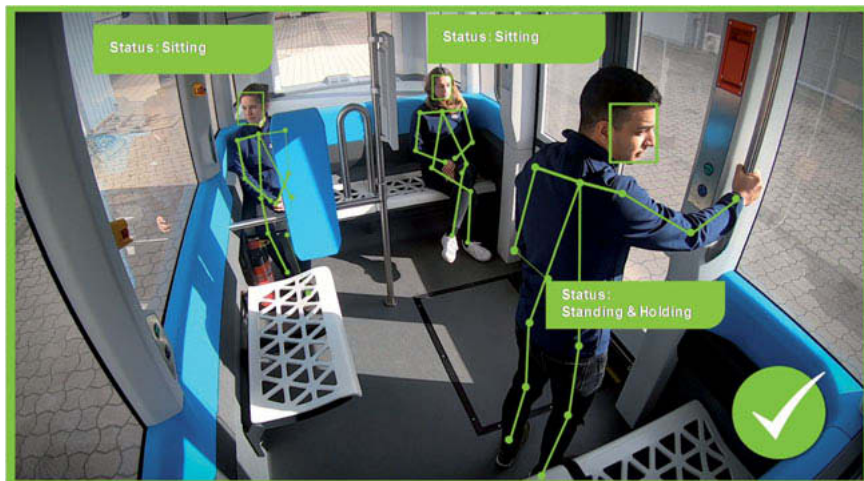


Bild 5: Insassenposition [IAV]

Um eine Ablenkung beim Fahren zu verringern und den Bedienkomfort zu erhöhen, werden alternative Konzepte beispielsweise zur Ansteuerung von Infotainment-Systemen mittels Erkennung von Gesten und Bewegungen in lokal begrenzten Bereichen umgesetzt. Auch hier sind weitere Ausbaustufen der Sensorik mit vergrößertem Erfassungsvolumen und erhöhter -frequenz sinnvoll, um auch die dynamischen Bewegungen der Insassen kurz vor einer kritischen Situation durch in Lenk- und/oder Bremsmanövern bzw. Vorkollisionen wirkenden Kräften in die Auslösestrategie der Rückhaltesysteme einfließen lassen zu können. Wie eine hausinterne Probandenstudie mit unterschiedlichen Pre-Crash-Fahrmanövern gezeigt hat, reicht

eine Simulation zu Abschätzung der Insassenbewegung aufgrund des Trägheitskräfte allein nicht aus, da gerade die Aufmerksamkeit des Insassen und damit deren Muskelaktivität die Bandbreite der Insassenposition vergrößert. Für eine schnelle Detektion ist neben einer deutlich erhöhten Abtastrate der Sensorik mit angepasster Auflösung-Genauigkeit auch eine nachgeschaltete Datenverarbeitung nahezu in Echtzeit notwendig, wie sie derzeit erst in industriellen optischen 3D-Mess-Systemen umgesetzt ist. Eine weitere Herausforderung ist hierbei, bewegungsrelevante Körperpunkte ohne zusätzliche Hervorhebung mit optischen Marken unter wechselnden Belichtungszuständen im vorgegebenen Zeitrahmen sicher zu identifizieren.

## 2.4 Insassenklassifizierung/-identifizierung

Unter dem Sammelbegriff Insassenklassifizierung wird bei IAV über die reine Sitzbelegungserkennung hinaus zur Individualisierung der Sicherheitssysteme auch an der Erfassung weiterer insassenspezifischen Daten wie z.B. Geschlecht, Größe, Gewicht und Alter sowie in letzter Instanz der Identität der sitzplatzzugeordneten Person geforscht und in Testreihen fokussiert.

Hierbei kommen verschiedene Systemgrenzen in Betracht, die ausschließliche Nutzung von im Fahrzeug selbst erzeugten Daten, das Hinzuziehen von Zusatzinformationen über externe Datenverbindungen und/oder den Transfer von fahrzeugetragenen Daten nach außen. Bei der Nutzung von externen Daten z.B. zur Zutrittsberechtigung oder Voreinstellung von Sitz oder Assistenzsystemen von Leihwagen sind datenschutzrechtliche Belange zu beachten.



Bild 6: IAV Maskin [IAV]

Hierbei muss der Zielkonflikt zwischen Identifizierung des Insassen, aber der Anonymisierung der Daten im Auge behalten werden. Gerade beim Anlernen von Algorithmen sind große Datenmengen zur Validierung notwendig. Bei Verwendung und Speicherung von Bilddaten kann über das IAV-eigene Anonymisierungs-Werkzeug IAV Maskin ein Ersetzen von Gesichtern erfolgen (Bild 6, rechts), da eine automatische Verpixelung (Bild 6, mitte) zurückgerechnet werden kann und somit nicht die notwendige Sicherheit bietet.

## **2.5 Validierung Sensorsysteme**

Um die oben beschriebenen Sensorsysteme sowohl in der Prototypenphase als auch vor einem späteren Serieneinsatz testen und vergleichen zu können, müssen Testrandbedingungen definiert werden. Gerade bei Kamerasystemen gestaltet sich sowohl deren Definition als auch die Nachbildung eines realistischen Testszenarios über Puppen oder Probanden bei der möglichen Bandbreite an Insassenparametern wie Größe, Geschlecht, Hautfarbe, Haarfarbe, Frisur, Brille, Bekleidung, Kopfbedeckung, etc. aber auch der Umgebungsbedingungen im und außerhalb des Fahrzeug, als schwierig. Bei Nutzung von Probanden muss eine valide Abbildung der Bevölkerung an allen Standorten gewährleistet sein, bei Verwendung von Puppen als Insassenersatz muss darüber hinaus eine vergleichbare Detektierbarkeit für alle Messprinzipien gewährleistet werden.

## **3 Biomechanik**

Eine Zusatzinformation über den Insassen macht für die Sicherheit allerdings nur Sinn, wenn damit eine positive Auswirkung auf die Belastungen im Crash erzielt werden kann. Hierzu muss der Zusammenhang zwischen der detektierbaren Eigenschaft bzw. des Zustands des Insassen und der Belastung in einem erwarteten Unfallszenario bekannt sein, welches mit Hilfe eines Pre-Crash-Sicherheitssystems vorausgesagt werden muss. Dies eröffnet ein komplexes Forschungsfeld im Bereich der Biomechanik. Es stellt sich die Frage, wie beispielsweise die Rückhaltekräfte losgelöst von bestehenden Sitzstrukturen in neuen Sitzkonzepten eingeleitet und in Abhängigkeit von zusätzlich erfassten Insassenparametern angepasst werden können. Da die Komplexität der möglichen Belastungsrichtungen und zukünftigen Sitzpositionen deutlich von den heute noch im Crash betrachteten Front-, Heck- und Seitenaufprallszenarios mit in Fahrtrichtung sitzenden Insassen abweichen kann, sind eher simulatorische Untersuchungen mit validierten biofiden Menschmodellen als Realversuche mit derzeit nur auf eine Crashrichtung optimierten Dummies das zu bevorzugende Vorgehen.

Die zur Beantwortung dieser Fragestellungen notwendigen Auswertungen bereits vorliegender Daten, die Durchführung weiterer biomechanischer Grundlagenuntersuchungen und der

dadurch resultierende Aufbau bzw. die Anpassung von Menschmodellen können aber nicht von Seiten der Fahrzeughersteller und Entwicklungsdienstleister allein durchgeführt werden. Das hierzu notwendige medizinische Fachwissen kann nur über Kooperationen mit Kliniken oder medizinischen Forschungseinrichtungen gezielt erarbeitet werden. Aufgrund der hohen Komplexität und der notwendigen Absicherung bei Versuchen mit Probanden würden sich staatlich geförderte Gemeinschaftsprojekte anbieten. Teilaspekte werden derzeit im europäisch geförderten Gemeinschaftsprojekt OSSCAR [2] bearbeitet.

#### 4 Sitzkonzepte

Neben der Nutzung von sitzintegrierten Rückhaltekomponenten ist auch eine aktive Veränderung der Position des Sitzes als zusätzliche Schutzmaßnahme denkbar, wobei es die auftretenden Gesambelastungen aus Positionsänderung und nachfolgenden Unfall zu minimieren gilt. Neben dem Aufrichten könnten auch Drehungen oder Verschiebungen des Sitzes relativ zum Fahrzeug umgesetzt werden. Hieraus ergeben sich Zusatz-Anforderungen an die Konstruktion reaktiver Sitze, die verbauten Schutzkomponenten, die PreCrash-Umfeldsensorik hinsichtlich notwendigen Aktivierungs- und Vorwarnzeiten sowie die Berechnungsdauer zur Vorhersage der zu erwartenden Unfallkonfiguration.



Bild 7: Konzeptstz IAV-Coquille [IAV]

Ein denkbare Konzept für einen crashaktiven dreh- und schwenkbaren Fahrzeugsitz namens „Coquille“ hat IAV als Diskussionsgrundlage auf der Consumer Electronics Show 2019 gezeigt.

Hier ist über eine stabile, dreh- und kippbare Außen-Schale eine Basis für großflächige Rückhaltekräfte mit Hilfe sitzintegrierter Komponenten gegeben und auch die Rückhaltung des Kopfes kann über einen sich an einem ausfahrbaren Bildschirm abstützenden Airbag fahrzeugunabhängig gewährleistet werden. Über die Anbindung zum Fahrzeug können neben Deformationen auch aktiv Dreh- und Schwenkbewegungen eingeleitet werden.

## 5. Rahmenbedingungen

Eine Erweiterung der Sensorik und Implementierung neuer Sitze und Rückhaltesysteme zieht natürlich hohe Entwicklungs- und Bauteilkosten nach sich. Damit das Rückhaltesysteme überhaupt sinnvoll an die Unfall- und die Insassenparameter angepasst werden kann, ist zu abwägen, wie viele wählbare Stufen für die jeweiligen Komponenten (heute: Gurtkraftbegrenzer, Airbagstufen, Ventholes, Zündzeiten, etc.) sinnvoll sind. Diese müssen dann in einem festzulegenden Kostenrahmen konstruktiv umsetzbar sein. Da auch Kosten für zusätzliche Sensoren, die ausschließlich der Optimierung eines Rückhaltesystems dienen und hoffentlich im ganzen Autoleben nicht benötigt werden, schwer durchzusetzen sind, ist eine Mehrfachnutzung sinnvoll. Wenn über die Sensoren zusätzlich auch alltäglich nutzbare Assistenz- oder Komfortfunktionen angesteuert werden können, sich der Tragekomfort der Systeme erhöht oder ein Anschnallen sogar ganz entfallen kann, ist eine Umsetzung einfacher vertretbar. Zudem müssen Kundenwunsch, Herstellerinteressen, Persönlichkeitsrechte und der Datenschutz berücksichtigt und gegeneinander abgewogen werden.

## 6. Fazit

Der Einsatz von Innenraumsensorik zeigt Potential, sowohl in sicherheits- als auch in komfort- und bedienungstechnischen Bereichen. Zusatzinformationen über die Belegung des Fahrzeugs und die einzelnen Insassen können für eine vereinfachte Mobilität bei verminderten Risiken genutzt werden. Allerdings müssen hierzu die notwendigen Entwicklungen in allen beteiligten Bereichen parallel vorangetrieben werden, denn ohne anpassbare Rückhaltesysteme können Zusatzinfos über Insassengröße oder -gewicht nicht berücksichtigt werden. Zudem müssen neue Testszenarien generiert werden, um die Funktion der Einzelsysteme absichern zu können. Neben dem erhöhten Testaufwand durch eine Vielzahl an Szenarien gestaltet sich gerade die reproduzierbare Nachbildung des Menschen für alle denkbaren Sensorsysteme als nicht trivial.

[1] Assessment Protocol SA V.9.0.2 Seite 7-8, EuroNCAP, Juli 2019

[2] EU Projekt OSCCAR, [www.osccarproject.eu](http://www.osccarproject.eu), 15.09.2019

## Aktive Energieabsorber – Verbesserte Sicherheit durch intelligente Fahrzeugstrukturen

### Active energy absorbers – Improved safety through intelligent vehicle structures

Dipl.-Ing. **Marc Rohrer**, Dr.-Ing. **Elmar Beeh**, DLR FK- WVG, Stuttgart;  
Prof. Dr.-Ing. **Horst E. Friedrich**, DLR FK, Stuttgart;  
Dr.-Ing. Ralf Sturm DLR FK- FLK, Stuttgart;  
**Stephan Lapoehn**, DLR TS- FZE, Stuttgart

#### Zusammenfassung

Seit mehreren Jahren erweitern die Fahrzeughersteller ihre Modellpalette mit einer Vielzahl verschiedenster Fahrzeuge. Die Spanne reicht von kleinen, leichten und sparsamen Fahrzeugen für den urbanen Bereich bis hin zu großen, komfortablen aber schweren und hochmotorisierten Fahrzeugen. Bedingt durch die geltenden Zulassungsnormen legen Fahrzeughersteller ihre Karosseriestrukturen hauptsächlich auf die Eigenmasse aus. Kleinere Fahrzeuge können dadurch bei einem Unfall mit einem größeren Fahrzeug im Nachteil sein, da sie im Allgemeinen über geringere Masse und kürzer ausgeführte Vorderwägen verfügen. Große und schwere Fahrzeuge besitzen hingegen meist längere Vorderwagenstrukturen. Konventionelle, auf Faltenbeulen ausgelegte, Längsträgerstrukturen bieten keine Adaptionsmöglichkeit für unterschiedliche Unfallszenarien. Im Falle einer Kollision zwischen leichten und schweren Fahrzeugen kann es im leichten Fahrzeug zu großer Deformation bzw. Intrusion, bis hin sogar zum Durchstoßen der Stirnwand mit dem Längsträger kommen.

Um dieser Herausforderung zu begegnen, wurde am DLR Institut für Fahrzeugkonzepte ein Längsträger entwickelt, dessen Crasheigenschaften aktiv an unterschiedliche zu erwartende und detektierte Unfallsituationen angepasst werden können. Über das Zerspanen der Oberfläche eines teleskopartigen Rohres wird dabei kinetische Energie absorbiert. Durch das Einstellen der Zerspantiefe bzw. des zerspannten Volumens können das Energieabsorptionsvermögen und die Längskraft stufenlos und sehr schnell (in weniger als 130 Millisekunden) variiert werden. Diese Anpassung der Crashcharakteristik ermöglicht es, die Kompatibilität zwischen Fahrzeugen unterschiedlicher Massen deutlich zu verbessern, ohne Einbußen bei Kollisionen mit starren Hindernissen in Kauf zu nehmen. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten und starren

Barrieren ist es zudem möglich, durch gezieltes Verringern des Kraftniveaus, die auf den Insassen wirkenden Verzögerungen auf ein nötiges Minimum zu reduzieren. Weiterhin bietet diese Technologie die Option, durch die unterschiedliche Einstellung der Kraftniveaus der beiden Längsträger gezielt eine asymmetrische Lastverteilung zu erzeugen. Am DLR durchgeführte Gesamtfahrzeug-Crashsimulationen zeigen, dass insbesondere in Seitenaufprallsituationen, beim Auftreffen auf steifen und festen Strukturen wie der B-Säule einerseits und eher weichen Strukturen wie der Tür andererseits, diese Technologie Vorteile bzgl. der Intrusion beim Unfallpartner aufzeigt. Es ist somit gelungen, ein System zu entwickeln und in Versuchen zu validieren, welches bei individuellen Unfallsituationen Vorteile für alle Beteiligten bietet.

### Abstract

For several years, the vehicle manufacturers have expanded their model range with a variety of different vehicles. The spectrum ranges from small, light and economical vehicles for the urban area to large, comfortable but heavy and highly powered vehicles. Due to the applicable approval standards, vehicle manufacturers base their body structures mainly on their own mass. In a mixed crash between a small and a large vehicle, smaller vehicles may thus be at a disadvantage compared to larger ones, as they generally have lower mass and shorter front-ends. Large and heavy vehicles, however, usually have longer, front end structures. Conventional longitudinal beam structures designed for crippling do not offer the possibility of adaptation for different accident scenarios. In the event of a collision between light and heavy vehicles, it can lead to great deformation or intrusion in the light vehicle up to the piercing of the bulkhead with the longitudinal member in the worst case.

In order to meet this challenge, a longitudinal beam was developed at the DLR Institute for Vehicle Concepts, whose crash characteristics can be actively adapted to different, expected and detected accident situations. By peeling the surface of a telescopic tube kinetic energy is absorbed. By adjusting the peeling depth or the peeled volume, the energy absorption capacity and the longitudinal force can be varied steplessly and in very short time (less than 130 milliseconds). This adaptation of the crash characteristic makes it possible to significantly improve the compatibility between vehicles of different masses, without having to accept losses in the case of collisions with rigid obstacles. At lower speeds and rigid barriers, it is also possible, by deliberately reducing the force level, to reduce the deceleration acting on the occupants to a necessary minimum. Furthermore, this technology offers the option of specifically producing an asymmetrical load distribution through the different adjustment of the force levels of the two longitudinal members. Full vehicle crash simulations performed at DLR show that, especially in side impact situations, when hitting rigid structures such as the B-pillar on the one hand and



rather soft structures like the door on the other hand, this technology offers advantages in terms of intrusion at the accident partner. It has thus been possible to develop a system and to validate it in tests which offer advantages for all participants in individual accident situations.

## 1. Einleitung

Die Vielfalt an erhältlichen Modellderivaten verschiedener Hersteller nimmt seit einigen Jahren stark zu. Mit einer Spanne von sehr kleinen und leichten Microcars bis zu schweren und hochmotorisierten Sport Utility Vehicles (SUV), sind aufeinander abgestimmte Crasheigenschaften mit konventionellen Karosserien kaum zu realisieren. Auch für den Laien ist erkennbar, dass ein kleines und leichtes Fahrzeug beim Zusammenstoß mit einem großen und schweren Fahrzeug eine signifikant höhere Verzögerung erfährt, welche, je nach Ausprägung, schwere körperliche Verletzungen mit sich bringen.



Bild 1: Dokumentation Frontalkollision SUV gegen Kleinwagen [3]

In Bild 1 ist beim Audi Q7 klar zu erkennen, dass der linke Fahrzeuglängsträger kaum deformiert ist und damit kaum Energie umgewandelt hat. Lediglich die peripheren Blechteile, sowie das Fahrwerk und die Crashbox sind deformiert. Im Gegensatz dazu ist beim Fiat 500 der Durchstoßkanal des Audi- Längsträgers zu sehen. Nahezu der gesamte Vorderwagen ist stark deformiert. Laut Bericht des ADAC wären bei dieser Kollision (54km/h), zumindest beim Fahrer des Kleinwagens schwere Verletzungen festzustellen [3]. Dagegen träten bei den Insassen des SUVs deutlich geringe Belastungen auf.

Im Vergleich zum Frontalaufprall ist in Anbetracht der eher „weichen“ Tür und der sehr kurzen Deformationszone der Seitenaufprall als noch ungünstiger anzusehen. Verstärkungen im Tür-, A-, und B-Säulenbereich sowie aktive Maßnahmen wie Seitenairbags bringen nur mäßige Verbesserungen mit sich [4]. Wiederum ist die größere Bodenfreiheit des SUV ein Problem, da der Schweller des kleineren Fahrzeugs nicht getroffen wird. Dies bestätigen Untersuchungen des IIHS (Insurance Institute for Highway Safety) [2], das den Seitenaufprall von SUVs

bzw. Pick-Up Trucks mit anderen Fahrzeugklassen untersucht hat. Ergebnisse aus Simulationen und Crashtests sowie aus Auswertungen kanadischer Unfallstatistiken [1], ist ein erhöhtes Risiko von schweren oder sogar tödlichen Verletzungen in solchen Szenarien.

## 2. Ausgangssituation – Intelligente Fahrzeuge im heterogenen Mobilitätsumfeld

Zahlreiche Fahrzeughersteller, etablierte IT-Unternehmen und auch Start-Ups entwickeln derzeit an vollautonomen Fahrzeugen. Schon heute finden sich viele Modelle mit Assistenzsystemen zum automatischen Bremsen, Spurhalten, Abstand halten oder Ähnlichem. Die Vision ist, dass in einem vollautonomen Mobilitätsumfeld Unfälle mit Personenschaden der Vergangenheit angehören. Selbst bei reiner Neuzulassung von vollautonomen Fahrzeugen wird es einen langen Übergangszeitraum mit Mischverkehr, also der Verkehr von autonomen und nicht autonomen Fahrzeugen auf den Straßen, und dadurch auch den Risikofaktor Mensch geben. Darüber hinaus sind die flächendeckende Überwachung der Infrastruktur und die damit ermöglichte Kommunikation zwischen Fahrzeug und beispielsweise einer Kreuzung mittelfristig alleine aus finanziellen Gründen kaum vorstellbar. Selbst in einem vollautonomen Mobilitätsumfeld besteht weiterhin die Möglichkeit durch äußere, unvorhersehbare Einflüsse in einen Unfall verwickelt zu werden.

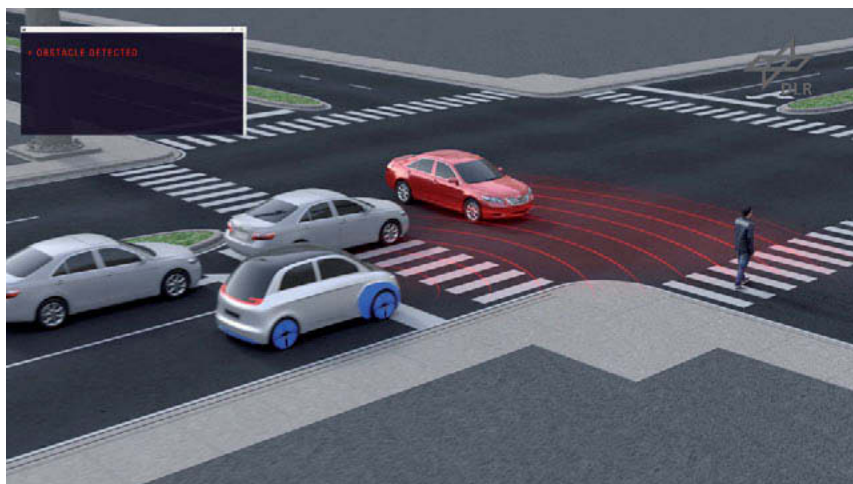


Bild 2: Szenario im Mischverkehr: Autonomes Fahrzeug trifft auf Fahrzeug mit Fahrer

In Bild 2 ist ein Szenario aus dem Mischverkehr abgebildet. Das autonome Fahrzeug erkennt trotz umfangreicher Sensorik ein vom abbiegenden Verkehr verdecktes Fahrzeug zu spät. Der Fahrer des roten Fahrzeugs übersieht eine rote Ampel und kommt vor dem Fußgänger zum Stehen. Das autonome Fahrzeug kann nicht ausweichen oder vollständig abbremsen. Es kann jedoch kurz vor dem Aufprall über Bilderkennungsalgorithmen noch das Fahrzeugmodell bzw. eine steife und feste Struktur identifizieren.

### 3. Zielsetzung- Bessere Nutzung von robusten Karosseriesegmenten bei Kollisionsszenarien

Ein Ansatz, um die Kompatibilität von Fahrzeugen unterschiedlicher Masse zu verbessern, ist die aktive Steuerung der Energieabsorption während einer Kollision. In Abhängigkeit der kinetischen Energie und der Trajektorien, also der Bewegungsrichtungen der beteiligten Fahrzeuge, sowie der Identifizierung und Ansteuerung von geeigneten, belastbaren Strukturen, soll die Energieumwandlung derart gesteuert werden, dass für alle beteiligten eine möglichst geringe Verzögerung resultiert und geringstmögliche Intrusionen in die Fahrgastzelle vorkommen. Für das Beispiel eines Seitenaufpralls wurden in Bild 3 bevorzugte Zonen für einen Aufprall dargestellt.

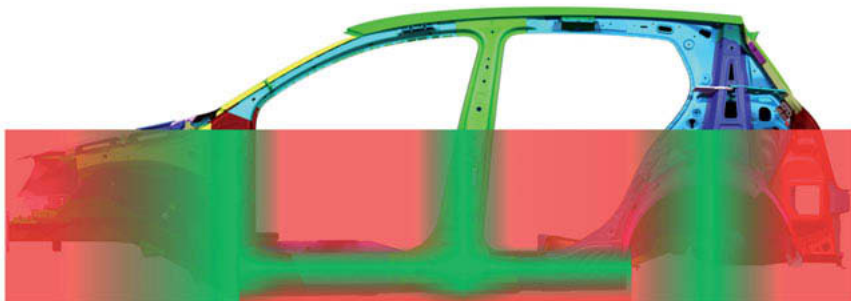


Bild 3: Bevorzugte Zonen bei seitlicher Kollision (Grün bevorzugt, rot nicht bevorzugt) (Bild SLC Golf Karosserie)

In Grün sind alle Strukturen markiert, bei denen mit geringer Verformung bei hohen Lasten während eines Seitenaufpralls zu rechnen ist. Es sind Areale, die häufig aus hochfesten bzw. ultrahochfesten Stählen bestehen, wie die B-Säule. Dem gegenüber stehen Areale in Rot, bei

denen bei hoher Last mit großer Verformung zu rechnen ist, oder, die weit von der Fahrzeughochachse entfernt sind und dadurch bei Kollision eine impulsartige Rotation des Fahrzeugs initiieren.

Mit aktiven Energieabsorbern ließe sich in einem solchen Seitenaufprallszenario eine asymmetrischer Verteilung der Energieumwandlung realisieren. Bild 4 zeigt exemplarisch eine solche Einstellmöglichkeit. In diesem Szenario wurde mit dem linken aktiven Energieabsorber die B-Säule gezielt getroffen. Das Kraftniveau kann aufgrund der steifen und festen Struktur höher eingestellt werden. Dem gegenüber wird auf der rechten Seite die Tür getroffen. Zwar befindet sich in der Regel ein Türquerträger an dieser Stelle, doch kann dieser die hohen Lasten nur bedingt ertragen. Ein niedrigeres Kraftniveau soll dafür sorgen, dass im Türbereich eine geringere Intrusion entsteht und dadurch mögliche Verletzungen reduziert werden. Insgesamt ist das Kraftniveau bei beiden Energieabsorbern jedoch geringer als das heute bei einem fest ausgelegten Vorderwagen vorhandene maximale Kraftniveau, da der Aufprall gegen ein Fahrzeug weniger gravierend ist als der Aufprall gegen eine starre Wand auf welche die Energieabsorber sonst ausgelegt sind.

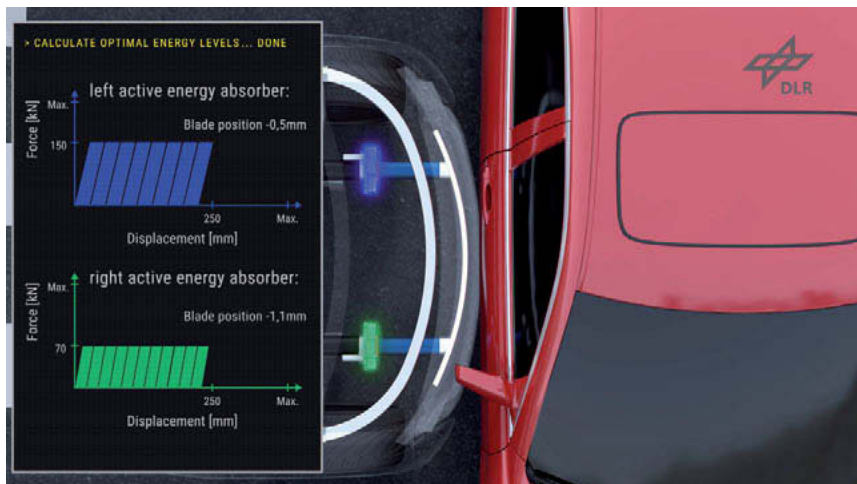


Bild 4: Asymmetrische Kraftniveaus beim Seitenaufprall mit aktiven Energieabsorbern

Ein solches System dient aber keineswegs lediglich dem Schutz der Unfallgegner im hier roten Fahrzeug. Ein Fahrzeug, das auf die kinetische Energie in Testszenarien, wie sie vom EURO NCAP festgelegt sind, ausgelegt ist, nutzt die Längsträger um die kinetische Energie bei beispielsweise 64km/h durch Faltenbeulen abzubauen. Ist das Fahrzeug aber im realen Umfeld

mit geringerer Geschwindigkeit unterwegs, ergibt sich daraus ein unnötig hoher Impuls auf den Insassen, der je nach körperlichem Zustand zu Verletzungen führen kann. In einem solchen Szenario würde das aktive System die Energieumwandlung so steuern, dass ein größerer Teil der Vorderwagenstruktur verformt wird.

#### 4. Methodischer Ansatz zur Entwicklung eines aktiven Energieabsorbers

Basierend auf vorangegangene Entwicklungen am DLR Institut für Fahrzeugkonzepte und dabei durchgeführten KT-Entscheidungsanalysen zur Machbarkeit von aktiven Fahrzeugfrontstrukturen, wurde die Zerspanung als energiewandelndes Prinzip favorisiert [4]. In Bild 5 ist das Funktionsprinzip der Zerspanungsabsorber dargestellt. Durch das teleskopartige zusammenschieben zweier Rohre wird über eine Ringschneide die Oberfläche des eingeschobenen Rohrs abgeschält. Die Schneide ist mit dem Rohr größeren Durchmessers fest verbunden. Der Durchmesser der Schneide an der Schnittkante entspricht dem eines Absatzes am zu zerspannenden Rohr (Bild 5 links). Eine Führung im Inneren ermöglicht das Abgleiten ohne Verkanten. In Bild 5 (rechts) sind die Demonstratoren eines passiven Zerspanungsabsorbers dargestellt. Der schwarz eloxierte Teil ist feststehend und mit der Fahrgastzelle verbunden. Blau wird die Hauptabsorptionsstufe dargestellt, in Rot die Crashbox.

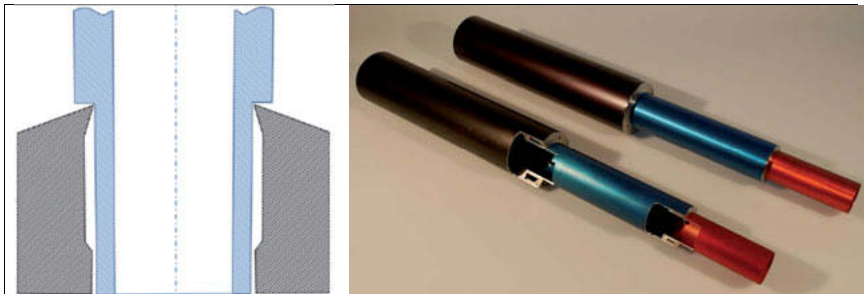


Bild 5: Funktionsprinzip des Zerspanungsabsorbers in einer Schnittdarstellung (links) und zweistufige Zerspanungsabsorber (rechts) [2]

Die Zerspanung als energiewandelndes Prinzip bietet Vorteile gegenüber dem klassischen Prinzip des Faltenbeulens. Bezieht man die gewandelte Energie auf das Gewicht, erhält man beim Faltenbeulen mit Stahlwerkstoffen spezifische Energieabsorptionsraten zwischen 10 - 17 kJ/kg [5] und bei Aluminiumwerkstoffen zwischen 19 - 32 kJ/kg [6]. Beim Zerspanen liegt die spezifische Energieabsorption zwischen 50 - 70 kJ/kg [4]. Die passiven Zerspanungsabsorber, ohne zusätzliche Aktuatorik, können also als Leichtbaulösung bezeichnet werden.

Bei aktiven Energieabsorbern mit Zerspanprinzip, wie sie in Bild 6 abgebildet sind, wird die Schneide in Segmente aufgeteilt. Jedes dieser Segmente kann durch eine zentrale oder individuelle Aktuatorik und eine Getriebereinheit bewegt werden. Es wurden verschiedene Vorversuchsreihen durchgeführt, um die beim Zerspanen mit segmentierter Ringschneide entstehenden Axial- und Radialkräfte zu ermitteln. Es handelte sich hierbei, mit 4 cm/s, um sehr langsame Versuche. Dabei ist zu beachten, dass das Zerspanen von Aluminium geschwindigkeitsabhängig ist. Bei hoher Zerspangeschwindigkeit sinkt die Axialkraft aufgrund der Materialerwärmung bis zu einem konstanten Wert ab. Sinkt die Zerspangeschwindigkeit, verfestigt sich das Material und die Axialkraft steigt an. Daraus folgt, dass sich aus einer Versuchsreihe mit sehr langsamer Geschwindigkeit die maximal zu erwartenden Axial- und Radialkräfte ergeben. Weiterhin wurde innerhalb dieser Versuchsreihe die Optimierung der Schneidengeometrie durchgeführt, sodass die Radialkräfte auf ein vorläufiges Minimum reduziert werden konnten. Dies ist insbesondere wichtig, wenn durch eine hochperformante Aktuatorik während der Kollision die Zerspantiefe nachgeregelt werden soll. In Anbetracht des Zeitraums von wenigen Millisekunden, in der eine Unfallsituation stattfindet, ist eine axialkraftabhängige Nachregelung jedoch eine große technische Herausforderung und vom Standpunkt einer Kosten-Nutzen-Betrachtung zunächst nicht zu priorisieren. Des Weiteren führt die Minimierung der Radialkräfte zu kleineren Anbauteilen, wie die Getriebereinheit oder Führungen, und somit zu einer Reduzierung des Gewichts des Gesamtsystems.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde die ausgewählte elektromechanische Aktuatorik geprüft, um die angedachte Funktionsweise zu validieren. Hier wurde eine Getriebereinheit mit einem hochdrehenden Elektromotor gekoppelt. Die Radialkraft wurde durch eine Tellerfeder abstrahiert. Diese weist näherungsweise die Kraft-Weg Kennlinie auf, die durch das Zerspanen mit unterschiedlichen Zerspantiefen entsteht. Ergebnis dieser Versuche war, dass diese Aktuatorik einen Weg von 1,5 mm innerhalb von 130 ms gegen eine Kraft von ca. 7000 N zurücklegen kann.

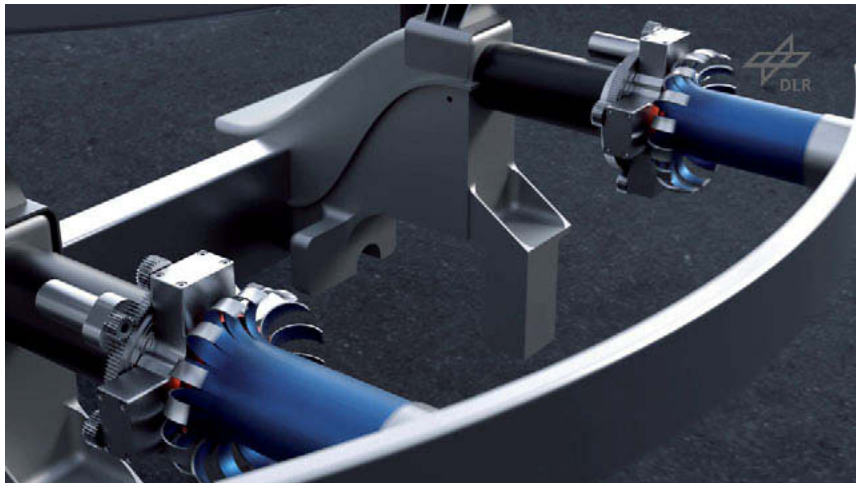


Bild 6: Aktive Energieabsorber beim Zerspanen

### 5. Validierung der aktiven Energieabsorber

Die Validierung des Gesamtkonzepts wurde auf der dynamischen Komponentenprüfanlage am Institut für Fahrzeugkonzepte durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Bild 7 dargestellt. Der Aktuator treibt ein auf einem Kugellager gelagertes Zahnrad an. Dieses treibt gleichzeitig alle vier Getriebeboxen an, damit alle Schneiden simultan auf dieselbe Zerspantiefe gebracht werden können. Innerhalb der Getriebeboxen wird die Rotationsbewegung durch eine spezielle, kraftausgelotete Vorrichtung in die Zustellbewegung umgesetzt.

Laser 1 nimmt die absolute Bewegung einer Schneide auf, um die durch die Kraftmesszelle gemessenen Axialkräfte einer absoluten Zerspantiefe zuordnen zu können. Lasersensor 2 misst den Abstand zwischen dem Zerspanungsabsorber und dem herannahenden Schlitten. Die Steuerung für diesen ersten Demonstrator wurde mit einer für diese Anwendung entwickelte Steuereinheit realisiert. Die Software kann aus dem Abstandssignal mithilfe der Schleifendurchlaufzeit der zugehörigen Programmschleife eine Geschwindigkeit errechnen. Es ist somit möglich in Abhängigkeit einer Geschwindigkeit und einem kritischen Abstand das System auszulösen.

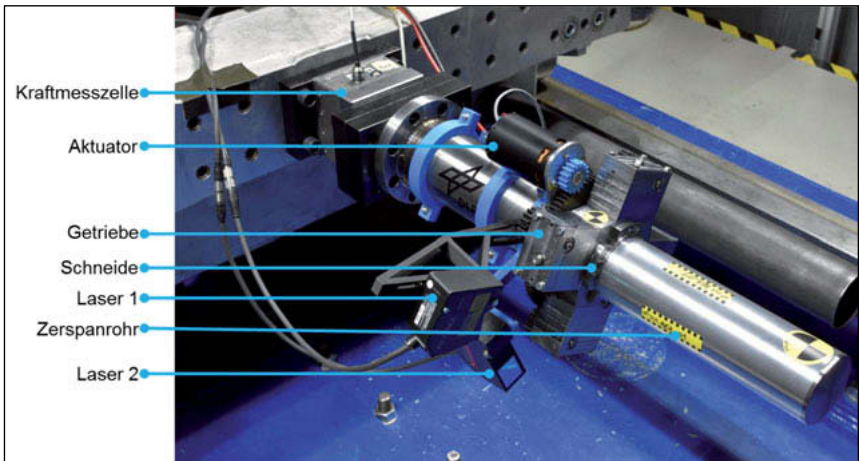


Bild 7: Proof of Concept – Technologie-Demonstrator (Version 1)

Bisher sind in diesem Versuchsprogramm 5 Stufen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit vorgesehen. Eine feinere Unterteilung ist aus softwaretechnischer Sicht aber ebenfalls möglich. Der Impaktorschlitten mit einer Masse von ca. 475 kg wurde für diesen Versuch auf 5,6 m/s beschleunigt. Daraus ergibt sich eine kinetische Energie von 7,45 kJ, die vom System über den Weg von 232 mm umgewandelt wurde. Dabei wurden die Schneiden um 1,1 mm, von maximal 1,5 mm, radial geöffnet (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Kurzzusammenfassung der Testparameter

Masse	Geschwindigkeit	Resultierende	Zustelldauer	Zerspan-	Zerspan-
Schlitten	Schlitten	Energie	Absorber	tiefe	weg
475 kg	5,6 m/s	7,45 kJ	100 ms	-1,1 mm	232 mm

Bild 8 zeigt den aktiven Energieabsorber nach erfolgreichem Versuch auf der dynamischen Komponentenprüfanlage. Das zu zerspanende Rohr wurde, bis auf den im Testbetrieb vorgeesehenen Sicherheitsbereich, komplett zerspannt.





Bild 8: Proof of Concept – Aktiver Energieabsorber nach dynamischem Versuch

Angemerkt sei an dieser Stelle, dass das System in keiner Form durch Signale von der Prüfanlage ausgelöst wurde. Die Auslösung aller Reaktionen basieren rein auf der Verarbeitung systeminterner Sensordaten. Lediglich die Messungen der Axialkraft und der absoluten Position einer Schneide erfolgen durch die Anlage. Es ist hier also erstmals gelungen, einen aktiven Energieabsorber mit Zerspanprinzip dynamisch im autarken Betrieb zu validieren.

## 6. Zusammenfassung des Erreichten und Ausblick

Aufbauend auf der Technologie des adaptiven Vorderwagens (passive Zerspanungsabsorber) wurde ein System entwickelt und erfolgreich getestet, mit dem es nun möglich ist, die Energieabsorption vor einer Kollision an die detektierte Unfallsituation anzupassen.

Nach der Entwicklung mehrerer Konzepte und anschließender Auswahl, wurden umfangreiche Vorversuche im Bereich der Schneidoptimierung und der Aktuatorik durchgeführt. Anhand der gewonnenen Daten konnte dann das System mit der entsprechenden Steuerung ausgelegt werden. Die für eine vollständige Einstellung benötigte Zeit liegt dabei im Bereich von einer Zehntelsekunde. Es ist nun möglich, unter Verwendung der aus Fahrzeug-internen Sensoren erhobenen Daten, den Impuls auf den Insassen, abhängig von resultierender kinetischer Energie und Art des Hindernisses, auf ein nötiges Minimum zu reduzieren. Dies beinhaltet nicht nur die Verbesserung beim Auftreffen auf starre Barrieren, sondern kann ebenfalls die Kompatibilität zwischen Fahrzeugen unterschiedlichen Gewichts bei Frontalkollisionen verbessern. Außerdem könnte bei Kollisionen im Fahrzeug-Seitenbereich, durch intelligentes einlenken und

ansteuern fester und steifer Strukturen, in Kombination mit einer darauf abgestimmten Einstellung der Energieabsorption, neben der Minderung des Impulses auf die Insassen ebenfalls die Verformung von schwächeren Strukturen reduziert werden. Somit ist es gelungen ein System zu entwickeln, dass für alle, an einer Kollision beteiligten Personen, Vorteile bietet.

Im fortlaufenden Projekt sollen nun, auch mit Partnern aus der Industrie, verschiedene Optimierungen bezüglich des Systemgewichts und des Bauraums folgen. Außerdem wurden bereits verbesserte Konzepte zur Aktuatorik und zur Steuerung entwickelt. Zusätzlich soll die Sensorpalette mit weiteren, unterschiedlichen Sensoren erweitert werden um eine redundante, robuste Datenerfassung zu gewährleisten. Die Verarbeitung der Daten, sowie die Einschätzung der Gefahrensituation soll in zukünftig entstehenden Systemen über neuronale Netze erfolgen.

## 7. Quellen

- [1] Fredette M. et al.: „Safety impacts due to incompatibility of SUVs, minivans, and pickup trucks in two-vehicle collisions“, Accident Analysis and Prevention, Volume 40, Issue 6, S. 1987 – 1995, 2008
- [2] Insurance Institute for Highway Safety: „Side Impact Crashworthiness Evaluation Crash Test Protocol (Version V)“, Mai 2008, Internet Download: [http://www.iihs.org/ratings/protocols/pdf/test\\_protocol\\_side.pdf](http://www.iihs.org/ratings/protocols/pdf/test_protocol_side.pdf)
- [3] AUTOBILD. Crashtest Audi Q7 vs. Fiat 500 - Q7 frisst Fiat 500. Online-Quelle: <http://www.autobild.de/artikel/crashtest-audi-q7-vs.-fiat-500-751953.html>, 2008
- [4] Beeh, E. G. Entwicklung einer neuartigen crashadaptiven Vorderwagenstruktur für Fahrzeuge mit alternativen Antriebsvarianten. Dissertation. Stuttgart, 2014
- [5] Bruhnke, U. Vorlesung Karosserietechnik WS 06/07. Universität Stuttgart, 2006
- [6] FELDSCHEID, A. & TIMM, H. Patent: Vorderer Längsträger für ein Kraftfahrzeug mit Strangpressprofilen aus Leichtmetall. Patentnummer: DE42244489C3, 2002

## **Accidents caused by Health Problems and Counter Measures as a part of Occupant Safety Monitoring**

### **Bio vital data acquisition and interpretation expand Integrated Safety**

**Harald Feifel, Jad Haber**, Continental Frankfurt;  
**Andreas Forster**, Continental, Regensburg;  
**Vishal Muralidharan, Sreelakshmi Narasimhan**, Bangalore, India

#### **Zusammenfassung**

Die zunehmende Automatisierung der Fahrfunktionen, mit denen ab Level 3 auch der Einsatz von neuen Innenraumsensoren und -funktionen notwendig werden wird, schreitet voran. Je höher der Grad der Automatisierung, desto mehr werden die Insassen von den üblichen Fahraufgaben entlastet, und sie werden bei aktivierten Automatisierungsfunktionen ihre zusätzliche Bewegungsfreiheit im Innenraumbereich nutzen. Die so entstehenden veränderten Sitzpositionen können passive Rückhaltesysteme, wie gegenwärtige Airbags, ineffektiv machen. Infolgedessen müssen die heutzutage genutzten Sicherheitsmaßnahmen an die neuen Herausforderungen anpassbar gestaltet werden. Dafür ist eine genaue und zuverlässige Positionserkennung der Insassen notwendig. Continental arbeitet an der Entwicklung von solchen Technologien, welche die Position der Insassen erfassen, um dementsprechend die passiven Sicherheitssysteme zu adaptieren. Einerseits werden bereits im Fahrzeug integrierte Sensoren, wie die Innenraumkamera und im Sitz integrierte Detektoren benutzt, darüber hinaus wird das System um zusätzliche Parameter erweitert. All diese und weitere Sensoren werden außerdem für die Gesundheitsüberwachung des Fahrers eingesetzt, um zusätzliche sicherheitskritische Situationen zu vermeiden. Das System erkennt zum Beispiel, wenn der Fahrer geistig abwesend oder bewusstlos ist, und löst aktive Sicherheitsmaßnahmen aus. In diesem Fall aktiviert die Automation ein „Minimum Risk Maneuver“, bei dem das Auto auf sichere Weise zum Stillstand kommt. In einem gesundheitskritischen Fall kann das Fahrzeug auch zusätzlich Informationen an die Rettungsdienste senden, um eine schnelle und angemessene Versorgung zu ermöglichen. Herausforderungen bestehen darin, diese Informationen robust und sicher zu erhalten, um „false positives“ und „false negatives“ zu minimieren. Die Occupant Safety Monitoring Technologie kann deshalb in doppelter Hinsicht Leben retten: die Reduzierung

der Verletzungen im Crash-Fall für hochautomatisierte Fahrzeuge und die Vermeidung von Unfällen, wenn der Fahrer fahrunfähig ist.

### **Abstract**

Higher vehicle automation levels (Automated Driving, AD), which will necessitate new interior sensors and interior functions from AD Level 3 and onwards, are continually advancing. As the automation level gets higher, the occupants gain more freedom from the regular driving task. While the automation is active, vehicle occupants will want to make use of their greater choice of position in the interior. Resulting sitting positions can render restraint systems such as current airbags inefficient. Therefore, the safety measures currently in use need to be made adaptable to new challenges. The starting point for that is to reliably detect the actual position of the occupants. Continental is currently developing suitable technologies to detect the occupant position and to use this information for adapting the passive safety systems to the situation. A part of the data comes from sensors that are already integrated in cars, such as the interior camera, and seat sensors. However, the system is being expanded by adding new parameters. This set of sensors plus additional ones are also used to monitor the health state of the driver with the aim to avoid even more safety-critical situations. For instance, the system will recognize it, if the driver is mentally absent or unconscious and active safety measures will be triggered. In the case of an incapacitated driver, the "Minimum Risk Maneuver" will be initiated, which brings the car to a safe state by stopping. If a serious health condition is detected, the vehicle can also transmit information to first responders to ensure that fast and adequate treatment can be administered in an optimized way. The challenges lie in acquiring this information in a robust and reliable way to minimize "false positives" and "false negatives". So, the Occupant Safety Monitor (OcSM) can save lives in a twofold way: On the one hand by reducing the severity of injuries caused by a crash involving an automated vehicle; On the other hand, by avoiding accidents in situations when the driver is no longer capable of controlling the car.

### **1. Automatisiertes Fahren als disruptive Technologie für Innenraumkonzepte**

In heutigen Fahrzeugen ist die Sitzposition von Fahrer und Passagieren in engen Grenzen festgelegt. Damit gibt es eine eindeutige Standardposition, auf die die jeweiligen Rückhaltemittel der passiven Sicherheit ausgelegt sind. Abweichende Positionen (sog. Out-of-Position, OoP Situationen) sind die Ausnahme. In automatisierten Fahrzeugen (Automated Driving, AD) der Leistungsstufe SAE/VDA Level 3 oder höher wird sich das grundlegend verändern. Solange die Automation aktiviert ist, gewinnt auch der Fahrer neue Freiheiten, anderen Tätigkeiten als der Fahraufgabe nachzugehen. Für künftige automatisierte Fahrzeuge sind daher neue

Innenraumkonzepte zu erwarten, die dem Fahrer und den Beifahrer größere Bewegungsfreiheit geben, etwa dergestalt, dass sie sich einander zuwenden können (z.B. Swivel Seats). Entsprechende Konzeptfahrzeuge großer OEM zeigen, wohin die Reise hier aller Wahrscheinlichkeit nach gehen kann (Bild 1).



Bild 1: Das Forschungsfahrzeug Mercedes-Benz F015 Luxury in Motion bietet ein Beispiel für ein innovatives Innenraumkonzept mit größerer Bewegungsfreiheit für die Insassen [1]

Damit entwickelt sich die OoP-Situation von der Ausnahme zur Regel. Hinzu kommt, dass die Freiheit während des AD anderen Tätigkeiten nachzugehen auch die Nutzung von mobilen elektronischen Geräten einschließen wird. Damit befinden sich möglicherweise Objekte (Tablet, Laptop, Smartphone) zwischen Rückhaltemittel und Insasse, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Noch anspruchsvoller wird die Varianz der möglichen Insassenposition bei hoch automatisierten bzw. autonomen Fahrzeugen ohne Bedienelemente, sogenannten fahrerlosen Fahrzeugen wie RoboTaxis. Hier muss man bei der Konzeption der Rückhaltemittel davon ausgehen, dass Passagiere in jede beliebige Richtung orientiert sein können, womöglich sogar stehen (Bild 2).



Bild 2: Mögliche Bewegungsfreiheit in einem fahrerlosen Fahrzeug, wie beispielsweise einem RoboTaxi bzw. einem Pkw mit Swivel Seats [2]

Da AD-Fahrzeuge nach heutigem Verständnis zugleich elektrifizierte Fahrzeuge mit Unterflurbatterie und kompaktem elektrischen Antrieb sein werden, besteht die Möglichkeit, den Fahrzeuginnenraum auszudehnen, so dass die Überhänge und damit auch mögliche Crash-Zonen kleiner werden, was die Situation für die passive Sicherheit noch anspruchsvoller macht.

Vor diesem Hintergrund völlig neuer Freiheitsgrade für die Insassen ist es klar, dass starr positionierte und damit in ihrer Wirkrichtung begrenzte Rückhaltemittel bei Unfällen mit AD-Fahrzeugen keinen optimalen Schutz für die Insassen mehr bieten können.

**Zwischenfazit:** Will man bei AD-Fahrzeugen  $\geq$ Level 3 für den bestmöglichen Schutz der Insassen (Occupant Safety) bei einem Unfall sorgen, so ist es künftig erforderlich, die **tatsächliche Position** (räumliche Orientierung, Neigung des Oberkörpers, vorhandene Objekte) jedes Insassen festzustellen und den **Zeitpunkt und die Art der Aktivierung von Rückhaltemitteln** an die erkannte Position anzupassen. Je mehr Freiheit Fahrer und Passagiere in neuen Innenraumkonzepten bekommen, desto wichtiger wird diese Überwachung (Monitor) als **Schlüsselinformation für die passive Sicherheit**.

## 2. Occupant Safety Monitor als Schlüssel zu adaptiver passiver Sicherheit

Heute dienen Daten aus der Erfassung des Fahrzeugumfelds mittels Sensoren dazu, Elemente der passiven Sicherheit an den erkannten Unfalltyp (z.B. Seitenaufprall) anzupassen und Rückhaltemittel entsprechend zu zünden. Über die Insassen und deren Position ist dagegen nur wenig bekannt. Als ein Beispiel kann ein weites Vorbeugen des Beifahrers (OoP) ggfs.

über die Gewichtsverteilung auf der Sitzfläche erkannt werden und die Füllgeschwindigkeit sowie der Füllgrad und damit die Härte des Airbagaufpralls angepasst werden. Um solche ersten Anpassungen für die künftige Bewegungsfreiheit der Insassen systematisch auszubauen, entwickelt Continental den Occupant Safety Monitor (OcSM). Dieses System erweitert die Erfassung wichtiger Zustandsdaten auf das Fahrzeuginnere und komplettiert damit die Datenbasis für die passive Sicherheit, die bisher nahezu ausschließlich aus dem Umfeld des Fahrzeugs stammt. Neben der Innenraumkamera spielt dabei eine in die Sitze integrierte Sensorik eine zentrale Rolle.

Der OcSM erkennt die Position aller Insassen in ihren Sitzen. Dazu gehört die Ausrichtung der Körperfront, die Neigung der Rückenlehne und die Drehrichtung des Kopfes. Damit stehen wichtige Informationen (etwa über den Abstand vom Kopf zum Airbag) zur Verfügung. Die Sensordaten (Kamera, Sitz) werden auf einer eigenen Abstraktionsebene vernetzt, die es erlaubt, weitere Sensorarten in das System einzubinden. Die Sensordaten durchlaufen einen Fusionsalgorithmus und fließen in ein Insassenmodell ein, das eine Typisierung der einzelnen Insassen vornimmt (z.B. Kind oder Erwachsener), das einen Kindersitz bzw. eine Babyschale erkennt, das die Lage des Sitzgurtes erkennt und auch erkennt, ob das Gurtschloss evtl. missbräuchlich geschlossen wurde (z.B. durch Hinterstecken), um der Gurtschlosssensorik falsche Tatsachen vorzuspiegeln. Mittels des durch den OcSM erfassten Daten kann die Entscheidung gefällt werden, welcher Airbag gezündet werden soll, zu welchem Optimalzeitpunkt und mit welchem Druck.

Den Ausgangspunkt für den OcSM bildet das bereits in Serie befindliche Driver Monitoring. Eine speziell für den Einsatzzweck der Fahrerüberwachung weiter entwickelte Infrarotkamera (IR im Bereich 850 nm oder 940 nm) dient dazu, die Kopfposition und -ausrichtung zu erkennen, die Lidbewegungen (Müdigkeit), den Sektor, auf den die Augen fokussiert sind sowie den Fahrer selbst als Person zu identifizieren. Für AD-Fahrzeuge ist die Innenraumkamera mit Blick auf den Fahrer unverzichtbar, um zu erkennen, ob der Fahrer am Ende eines AD-Fahrabschnittes überhaupt in der Lage ist, die Fahraufgabe im Zuge einer geordneten und zügigen Rückdelegation vom Automaten an den Menschen wieder zu übernehmen.

Für die Ausweitung der Fahrerüberwachung zum OcSM und damit auf alle Insassen setzt die laufende Entwicklung unter anderem auf 3D Time-of-Flight Kameras, mit denen die Erkennung der Körperlage, die Position von Gliedmaßen und die Anwesenheit von Objekten im Innenraum gelöst wird. Weitere Sensorarten werden auf ihr Potenzial hin untersucht. Sensorsysteme auf Basis von Terahertzwellen beispielsweise sind möglicherweise geeignet, um Ge-

sundheitsparameter wie Atmung und Herzschlag zu erkennen. Die Entwicklung der Auswertungselektronik (Integrated Circuits, ICs) ist hier allerdings noch nicht so weit fortgeschritten, wie bei derameratechnik.

**Zwischenfazit:** Der OcSM ermöglicht es, die passive Sicherheit situationsgerecht zu optimieren, indem die Rückhaltemittel angepasst an die **Position** der Insassen ausgelöst werden. Dies wird desto wichtiger, je größer die Bewegungsfreiheit der Insassen im Fahrzeuginnenraum ist. Im Hinblick auf den Fahrer dient die Sensortechnik dazu, festzustellen, ob er/sie in der **Verfassung** ist, die Fahraufgabe zu erfüllen. Dieser Fall kann entweder am Ende eines AD-Fahrabschnittes auftreten oder auch während des manuellen Fahrens.

### 3. Die Bedeutung von Gesundheitsproblemen für die Verkehrssicherheit

Statistische Zahlen des Statistischen Bundesamtes [3] sowie der „German In-Depth Accident Study“ [4] für die Jahre 2005 bis 2018 zeigen, dass 14 % aller tödlichen Unfälle nachweislich durch eine beeinträchtigte Verfassung des Fahrers verursacht wurden. Den größten Einzelanteil innerhalb dieser Kategorie Driving Fitness hat der Einfluss von Alkoholisierung sowie Drogenkonsum. In einem Drittel der Fälle sind jedoch andere körperliche oder geistige Unzulänglichkeiten Unfallursache. Insgesamt lassen sich 5,6 % aller tödlichen Verkehrsunfälle auf gesundheitliche Probleme der Fahrzeugführer zurückführen [3, 4]. Bild 3 und Bild 4 zeigen die Aufschlüsselung. Nach dieser Statistik hätten sich im Jahr 2017 durch eine Erkennung von Gesundheitsproblemen des Fahrers und durch geeignete Gegenmaßnahmen 138 Verkehrstote und 2.886 Verletzte vermeiden lassen [3, 4].



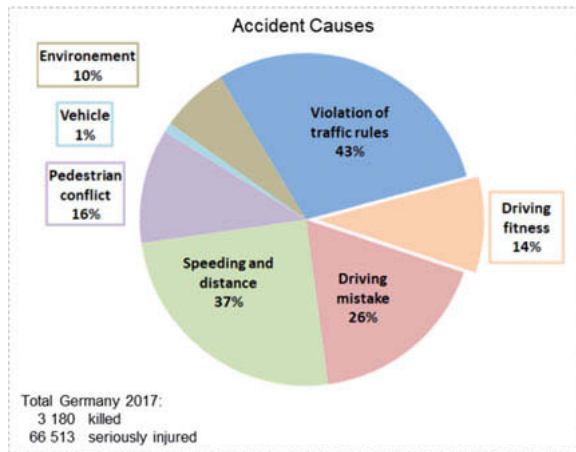


Bild 3: Ursachen von Verkehrsunfällen [2, 3]

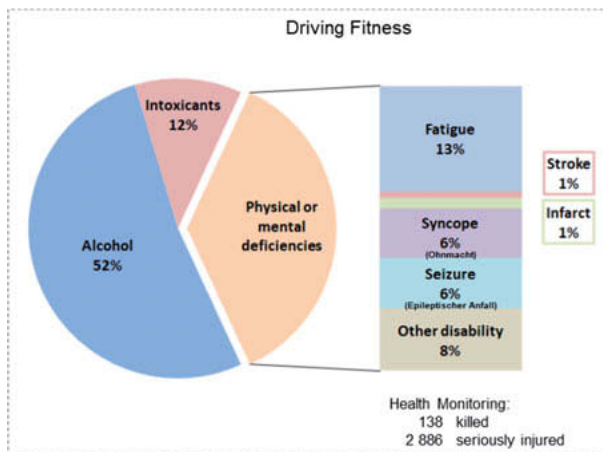


Bild 4: Verkehrsunfälle aufgrund gesundheitlicher Probleme [2, 4]

Den größten Einzelanteil gesundheitlicher Probleme innerhalb der Kategorie „Driving Fitness“ hat demnach Müdigkeit des Fahrers („Fatigue“, „Drowsiness“, „Sekundenschlaf“). Ohnmacht („Syncope“), epileptische Anfälle („Seizure“) und andere tragen zu annähernd gleichen Teilen

bei. Schlaganfall („Stroke“) und Herzinfarkt („Infarkt“) sind zwar vergleichsweise selten, insgesamt aber können gesundheitsbedingte Komplettausfälle des Fahrers zu dramatischen Unfallverläufen führen Bild 5.



Bild 5: Beispiel für einen Unfall durch Kreislaufkollaps eines älteren Fahrers [5]

Man sollte in diesem Zusammenhang bedenken, dass die offiziellen Zahlen gerade im Hinblick auf Müdigkeit als Unfallursache womöglich nur die Spitze des Eisbergs darstellen, weil vermutlich nur wenige Fahrer diesen Fehler zugeben, um keine Nachteile bei der rechtlichen Aufarbeitung des Unfalls zu riskieren. Insbesondere bei (monotonen) Autobahnfahrten kann Müdigkeit eine wichtige Unfallursache sein. Die Überwachung des Fahrerzustands wäre hier eine große Hilfe. Speziell im Hinblick auf Lkw-Fahrer ist zudem die drohende Unfallschwere bei einem Ausfall des Fahrers zu bedenken.

Hinzu kommt, dass das Alter des Fahrers ebenfalls Einfluss auf die Unfallhäufigkeit hat und man zumindest einen Teil des statistisch sichtbaren Trends bei älteren Fahrern in Bild 6 auch auf eine verminderte Leistungsfähigkeit und häufigere Gesundheitsprobleme zurückführen kann. Die Säulengrafiken beruhen auf einer internen Auswertung der DESTATIS Unfallstatistik für das Jahr 2017 [3].

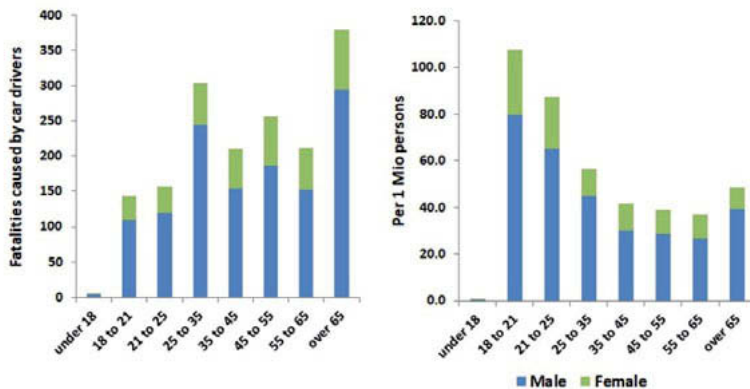


Bild 6: Von Pkw-Fahrern verursachte Unfälle nach Lebensalter [3]

**Zwischenfazit: Gesundheitliche Ursachen** bilden einen **statistisch relevanten Anteil** am gesamten Unfallgeschehen, für den es bisher noch keine technische Lösung gibt. Wegen der möglichen Unfallschwere bei einer Ohnmacht oder bei einem Sekundenschlaf des Fahrers insbesondere auf Autobahnfahrten, spielt die Erkennung der Verfassung des Fahrers eine wichtige Rolle, um die Ziele der „**Vision Zero**“ zu erreichen. Die zunehmende **Überalterung** der Gesellschaft speziell in Westeuropa und Japan gibt möglichen Gesundheitsproblemen am Steuer als Unfallursache **wachsende Bedeutung**.

Der OcSM ist damit grundsätzlich ein Beitrag zur passiven Sicherheit, weil Unfallursachen wie Müdigkeit (Sekundenschlaf) oder medizinische Probleme erkannt und ihre Folgen vermieden bzw. gemindert werden können. Die Euro NCAP 2025 Roadmap sieht daher auch ab dem Jahr 2020 ein Driver Monitoring mit dem Ziel der Erkennung des Fahrerzustands (z.B. „Drowsiness Recognition“) vor [6]. Zusätzlich lässt sich mit OcSM bei einem Unfall die passive Sicherheit aller Insassen optimieren. Nach einem Unfall können Gesundheitsinformationen an Ersthelfer geschickt werden, um eine gezielte Behandlung zu unterstützen.

#### 4. Erkennung von Gesundheitsproblemen als Teil des Occupant Safety Monitor: ein Schritt voran in Richtung Vision Zero

Der OcSM erkennt die Position der Insassen im Fahrzeug und verbessert damit die Datengrundlage für den adaptiven Insassenschutz im Crash-Fall. Kombiniert man den OcSM mit

einem weiteren System, das die Funktion erfüllt, zusätzlich Informationen über die gesundheitliche Verfassung der Insassen (vorrangig natürlich der des Fahrers) bereitzustellen, so sinkt das Risiko, dass vom Ego-Fahrzeug eine Gefahr für andere Fahrzeuge und die Insassen ausgeht. Beide Systeme und ihre Funktionen decken also bisher nicht ausreichend behebbare Verletzungsursachen ab und gehören damit zu den Lösungsbausteinen auf dem Weg zum unfallfreien Fahren bzw. zum Straßenverkehr ohne Verkehrstote (Vision Zero).

Integriert man die Erkennung von möglichen Gesundheitsproblemen des Fahrers in den OcSM, so lassen sich potenziell schwere Unfälle vermeiden, die ohne dieses Monitoring vom Ego-Fahrzeug ausgehen würden. Die erforderliche Sensorik besteht zum Teil aus bereits für den OcSM vorgesehenen Sensoren (etwa der Innenraumkamera), zum Teil aus neuen Sensorarten, die momentan erst auf ihre jeweilige Eignung für den geplanten Fahrzeugeinsatz untersucht werden. Grundsätzlich ist die Ausgangsbasis für diese neue Form der Occupant Safety günstig, weil zumindest manche Gesundheitsindikatoren bereits seit Jahrzehnten sowohl in der Medizin als auch in Wearables beispielsweise für ein gesundheitlich optimiertes sportliches Training verwendet werden [7].

#### **4.1. Art der im Konzept vorgesehenen Diagnosen und Anwendungsfälle**

Wie in Bild 3 dokumentiert, gibt es bestimmte, statistisch relevante gesundheitliche Zustände des Fahrers, die vorrangig unfallursächlich sein können. Dazu gehören prinzipiell jede Form von Herzrhythmusstörung (z.B. eine supraventrikuläre Tachykardie, Extrasystolen, Kammerflimmern (Bild 7) und Kreislaufschwäche, Krampfanfälle (epileptische Anfälle) sowie Ohnmachtsanfälle. Beispiele für Herzrhythmusstörungen sind sogenannte Extrasystolen, die zusätzlich zum eigentlichen Herzschlag erfolgen. Bei einer zusätzlichen Kontraktion nach jedem Normalschlag spricht man von einem Bigeminus („Bigeminy“) [8]. Bei einem Doppelschlag nach jedem zweiten Normalschlag spricht man von einem Trigeminy („Trigeminy“) im Elektrokardiogramm (EKG) [9].

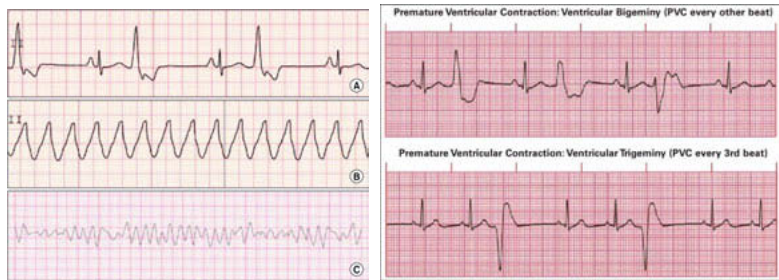


Bild 7: Beispiele für Herzrhythmusstörungen - Premature ventricular contraction (A), ventricular tachycardia (B), ventricular fibrillation (C) [10, 11].

Schwere und akut lebensbedrohliche Zustände wie Schlaganfall und Herzinfarkt (bis hin zur Asystolie, also zum Tod) stellen ebenfalls höchst kritische Situationen für Fahrer, Insassen und die Verkehrsumgebung dar. Bild 8 zeigt einen schematischen Überblick über die prinzipielle Einordnung des System for Occupant Health Monitoring® (SOHM®). Das Konzept enthält die Sensorik und die Algorithmen, mit der Gesundheitsinformationen über den Fahrer gewonnen, validiert, bewertet und einer Entscheidung über möglicherweise notwendige fahrzeugseitige Eingriffe zugeführt werden.

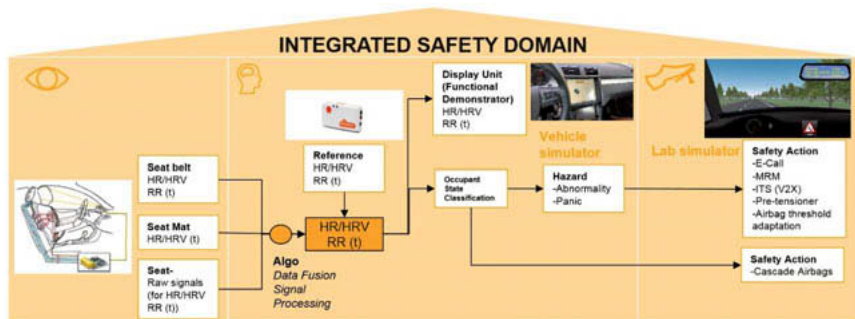


Bild 8: Funktion des SOHM Konzeptes als Teil des OcSM [2]

Zum Funktionsumfang des derzeit in der Entwicklung befindlichen Demonstrators gehört die Erkennung bestimmter Vitalzeichen („Bio Vitals“) als Hinweis auf Gesundheitsprobleme bzw. geistige Abwesenheit:

- **Herzfrequenz und Herzratenvariabilität:**

Die Schlagzahl des Herzens (Heart Rate, HR) ist ein wesentlicher Parameter für die automatisierte Diagnostik. Charakteristische HR-Veränderungen wie **Bradykardie** (verlangsamer Herzschlag von <60 Schlägen pro Minute) [12] und **Tachykardie** (beschleunigter Herzschlag >100 Schläge je Minute) [13] können einen Hinweis auf eine verminderte Fahrtüchtigkeit liefern. Sowohl bei einer Tachykardie als auch bei einer Bradykardie kann die Pumpleistung des Herzens und damit die Sauerstoffversorgung des Körpers vermindert sein – bis hin zur Ohnmacht [12, 14].

Von großer Bedeutung sind zeitliche Schwankungen in den Abständen zwischen den einzelnen Herzschlägen (**Heart Rate Variability, HRV**) [15]. Bei einer gesunden Person ist ein höherer HRV-Wert in der Regel ein Hinweis auf eine insgesamt gute körperliche Verfassung, insbesondere auf eine gute aerobe Fitness, auf ein junges biologisches Alter sowie eine hohe Toleranz gegenüber Stress bzw. eine gute Erholung von einer vorausgegangenen Stresssituation. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein hoher HRV-Wert auf eine gute Aktivität des Parasympathikus hinweist [16, 17, 18]. Dieser Zweig des vegetativen Nervensystems ist für ruhe- und erholungsfördernde Nervensignale zuständig. Parasympathikusaktivität führt zu einer langsameren Herzschlagfrequenz (HR) und bietet damit einen größeren Spielraum für die normalen Schwankungen in der zeitlichen Abfolge der einzelnen Herzschläge (HRV). Ein niedriger HRV-Wert ist dagegen ein Zeichen für leistungssteigernde Sympathikusaktivität, was einen erhöhten Puls und damit weniger zeitliche Freiräume für die HRV gibt. Dahinter kann beispielsweise auch Schlafmangel als Ursache stecken [7]. Die Einwirkung von Zigarettenrauch und Alkohol senkt den HRV-Wert ebenfalls [7]. Die jeweils gemessenen HRV-Werte dienen dazu, Veränderungen (vor allem natürlich zum Schlechteren) bei einer spezifischen Person feststellen zu können. HRV-Werte eignen sich dagegen nicht als aussagekräftige Größe für den Vergleich zwischen zwei Individuen. Insofern gehört die Erkennung des Fahrers als Person (mittels Kamera) idealerweise zur Deutung der HRV-Werte dazu, um durch Rückgriff auf frühere Referenzwerte auch über eine Einzelfahrt hinaus Aussagen treffen zu können. Da ein hoher HRV-Wert (= große Herzratenvariabilität) ein Hinweis auf eine gute körperliche Verfassung (Reaktionsfähigkeit, gute Stressverarbeitung) ist, kann die HRV als ein Bio-Indikator für das Maß der Fahrtüchtigkeit herangezogen werden.

- **Atemfrequenz:**

Die Häufigkeit der **Atemzüge (Respiratory Rate, RR;** im Schnitt zwischen 12 und 18 Atemzüge pro Minute in Ruhe bei einem Erwachsenen) ist ein Indikator für mögliche respiratorische

Fehlfunktionen, die beispielsweise von Fieber ausgelöst sein können, aber auch Anzeichen für Asthma oder Lungenprobleme sein können [19]. Sowohl bei einer zu hohen Atemfrequenz ( $>20$  Atemzüge, Tachypnoe bzw. Hyperventilation) [20] als auch bei einer zu niedrigen Atemfrequenz ( $<10$  Atemzüge, Bradypnoe) [20] ist der Gasaustausch in der Lunge beeinträchtigt, so dass die Sauerstoffsättigung im Blut und die Atemregulation (etwa durch Abfall der  $\text{CO}_2$ -Konzentration als zentrale Steuergröße für die Atemregelung) beeinträchtigt wird. Zu den Ursachen können beispielsweise Schlaganfälle gehören. Zu den möglichen Konsequenzen gehört auch eine Bewusstlosigkeit (Ohnmacht/Syncope durch verengte Hirngefäße). Außerdem sagt die Atemfrequenz etwas über die emotionale Verfassung des Fahrers aus, z.B. Tachypnoe bei starken Gefühlen [21, 22] wie Zorn, Trauer/Weinen, Angst, Panik, Schmerzen, Depressionen bzw. Bradypnoe im Schlaf.

Aus diesen drei Werten (HR, HRV, RR) lassen sich im Fahrzeug bereits eine Reihe von Diagnosen stellen, so etwa ein plötzlicher Herztod (Infarkt/Asystolie), aber auch Anzeichen entweder auf eine schrittweise Verschlimmerung eines Zustands bzw. eine beginnende Verbesserung eines Zustands. Ebenfalls erkannt wird eine Ohnmacht, Anzeichen für Dehydration und Herzrhythmusstörungen (z.B. supraventrikuläre Tachykardie). Zusätzlich sieht das OcSM SOHM® Konzept erweiterte diagnostische Funktionen im Backend vor. Voraussichtlich werden damit weitere und spezifischere Diagnosen, wie die Erkennung einer Myokard-Ischämie (koronare Herzkrankheit bis hin zum akuten Infarkt) sowie Fehler der Atrioventrikularklappenfunktion (AV-Klappen zwischen Vorhof und Herzkammer) als Ursache für eine Herz-Insuffizienz oder Stenose möglich.

#### 4.2. Technisches Sensorkonzept

Die Erkennung von Vitalparametern im Fahrzeug ist Neuland. Es gibt kein etabliertes anwendbares Portfolio an Sensoren für diesen Zweck. Allerdings gibt es wissenschaftliche Grundlagen für die automatisierte Analyse/Diagnose [23, 24, 25]. Deshalb arbeitet Continental im Zuge der OcSM SOHM® Entwicklung daran, geeignete Sensoren zu identifizieren und zu validieren. Nach einer Spezifikation idealtypischer Sensoren (Bild 9) folgt die Auswahl geeigneter Sensoren zur Sitzintegration. Für den in der Entwicklung befindlichen Fahrzeugdemonstrator werden folgende Sensorarten auf ihre jeweiligen Stärken und Schwächen hin evaluiert:

- Kapazitive Sensoren mit niedriger Abtastrate werden auf ihre Eignung zur Erfassung der Herzfrequenz (HR) untersucht.
- Seismokardiographische Sensoren (SCG) mit hoher Abtastrate werden ebenfalls auf ihre Eignung zur Erfassung der HR untersucht.

- Eine kamerabasierte remote-Photoplethysmografie (rPPG Sensor) wird auf ihre Eignung zur Erfassung der HR, des Blutdrucks, der Atemfrequenz und der Sauerstoffsättigung untersucht.
- Ein MI Sensor (Magnetic-induction) wird auf seine Eignung zur Erfassung der Atemfrequenz untersucht.

Die HRV wird aus den zeitsynchronisierten Signaleingängen der anderen Sensorarten abgeleitet.

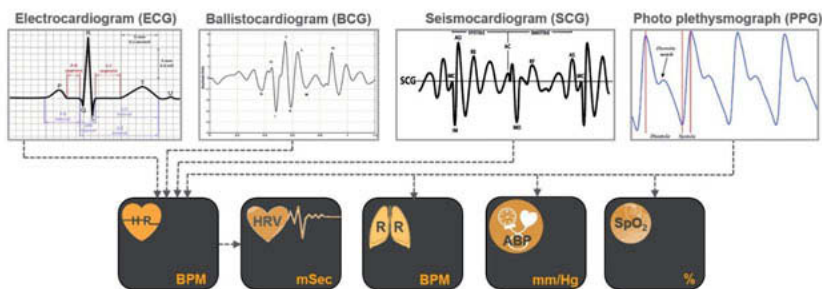


Bild 9: Geeignete Sensoren für die Umsetzung des SOHM® Konzeptes [2, 26, 27, 28, 29]

Als Messlatte für die Aussagekraft der Sensorsignale für die Diagnose werden dabei die Standards der American National Standard Institute herangezogen [30, 31]. *Bland-Altman- Punktediagramme* [32] dienen dazu, Messkurven alternativer oder sich ergänzender Sensorsignale zu vergleichen.

Sowohl für die elektrokardiographischen Daten als auch für die PPG-Daten wurden Akzeptanzkriterien (Qualitätskriterien für die Vertrauenswürdigkeit der Daten, Signal Quality Indices, SQI) definiert. Der SOHM®-Algorithmus übernimmt die Auswertung der Sensordaten im Fahrzeug. Ziel der Algorithmen ist es, Abweichungen vom Normalfall (Abnormalitäten im Herzschlagmuster) zu erkennen. Auf dem Stand der Entwicklung Mitte 2019 lag die Genauigkeit der Erkennung von Herzrhythmusstörungen beim SOHM Algorithmus schon bei fast genau 90 %. Bei der HRV gehört zur Auswertung über eine Einzelfahrt hinaus, einer bestimmten Person einen persönlichen Trend zuordnen zu können, da der absolute Einzelwert für sich genommen nicht aussagekräftig ist. Für die Ausführung der Fusionierung und die Auswertungsalgorithmen



wird leistungsfähige Hardware benötigt. Es wird von der jeweiligen E/E-Architektur des betreffenden Fahrzeugmodells abhängen, auf welcher ECU bzw. welchem High-Performance Computer (HPC) die Ausführung erfolgt. Die Ergebnisse der Auswertung werden an die relevanten Abonnenten in der Architektur weitergeleitet (z.B. an den Airbag Controller).

#### **4.3. Erweiterung des Konzeptes**

Basierend auf diesen Ergebnissen ist die Erweiterung mit Schnittstellen zu folgenden Systemen geplant:

- Vernetzung mit Kommunikationssystemen wie V2X (etwa zur Benachrichtigung anderer Fahrzeuge)
- Anbindung an das Internet of Things, um eine erweiterte Diagnostik im Backend zu ermöglichen
- Vernetzung zum eCall
- Integration in eine AD-Architektur, um die Schnittstelle zur Auslösung eines Minimum Risk Manuevers (MRM) zu definieren.

Bei der Vernetzung mit dem eCall wird es auch darum gehen, dass Erkenntnisse über den Gesundheitszustand des Fahrers (und in einem nächsten Schritt auch über den der anderen Insassen) nach einem Crash an die Ersthelfer übermittelt werden können.

### **5. Zusammenfassung und Ausblick**

Für die passive Sicherheit in Fahrzeugen mit neuen Innenraumkonzepten, die dem Fahrer und den Passagieren mehr Bewegungsfreiheit geben, ist die Positionserkennung der Insassen ein großer Beitrag, weil sie eine angepasste Auslösung der Rückhaltemittel im Crash-Fall ermöglicht. Damit trägt der OcSM dazu bei, die Unfallfolgen abzumildern. Der Occupant Safety Monitor ist ein umfassendes sensorbasiertes Konzept, das Informationen aus der Fahrzeugumgebung um neue Informationen über die Insassen ergänzt. Teil dieser Informationen über die Menschen im Fahrzeuginneren kann auch die Verfassung des Fahrers sein.

Entsprechend den Vorschlägen der Euro NCAP Roadmap 2025 wertet das OcSM mit Health Monitoring auf Basis des SOHM® Konzeptes Informationen über den Fahrer aus, um eine mangelnde „Driving Fitness“ (z.B. geistige Abwesenheit und/oder gesundheitliche Beeinträchtigungen) erkennen zu können. Dazu dienen bereits im Fahrzeug bewährte Sensoren, neue 3D Time-of-Flight Kameras für den Innenraum aber auch neue Sensortechnologien speziell zur Integration in die Sitzfläche, in die Sitzlehne sowie in das Gurtschloss. Durch Fusionierung,

Filterung und Validierung dieser Daten werden Unfallursachen wie Müdigkeit und akute gesundheitliche Probleme (Kreislaufschwächen, Herzrhythmusstörungen, Ohnmacht, Herzinfarkt, Schlaganfall, epileptische Anfälle) erkennbar. Durch Vernetzung des OcSM mit Health Monitoring mit anderen Fahrzeugsystemen, wie der Fahrautomation, dem eCall und der Kommunikation mit dem Fahrzeugumfeld (V2X) sowie mit dem Backend sind einerseits Eingriffe in die Fahrzeugführung möglich (etwas die Aktivierung des MRM), um einen drohenden Unfall zu verhindern. Andererseits können Ersthelfer über die gesundheitlichen Probleme des Fahrers informiert werden und gehen so besser vorbereitet in die Situation vor Ort.

Wenn der OcSM mit Health Monitoring standardmäßig in alle Fahrzeuge integriert würde, wäre auf Grundlage der Gesundheitssensorik und der zugehörigen Algorithmen erstmals eine Lösung für die bis heute nicht adressierbare Unfallursache „Fahrererausfall durch Fahrunfähigkeit“ geschaffen. Angesichts der zunehmenden Überalterung der Bevölkerung in manchen Regionen der Erde und der damit wachsenden Unfallhäufigkeit jenseits des Lebensalters von 65 Jahren wird eine solche Lösung künftig noch dringender benötigt. Statistiken zeigen, dass sich im Jahr 2017 durch die Erkennung gesundheitlicher Probleme am Steuer alleine in Deutschland 138 Verkehrstote und 2.886 Verletzte hätten vermeiden lassen [3]. Nach umfassender Vorarbeit befindet sich inzwischen ein Fahrzeugdemonstrator für den OcSM mit Health Monitoring im Aufbau.

## 6. Referenzen

- [1] Mercedes-Benz, [Online]. Available: <https://www.mercedes-benz.com/de/innovation/forschungsfahrzeug-f-015-luxury-in-motion/>. [Zugriff am 17 Oktober 2019].
- [2] Continental, Continental AG, 2019.
- [3] „Statistisches Bundesamt,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.destatis.de/DE/Home>.
- [4] „German In-Depth Accident Study,“ 2005-2018. [Online]. Available: <https://www.gidas.org/>.
- [5] „Unfall auf der A 81,“ *Stuttgarter Zeitung*, p. 22, 22 Mai 2019.
- [6] EuroNCAP, „Euro NCAP 2025 Roadmap,“ Leuven, 2017.
- [7] D. Dias und J. P. Silva Cunha, „Wearable Health Devices—Vital Sign Monitoring, Systems and Technologies,“ *Sensors (Basel)*, Bd. 18(8), 2018.
- [8] L. Traube, „Pulsus Bigeminus (von F.A. Willius und T.E. Keys: Classics of Cardiology, Dover Publications, New York, 1941),“ *Chest Journal*, Bd. 56, Nr. 1, p. 18, 1969.
- [9] M. N. Levy, I. Mori und N. Kerin, „Two variants of concealed trigeminy,“ *American Heart Journal*, Bd. 93, Nr. 2, pp. 183-188, 1977.
- [10] C. H. Kwon und S.-H. Kim, „Intraoperative management of critical arrhythmia,“ *Korean journal of anesthesiology*, Bd. 70, Nr. 2, p. 120, 2017.
- [11] V. Thomas, „Premature Ventricular Contractions,“ *Cardiorhythm Management*, 2016. [Online]. Available: <https://cardiorhythm.co.za/premature-ventricular-contractions/>. [Zugriff am 14 10 2019].
- [12] P. J. Kudenchuk, A. P. Hallstrom, J. M. Herre und B. L. Wilkoff, „Heart rate, pacing, and outcome in the Dual Chamber and VVI Implantable Defibrillator (DAVID) trials,“ *Heart Rhythm Society*, Bd. 6, Nr. 8, pp. 1129-1135, August 2009.

- [13] American Heart Association, „Tachycardia: Fast Heart Rate,“ 30 September 2016.  
[Online]. Available: <https://www.heart.org/en/health-topics/arrhythmia/about-arrhythmia/tachycardia--fast-heart-rate>. [Zugriff am 17 Oktober 2019].
- [14] J. B. B. Boros, „Die klinische Bedeutung der Tachykardie,“ *Cardiology aus der Medizinischen Universitätsklinik Göttingen*, Bd. 13, Nr. 6, pp. 325-351, 1948.
- [15] Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology, „Heart Rate Variability,“ *Journal of the American Heart Association (AHA)*, Bd. 93, Nr. 5, pp. 1043-1065, 1 März 1996.
- [16] T. Hoffman, „Firstbeat - Was ist die Herzratenvariabilität (HRV) und wieso ist sie wichtig?,“ [Online]. Available: <https://www.firstbeat.com/de/blog-de/was-ist-die-herzratenvariabilitaet-hrv-und-wieso-ist-sie-wichtig/>. [Zugriff am 24 September 2019].
- [17] VNS Analyse, „Auswertung der Messdaten - HRV Parameter,“ Commit GmbH, [Online]. Available: <https://www.vnsanalyse.de/de/anwendung/auswertung-der-messdaten.html>. [Zugriff am 17 Oktober 2019].
- [18] N. Franke-Gricksch, „Rauchen und HRV,“ Herzraten Variabilität, 7 Februar 2016.  
[Online]. Available: <https://xn--hrv-herzratenvariabilit-dcc.de/2016/02/rauchen-und-hrv/>.
- [19] D. H. Arnold, C. Penrod, D. J. Sprague und T. V. Hartert, „Count on it! Accurately measured respiratory rate is associated with lung function and clinical severity in children with acute asthma exacerbations,“ *The Journal of pediatrics*, Bd. 175, pp. 236-236, August 2016.
- [20] M. A. Cretikos, R. Bellomo, K. Hillman, J. Chen, S. Finfer und A. Flabouris, „Respiratory rate: the neglected vital sign,“ *The medical journal of Australia*, Bd. 188, Nr. 11, pp. 657-659, 2 Juni 2008.
- [21] C. D. Applegate, B. S. Kapp, M. D. Underwood und C. L. McNall, „Autonomic and somatomotor effects of amygdala central N. stimulation in awake rabbits,“ *Physiol Behav*, Bd. 31, pp. 353-360, 1983.
- [22] P. Sagaspe, S. Schwartz und P. Vuilleumier, „Fear and stop: A role for the amygdala in motor inhibition by emotional signals,“ *NeuroImage*, Bd. 55, Nr. 4, pp. 1825-1835, 2011.

- [23] Mayo Clinic, „Premature ventricular contractions (PVCs),“ 8 Februar 2018. [Online]. Available: <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/premature-ventricular-contractions/symptoms-causes/syc-20376757>.
- [24] M. Tsipouras, D. I. Fotiadis, V. P. Oikonomou, L. K. Michalis und D. Sideris, „Classification of atrial tachyarrhythmias in electrocardiograms using time frequency analysis,“ *IEEE Xplore*, Nr. 31, pp. 245-248, Oktober 2004.
- [25] Y. Goletsis, D. I. Fotiadis, L. K. Michalis, C. Papaloukas und A. Likas, „Automated Ischemic Beat Classification Using Genetic Algorithms and Multicriteria Decision Analysis,“ *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Bd. 51, Nr. 10, pp. 1717-1725, November 2004.
- [26] The McGill Physiology Virtual Lab, Cardiovascular Laboratory, [Online]. Available: <https://www.medicine.mcgill.ca/physio/vlab/cardio/introECG.htm>. [Zugriff am 17 Oktober 2019].
- [27] A. Akhbardeh, B. Kaminska und K. Tavakolian, „BSeg++: A modified Blind Segmentation Method for Ballistocardiogram Cycle Extraction,“ in *29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*.
- [28] A. Dinh, „Design of a Seismocardiography Using Tri-Axial,“ in *World Congress on Engineering and Computer Science*, San Francisco, 2011.
- [29] EVERIPEDIA, „PPG Signal Analysis,“ [Online]. Available: [https://everipedia.org/wiki/lang\\_en/ppg-signal-analysis](https://everipedia.org/wiki/lang_en/ppg-signal-analysis). [Zugriff am 17 Oktober 2019].
- [30] F. Sartor, J. Gelissen, R. v. Dinther, D. Roovers, G. B. Papini und G. Coppola, „Wrist-worn optical and chest strap heart rate comparison in a heterogeneous sample of healthy individuals and in coronary artery disease patients,“ *BMC Sports Sci Med Rehabil*, Bd. 10, Nr. 10, 2018 - from ANSI/AAMI. Cardiac monitors, heart rate meters, and alarms. Arlington: American National Standards Institute, Inc.; 2002.

- [31] D. M. Mirvis, A. S. Berson, A. L. Goldberger, L. S. Green, J. J. Heger, T. Hinohara, J. Insel, M. W. Krucoff, A. Moncrief, R. H. Selvester und G. S. Wagner, „Instrumentation and Practive Standards for Electrocardiographic Monitoring in Special Care Units,“ *Special Report - Circulation*, Bd. 79, Nr. 2, pp. 464-471, 1989.
- [32] MEDCALC easy-to-use statistical software, „Bland-Altman plot,“ [Online]. Available: <https://www.medcalc.org/manual/blandaltman.php>. [Zugriff am 24 September 2019].

## **Unfallvermeidung durch aktuelle Fahrerassistenzsysteme und künftige automatische Fahrfunktionen: Prospektive Effektivitätsbewertung von FAS und HAF**

## **Collision avoidance by current Advanced Driver Assistance Systems and future Autonomous Driving: Prospective Effectiveness Assessment of ADAS and AD**

M.Sc. **Lukas Stark**, Dipl.-Ing. **Arno Brosig**,  
Dr.-Ing. **Stefan Schoenawa**, Volkswagen AG, Wolfsburg

### **Kurzfassung**

Von der Markteinführung moderner Fahrerassistenzsysteme wird zusätzlich zum Komfortgewinn für den Nutzer insbesondere auch eine Steigerung der Verkehrssicherheit erwartet. Eine Methode zur Abschätzung des möglichen Einflusses auf das Unfallgeschehen stellt die prospektive Effektivitätsbewertung dar. Ausgehend vom aktuellen Unfallgeschehen wird die Wirkung der betrachteten Systeme auf die gegenwärtigen Unfallsituationen untersucht. Ein Vergleich des Unfallablaufs ohne Systemeinsatz mit der identischen Situation unter Berücksichtigung der zu analysierenden Systeme erlaubt eine Bewertung des Potenzials zur Unfallvermeidung. Bislang durchgeführte Bewertungen untersuchen die Effektivität von Fahrerassistenzsystemen zur Vermeidung von schweren Verkehrsunfällen. Ausgehend von der Kenntnis über die Wirksamkeit aktueller Fahrerassistenzsysteme stellt sich folgende Frage: Welches Potenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit besitzen hochautomatisierte Fahrfunktionen und wie lässt sich ein Vergleich mit Fahrerassistenzsystemen sinnvoll führen? In dieser Studie wird die Effektivitätsbewertung einer hochautomatisierten Fahrfunktion, dem Autobahnchauffeur, bezogen auf Autobahnscenarien durchgeführt und mit der Bewertung einer teilautomatisierten Fahrfunktion verglichen. Als teilautomatisierte Fahrfunktion wird eine Kombination der Fahrerassistenzsysteme Adaptive Cruise Control (ACC), Autonomous Emergency Braking (AEB) und Lane Keeping Support (LKS) betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass der Autobahnchauffeur

48 % der betrachteten Unfallszenarien auf Autobahnen vermeiden kann, wohingegen die Assistenzsysteme eine Effektivität zur Unfallvermeidung von 21 % erreichen. Gleichzeitig ist in rund 12 % der betrachteten Szenarien eine höhere Effektivität der teilautomatisierten Fahrfunktion verglichen mit dem Autobahnchauffeur zu beobachten. Es werden die Unterschiede beider Systeme erläutert und Potenziale zur weiteren Steigerung der Verkehrssicherheit durch aktive Fahrfunktionen aufgezeigt.

## Abstract

Present and future Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) are expected to have a positive impact on the driving comfort as well as on road safety. An approach for estimating the safety benefit of such systems is the prospective effectiveness assessment, which allows evaluating the systems' influence referred to today's accident occurrence. The potential for collision avoidance can be assessed by comparing simulation results without system activation with those under system operation. Prior studies evaluate the effectiveness of ADAS for avoidance of collisions with severe or fatal injuries. Based on the knowledge on the effectiveness of today's ADAS the resolving question is: what benefit on road safety does automated driving have and how can highly automated functions be compared with ADAS? In this study a highly automated driving function, the Autobahnchauffeur, is evaluated focusing its performance for collision avoidance in motorway scenarios. The authors compare the results with the assessment of a combination of ADAS, consisting of Adaptive Cruise Control (ACC), Autonomous Emergency Braking (AEB) and Lane Keeping Support (LKS). The Autobahnchauffeur is able to avoid 48 % of the considered motorway accidents, whereas the ADAS have an effectiveness of collision avoidance of 21 %. Detailed insight shows, that for 12 % of the scenarios, the ADAS have a higher effectiveness than the highly automated driving function. Differences in the behavior and the results of both systems are stated and thus further potentials for increasing road safety by active driving functions are depicted.

## 1. Einleitung

Die Vision Zero formuliert das Ziel eines Straßenverkehrssystems ohne Schwerverletzte und Getötete. Zahlreiche Verbesserungen der passiven Fahrzeugsicherheit trugen elementar zu dem mit 3.180 Verkehrstoten im Jahr 2017 vorerst niedrigsten Stand der im deutschen Straßenverkehr in einem Jahr getöteten Personen bei. Der für 2018 beobachtete Anstieg um 3 % unterstreicht die Tatsache, dass auch zukünftig weitere technische Entwicklungen erforderlich sind, um die Verkehrssicherheit zu steigern.



Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Frage, welchen Beitrag zur Unfallvermeidung bezogen auf das deutsche Unfallgeschehen aktuelle Fahrerassistenzsysteme (FAS) leisten können. Darüber hinaus sollen Potenziale für Erweiterungen aktueller Systeme oder die Einführung neuartiger Funktionen identifiziert werden. Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wird eine simulative Effektivitätsbewertung durchgeführt. Auf Basis von rekonstruierten Realunfällen der German-In-Depth-Accident-Study (GIDAS) wird die Wirksamkeit von aktiven Systemen zur Unfallvermeidung prospektiv ermittelt. Im Fokus der Bewertung steht ein Paket aus heute üblichen Fahrerassistenzsystemen zur Längs- und Querverführung: Adaptive Cruise Control (ACC), Autonomous Emergency Braking (AEB) und Lane Keeping Support (LKS). Untersucht wird die Wirksamkeit dieser Systeme bezogen auf GIDAS-Unfallszenarien auf Außerortsstraßen oder Autobahnen mit mindestens einer schwerverletzten oder getöteten Person.

Ergebnis der Analyse ist die Einteilung der betrachteten Szenarien in drei Kategorien: Grün, Grau und Weiß. In Szenarien der Kategorie Grün kann die ursprüngliche Kollision durch die betrachteten Fahrerassistenzsysteme vermieden werden. Die Kategorie Grau beinhaltet Situationen, die prinzipiell in den Wirkbereich der betrachteten Fahrerassistenzsysteme fallen, zur Unfallvermeidung aber eine Erweiterung der untersuchten Systeme zur Längs- und Querverführung erfordern. Szenarien der Kategorie Weiß liegen außerhalb des Wirkbereichs der betrachteten Fahrerassistenzsysteme. Die sogenannten weißen Flecken zeigen Potenziale für künftige Fahrfunktionen auf und stellen somit eine wertvolle Information für die Forschung und Entwicklung an neuartigen Assistenz- und Sicherheitssystemen dar.

Ein großer Beitrag zur Steigerung der Verkehrssicherheit wird vom hochautomatisierten Fahren erwartet. Während Fahrerassistenzsysteme ergänzend zum Fahrer und zeitlich begrenzt in die Fahrzeugführung eingreifen, können hochautomatisierte Fahrfunktionen (HAF) die Fahraufgabe vollständig übernehmen. Um die Effektivität zur Unfallvermeidung von hochautomatisierten Fahrfunktionen mit der Wirksamkeit von Assistenzsystemen vergleichen zu können, erweitern die Autoren die zuvor angewandte Methodik zur simulativen Effektivitätsbewertung. Das Verfahren wird anschließend zum Vergleich der Wirksamkeit der bereits zuvor betrachteten Fahrerassistenzsysteme mit der des Autobahnchauffeurs eingesetzt. Beim Autobahnchauffeur handelt es sich um eine exemplarische hochautomatisierte Fahrfunktion, die auf Autobahnen genutzt werden kann. Die Ergebnisse der Analyse zeigen Einflüsse der unterschiedlichen Auslegung der betrachteten Fahrerassistenzsysteme und des Autobahnchauffeurs auf die Effektivität zur Unfallvermeidung.

In den nachfolgenden Abschnitten werden zunächst verschiedene aus dem Stand der Technik bekannte Methoden zur Effektivitätsbewertung vorgestellt und miteinander verglichen. Anschließend wird auf die Eigenschaften der verwendeten Eingangsdaten sowie die betrachteten

Fahrerfunktionen eingegangen. Nach der Erläuterung der Durchführung von Simulation und Bewertung werden die Ergebnisse dargelegt. Der letzte Abschnitt fasst die Erkenntnisse zusammen und geht auf die Annahmen und Grenzen des verwendeten Ansatzes ein. Darüber hinaus werden die Belastbarkeit der Ergebnisse betrachtet und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

## **2. Methoden zur Effektivitätsbewertung**

Mithilfe der Effektivitätsbewertung ist es möglich, basierend auf Verkehrsunfalldaten ein Sicherheitspotenzial für Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme zu ermitteln. Die Bewertung von Assistenz- und Sicherheitssystemen hinsichtlich ihrer Effektivität bezogen auf das Unfallgeschehen bietet mehrere Möglichkeiten der Nutzung der gewonnenen Ergebnisse. Einerseits lassen sich für bereits in Serie verfügbare Systeme deren Einflüsse auf das Unfallgeschehen abschätzen, um so die Effektivität nachzuweisen und gleichzeitig noch nicht abgedeckte Potenziale aufzuzeigen. Andererseits kann die Effektivitätsbewertung als wertvolles Werkzeug im Zuge einer Systementwicklung, angefangen vom Systemdesign bis hin zur -parametrierung, eingesetzt werden. Sollen beispielsweise unterschiedliche Systementwürfe unter dem Aspekt der Unfallvermeidung gegenübergestellt werden, kann die für die jeweilige Systemausprägung ermittelte Effektivität als objektives Vergleichskriterium herangezogen werden. Diese Differenzierung, ob sich ein System noch in der Entwicklungsphase oder bereits mit hoher Marktdurchdringung im Feldeinsatz befindet, beeinflusst maßgeblich die Wahl einer der beiden nachfolgend vorgestellten Verfahren der Effektivitätsbewertung. Grundprinzip der Effektivitätsbewertung ist die Gegenüberstellung von Unfallhergängen ohne Einsatz des betrachteten Systems mit solchen, in denen das zu analysierende System in mindestens einem der beteiligten Fahrzeuge vorhanden war beziehungsweise ist. Es werden somit Vergleichsgruppen aus Unfallabläufen mit und ohne Systemeinsatz gegenübergestellt. Eine Effektivitätsbewertung kann sowohl retrospektiv als auch prospektiv erfolgen. Beide Ansätze werden im Folgenden näher beschrieben und voneinander abgegrenzt.

### **2.1. Retrospektive Effektivitätsbewertung**

Grundprinzip der retrospektiven Bewertung der Effektivität von aktiven Systemen ist die rückblickende Betrachtung von zu beobachtenden Veränderungen im Unfallgeschehen anhand der Analyse von erhobenen Unfalldaten. Auf diesem Weg lässt sich ein in der Vergangenheit zu beobachtender Einfluss des zu untersuchenden Systems auf das Unfallgeschehen aufzeigen und im positiven Fall dessen Wirksamkeit nachweisen. Bedingung für die Durchführbarkeit einer retrospektiven Effektivitätsbewertung ist, dass die der betrachteten Unfalldatenbank zugrundeliegende Fahrzeugpopulation einen statistisch relevant großen Anteil an Fahrzeugen

mit Verbau des zu untersuchenden Systems aufweist . Ein populäres Anwendungsbeispiel dieses Verfahrens ist die Untersuchung der Effektivität des Elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP) mehrere Jahre nach dessen Markteinführung .

Einschränkungen dieser Methodik liegen in der durch die innerhalb der betrachteten Fahrzeugmenge erforderlichen Verbaurate des Systems bedingten Zeitverzögerung zwischen Systemeinführung und möglicher Effektivitätsanalyse. Darüber hinaus werden Situationen, in denen das betrachtete System eine Kollision nicht nur abschwächt, sondern vollständig verhindert, von der Unfallerhebung nicht erfasst . Ein Nachvollziehen der Wirkkette des Systems ist für vermiedene Kollisionen somit nicht möglich.

## **2.2. Prospektive Effektivitätsbewertung**

Eine andere Möglichkeit der Betrachtung ist die prospektive Effektivitätsanalyse. Zielsetzung dieses Ansatzes ist es, vom gegenwärtigen Zeitpunkt aus blickend den Systemeinfluss auf das Unfallgeschehen zu prognostizieren . Ein mögliches Werkzeug zur prospektiven Bewertung ist die Simulation . Ein entscheidender Vorteil der prospektiven Bewertung liegt darin, dass auch prototypische Systeme, unabhängig von Verbauraten und Marktdurchdringung, bewertet werden können. Somit kann bereits in der frühen Konzeptphase eines Systems dessen potenzieller Einfluss auf das Unfallgeschehen abgeschätzt werden . Eine mögliche Umsetzung dieses Verfahrens ist die Rekonstruktion und Simulation von erhobenen Realunfällen, die virtuell mit und ohne System durchfahren und die Ergebnisse miteinander verglichen werden . Anschaulich dargestellt wird während der Simulation der betrachteten Szenarien untersucht, wie sich der Unfallablauf verändert, wenn das zu bewertende System im Einsatz gewesen wäre.

Im Rahmen der in diesem Manuskript dargestellten Studie sollen aktuelle Fahrerassistenzsysteme bewertet und mit einer prototypischen, nicht im Markt verfügbaren, hochautomatisierten Fahrfunktion verglichen werden. Hierfür wird das Verfahren der prospektiven Effektivitätsbewertung gewählt, welches in der Simulation von Unfalldaten unter Berücksichtigung der zu bewertenden Systeme angewandt wird.

## **2.3. Simulationsumgebung**

Für die praktische Durchführung der Effektivitätsbewertung wird die Simulations- und Bewertungssoftware rateEFFECT eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein von der Volkswagen Unfallforschung entwickeltes Softwareframework, das das Ausführen einer Closed-Loop-Simulation unter Berücksichtigung der zu bewertenden Systemkomponenten ermöglicht . Ein zu untersuchendes System wird in rateEFFECT durch die Verwendung von Komponenten wie Sensoren, Algorithmen und Aktoren modelliert. Bild 1 zeigt schematisch den Signalfluss in rateEFFECT. Eingelesene Unfalldaten werden im Simulationskern PC-Crash simuliert und

zeitgleich die Systemkomponenten ausgeführt. Sensoren lesen Umgebungsinformationen aus der Simulation aus und geben diese an die Systemalgorithmen weiter. Die von den Algorithmen anhand der Sensorinformationen ermittelten Steuerbefehle werden von Aktoren, die beispielsweise den Antriebsstrang, die Lenkung und die Bremsanlage modellieren, an die Simulationsumgebung gesendet. Hierdurch entsteht ein Closed-Loop-Verfahren, das für jeden Simulationszeitschritt ausgeführt wird.

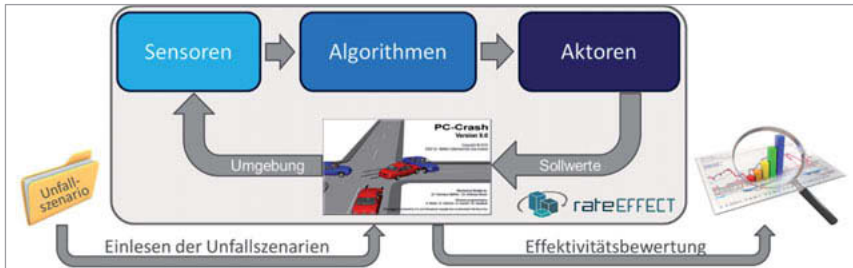


Bild 1: rateEFFECT Simulationsframework

Für die Simulation der hochautomatisierten Fahrfunktion wird rateEFFECT zusätzlich mit einer weiteren Simulationsumgebung verknüpft. Der Autobahnchauffeur ist nicht direkt als rateEFFECT Komponente, sondern im Automotive Data and Time-Triggered Framework (ADTF) implementiert. ADTF ist ein Tool zur Entwicklung, Validierung, Visualisierung und zum Testen von Fahrerassistenzsystemen sowie automatisierten Fahrfunktionen. ADTF ist für einen Einsatz im Labor als auch im Versuchsfahrzeug entwickelt. Die Verbindung zwischen rateEFFECT und ADTF wird über eine Datenschnittstelle hergestellt, über die Umgebungsinformationen der rateEFFECT-Simulation an ADTF und die Ausgangssignale des Autobahnchauffeurs von ADTF zurück an rateEFFECT gesendet werden. Für die Bewertung des Autobahnchauffeurs werden rateEFFECT und ADTF parallel ausgeführt.

### 3. Datengrundlage und Systeme

Um eine Veränderung des Unfallgeschehens durch den Einsatz von FAS aufzeigen zu können, müssen kritische Verkehrssituationen und Unfallszenarien durch eine Datenbasis abgebildet werden sowie gleichzeitig Funktionsprinzip und Funktionsgrenzen der zu analysierenden Funktion bekannt sein. Im Folgenden werden die verwendeten Eingangsdaten sowie die betrachteten Systeme erläutert.

### 3.1. Eingangsdaten

Unfalldaten bilden die elementare Grundlage der Unfallforschung, indem sie relevante Informationen zum tatsächlichen Unfallgeschehen liefern und somit für weiterführende Analysen das abstrahierte Abbild der Realität darstellen. Von Erheberteams werden direkt an der Unfallstelle beispielsweise die Endlagen der Fahrzeuge, Reifenspuren oder Daten zur Witterung und den Sichtverhältnissen erfasst. Zusätzlich werden relevante Informationen zu Ausstattungsmerkmalen und Beschädigungen der Fahrzeuge und Informationen zu den Verletzungen der beteiligten Personen aufgenommen. Ein Ziel der Unfallforschung ist es, Handlungsempfehlungen und Maßnahmen zur Steigerung der Sicherheit für Fahrzeugentwicklung, Verkehrsführung oder Infrastrukturplanung aus den Erkenntnissen der Unfallanalyse abzuleiten.

In Deutschland existierten neben der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik, in der jeder von der Polizei aufgenommene Unfall in vergleichsweise geringem Umfang dokumentiert wird, weitere Datensammlungen. Unfalldatenbanken werden beispielsweise vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV), dem Allgemeinen Deutschen Automobil-Club e.V. (ADAC) oder den großen deutschen Fahrzeugherstellern geführt. Als eine der umfangreichsten und aussagekräftigsten Datenbank der Welt gilt die German In-Depth Accident Study (GIDAS), die für eine detaillierte und gleichzeitig statistisch abgesicherte Auswertung von Verkehrsunfällen verwendet werden kann. Die GIDAS-Datenbank, die im Rahmen dieser Arbeit als Datenbasis verwendet werden soll, und ihre Eigenschaften werden im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert.

#### 3.1.1. German In-Depth Accident Study (GIDAS)

Als Gemeinschaftsprojekt der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) verfolgt die German In-Depth Accident Study (GIDAS) das Ziel, eine Datengrundlage für Detailanalysen zu Straßenverkehrsunfällen in Deutschland bereitzustellen. Abhängig vom Umfang der zur Verfügung stehenden Informationen, wird jeder Unfall durch Experteneinschätzung, Rechnung oder Simulation rekonstruiert, um den Unfallablauf unterteilt in Vorgänge, beginnend mit der Unfalleinleitung bis hin zum Stillstand der Fahrzeuge, zu dokumentieren. Hieraus werden wichtige Parameter, wie auftretende Bremsverzögerungen, Einlauf- und Kollisionsgeschwindigkeiten sowie Winkeländerungen gewonnen und in der Datenbank codiert. Die Dokumentation des Unfallablaufs erfolgt lediglich auf Basis der aus der Rekonstruktion ermittelten Größen, die zu charakteristischen Zeitpunkten eines Vorgangs festgehalten werden. Die Auswahl der in den Regionen Dresden und Hannover erhobenen Unfälle geschieht nach einem festgelegten Erhebungsmuster, wodurch die Repräsentativität der GIDAS-Fälle bezogen auf das bundesdeutsche Unfallgeschehen gewährleistet werden soll.

### 3.1.2. Pre-Crash-Matrix (PCM)

Mit dem Ziel, die umfangreichen Informationen der GIDAS um Informationen zu vorkollisionsären Ereignissen zu erweitern, wird für systematisch ausgewählte Fälle zusätzlich eine Pre-Crash-Matrix (PCM) bereitgestellt. Für den Zeitraum von fünf Sekunden vor Kollision beziehungsweise Erstberührung sind in Zeitschritten von 10 ms unter anderem Werte für Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung enthalten, wodurch die Bewegungen der Beteiligten innerhalb der Rekonstruktion exakt nachvollzogen werden können. Ergänzende Umfeldinformationen sind in Form von geometrischen Daten zu Fahrbahnrändern und Fahrstreifenmarkierungen verfügbar, soweit diese durch die GIDAS-Unfallskizze bekannt sind. Sofern im jeweiligen Fall vorhanden, existieren zusätzliche Angaben zu Sichthindernissen oder möglichen Kollisionsobjekten, wie zum Beispiel Mauern oder Bäumen. Aufgrund der vollständigen Bild der Unfall-Einlaufphase für die an der Erstkollision beteiligten Fahrzeuge eignen sich PCM-Daten für eine simulative Bewertung von Fahrerassistenzsystemen, die im Zeitraum vor der Kollision unfallvermeidend oder unfallfolgemindernd eingreifen. Im Rahmen dieser Studie wird die GIDAS PCM als Datengrundlage für die simulative Effektivitätsbewertung genutzt.

### 3.2. Fallauswahl

In dieser Arbeit werden zwei aufeinander aufbauende Effektivitätsbewertungen vorgestellt, die auf einer unterschiedlichen Auswahl an Szenarien basieren. Die Bewertung der Effektivität zur Unfallvermeidung der Fahrerassistenzsysteme ACC, AEB und LKS erfolgt im Kontext der Vision Zero basierend auf GIDAS-Unfällen mit mindestens einer schwerverletzten Person. Diese Szenarienauswahl wird im Folgenden als Vision Zero Wirkfeld bezeichnet. Die Effektivitätsbewertung des Autobahnchauffeurs und der Vergleich dieser hochautomatisierten Fahrfunktion mit den Fahrerassistenzsystemen ACC, AEB und LKS erfolgt auf Basis ausgewählter Autobahnszenarien, dem sogenannten Autobahnreferenzwirkfeld.

#### 3.2.1. Vision Zero Wirkfeld

Um den Beitrag der aktuellen Fahrerassistenzsysteme für PKWs zur Vision Zero quantifizieren zu können, werden als Datengrundlage Unfallszenarien aus GIDAS mit PKW-Beteiligung und mindestens einer schwerverletzten Person auf Außerortsstraße betrachtet (Basisdatensatz). Für die tatsächliche Bewertung werden weitere Einschränkungen getroffen, um Situationen auszuschließen, die von den zu untersuchenden Fahrerassistenzsystemen nicht adressiert werden können (verbleibend: Bewertungsdatensatz). Im Folgenden sind die Filterschritte sowie die dazugehörigen GIDAS Fallzahlen (GIDAS Datenbank Stand 31.12.2017) aufgelistet.

- 1) GIDAS gesamt: 31.712 Fälle (ab Jahr 2000, Status abgeschlossen mit Rekonstruktion)
- 2) GIDAS Teilmenge: 2.137 Fälle (PKW-Beteiligung, schwer oder tödlich verletzte Person)
- 3) Basisdatensatz: 946 Fälle (Außerortsstraßen inkl. Autobahnen)

- a) Kein Schleudern (568 Fälle verbleibend)
  - b) PKW-Beteiligung in der Erstkollision (547 Fälle verbleibend)
  - c) Keine Anhänger (497 Fälle verbleibend)
  - d) Keine Rückwärtsfahrt (495 Fälle verbleibend)
  - e) Kein technischer Defekt (491 Fälle verbleibend)
- 4) Bewertungsdatensatz: 491 Fälle

Sämtliche Fälle, die die unter 3) genannten Kriterien nicht erfüllen, werden für die Bewertung der Effektivität nicht betrachtet. Bei der Hochrechnung der Ergebnisse werden die nicht bewerteten Fälle des Basisdatensatzes mit einer Effektivität von Null berücksichtigt, da in diesen Situationen keine Systemeffektivität nachgewiesen werden kann.

### 3.2.2. Autobahnreferenzwirkfeld

Zur Bewertung der hochautomatisierten Fahrfunktion werden Autobahn- und autobahnähnliche Szenarien betrachtet, da der Autobahnchauffeur ausschließlich in dieser Domäne Anwendung findet. Die Menge der GIDAS Unfälle wird anhand der Kriterien, die für eine Nutzung des Autobahnchauffeurs erfüllt sein müssen, analog zu dem im Projekt Pegasus betrachteten Wirkfeld eingeschränkt :

- Zu untersuchendes Fahrzeug ist ein PKW ohne Anhänger
- Autobahn oder autobahnähnliche Straße
- Ausgangsgeschwindigkeit des Fahrzeugs nicht größer als 130 km/h
- Fahrbahnmarkierungen vorhanden und gut sichtbar
- Keine (unfallursächlichen) Schlaglöcher vorhanden
- Keine Ein- oder Ausfahrt befahren
- Gute Witterungsverhältnisse, keine Straßenglätte

Der dem Autobahnreferenzwirkfeld zu Grunde liegende Datenstand ist die GIDAS-Datenbank vom 31.12.2016. Nach Anwendung der oben genannten Filter resultieren hieraus insgesamt 107 GIDAS Fälle, für die eine PCM vorliegt. Für die simulative Betrachtung des Autobahnchauffeurs in ADTF ist eine Konvertierung der PCM-Daten in die Simulationsdatenformate OpenDRIVE und OpenSCENARIO erforderlich, was mit den zur Verfügung stehenden prototypischen Werkzeugen für 85 Fälle möglich ist.

Als Szenariengrundlage für die Betrachtung des Autobahnchauffeurs, das Autobahnreferenzwirkfeld, wird somit eine Menge von 85 GIDAS PCM Fällen festgelegt. Es handelt sich hierbei nicht um eine statistisch repräsentative Fallauswahl, sondern um eine Menge von Unfallszenarien auf Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen, anhand derer exemplarisch Unterschiede in der Bewertung von Fahrerassistenzsystemen und hochautomatisierten Fahrfunktionen aufgezeigt werden sollen.

### 3.3. Betrachtete Fahrerassistenzsysteme

Die Systemkonfiguration zur Bewertung der Fahrerassistenzsysteme setzt sich aus drei Systemen zusammen: Dem Abstandsregeltempomat, Adaptive Cruise Control (ACC), der automatischen Notbremse, Autonomous Emergency Braking (AEB) und der Fahrstreifenhalteassistenten, Lane Keeping Support (LKS). Beim betrachteten Systemverbund handelt es sich um die bereits in einer vorherigen Studie verwendeten und detailliert beschriebenen Fahrerassistenzsysteme. Im Folgenden werden die Funktionsprinzipien der drei Systeme vorgestellt.

#### 3.3.1. Adaptive Cruise Control (ACC)

Die Adaptive Cruise Control verwendet Informationen eines in Fahrtrichtung nach vorne blickenden Sensors, wie zum Beispiel einem Radarsensor, um die Zeitlücke zwischen dem vorausfahrenden und dem eigenen Fahrzeug zu berechnen. Das Ziel des ACC ist es, die Zeitlücke durch kontinuierliche Regelung der Längsbeschleunigung konstant zu halten, selbst beim Verzögern oder Beschleunigen des vorausfahrenden Fahrzeugs. Das System ist mit einer maximalen Längsbeschleunigung von  $4 \text{ m/s}^2$  und einer Wunschzeitlücke von  $2,8 \text{ s}$  parametrierbar. Der maximale Gradient zum Auf- und Abbau einer Längsbeschleunigung beträgt  $1,75 \text{ m/s}^3$ .

#### 3.3.2. Autonomous Emergency Braking (AEB)

Beim Autonomous Emergency Braking handelt es sich um eine in kritischen Situationen ohne Aktivierung durch den Fahrer eingreifende Notbremse. Mithilfe eines Radarsensors an der Fahrzeugfront werden potentielle Kollisionsobjekte vor dem Fahrzeug erkannt. Auf Basis der gemessenen Entfernung sowie der Relativgeschwindigkeit und -beschleunigung in Längsrichtung wird die Time To Collision (TTC) als Auslösekriterium errechnet. Für eine  $TTC < 1,6 \text{ s}$  erfolgt eine Bremsung mit bis zu  $8 \text{ m/s}^2$  Verzögerung. Die AEB reagiert auf vorausfahrende und statische Objekte, sofern der Versatz in Querrichtung zwischen erkanntem Zielobjekt und Ego-Fahrzeug nicht mehr als die halbe Fahrzeugbreite des Ego-Fahrzeugs betragen. Als kreuzende Objekte werden ausschließlich Fußgänger und Radfahrer berücksichtigt. Es erfolgt keine Reaktion auf entgegenkommende Verkehrsteilnehmer.

#### 3.3.3. Lane Keeping Support (LKS)

Das Lane Keeping Support System unterstützt den Fahrer bei der Querführung des Fahrzeugs im Fahrstreifen und unterbindet durch Lenkeingriffe ein ungewolltes Fahrstreifen- oder Fahrbahnverlassen. Anhand von Kamera-Signalen, wie den lateralen Abständen und Winkeln zwischen Fahrzeug und Fahrbahnmarkierungen, ermittelt der Systemalgorithmus den Abstand zur nächsten Markierung, Distance to Line Crossing (DLC), als auch die Zeit bis zum erwarteten Überfahren einer Markierung, Time to Line Crossing (TTLC). Das Ausgangssignal des LKS ist ein Lenkmoment, das auf  $3 \text{ Nm}$  limitiert wird. Die Mindestgeschwindigkeit für die Systemaktivierung ist auf  $65 \text{ km/h}$  festgelegt. Ein Lenkeingriff erfolgt bei Überschreitung eines Winkels



zwischen Fahrzeug und Markierung von 0,03 rad, einer  $TTL < 1,5$  s oder einer  $DLC < 0,05$  m.

### **3.4. Hochautomatisierte Fahrfunktion: Autobahnchaffeur**

Bei der in dieser Arbeit untersuchten hochautomatisierten Fahrfunktion handelt es sich um den Autobahnchaffeur. Der Autobahnchaffeur wurde entwickelt, um den Fahrer auf der Autobahn bei monotonen Fahraufgaben (z. B. Langstreckenfahrten oder Staufolgefahrt) zu entlasten. Während der Fahrt soll der Autobahnchaffeur kritische Situationen bewältigen können, sofern diese in ähnlicher Weise für den menschlichen Fahrer beherrschbar wären. Aus diesem Grund ist die hochautomatisierte Fahrfunktion nicht in der Lage, sämtliche kritische Szenarien zu bewältigen. In für das System nicht vermeidbaren Unfallsituationen soll die Fahrfunktion versuchen, die Unfallfolgen und das Schadensausmaß zu minimieren.

Zu den Mindestanforderungen für den Betrieb des Autobahnchaffeurs zählen z. B. dass sich das Fahrzeug auf einer Autobahn bzw. autobahnähnlicher Straße befindet oder die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeugs unter der Richtgeschwindigkeit in Deutschland bzw. unter der länderspezifischen Geschwindigkeitsbeschränkung liegt. Des Weiteren darf das Fahrzeug keine Ein- oder Ausfahrt befahren oder sich im Bereich einer Baustelle befinden. Die Funktion kann bei schlechter Witterung mit starker Sichteinschränkung oder hohem Niederschlag sowie bei schnee- oder eisglatter Fahrbahn nicht genutzt werden. Sind die Mindestanforderungen nicht erfüllt, kann das Fahrzeug manuell durch den Fahrer gesteuert werden. Während des manuellen Fahrens kann der Fahrer durch Fahrerassistenzsysteme unterstützt werden.

### **3.5. Vergleich der Fahrfunktionen**

Die in diesem Unterkapitel vorgestellten Fahrfunktionen können nach der Norm SAE J3016 klassifiziert werden. Die Klassifizierung enthält sechs Stufen und definiert die dazugehörigen Mindestanforderungen für straßengebundene Kraftfahrzeuge mit Systemen.

Nach den aufgestellten Kriterien kann der Verbund der Fahrerassistenzsysteme ACC, AEB und LKS der Stufe 2 zugeordnet werden. Bei dieser Stufe handelt es sich um ein teilautomatisiertes Fahrzeug. Dabei kann der Fahrer sowohl die Längs- als auch die Querverführung in bestimmten Situationen an das System übergeben. In der Kategorie muss der Fahrer das Fahrzeug und den Verkehr fortlaufend überwachen und jederzeit in der Lage sein, die Steuerung des Fahrzeugs zu übernehmen. Der in der Arbeit verwendete Systemverbund bestehend aus den FAS ACC, AEB und LKS besitzt die Mindestanforderungen des SAE Level 2, da durch das ACC in Kombination mit dem LKS eine Fahrzeugsteuerung in der Längs- und Querverführung in bestimmten Situationen möglich ist.

Der Autobahnchaffeur kann im Gegensatz zum FAS-Systemverbund dem SAE Level 3 zugeordnet werden. Bei der Stufe handelt es sich um eine hochautomatisierte Fahrfunktion. Die

Längs- und Querführung muss dementsprechend durch den Fahrer nicht dauerhaft überwacht und erst nach einer definierten Übernahmezeit wieder übernommen werden. Ein weiterer Unterschied des Autobahnchauffeurs zum FAS-Systemverbund ergibt sich beim Erreichen der Systemgrenzen. Der Autobahnchauffeur muss im Gegensatz zu den FAS das Fahrzeug über eine definierte Zeitreserve im sicheren Betrieb führen, wenn die Systemgrenzen erreicht sind. Weiterhin bietet der Autobahnchauffeur die Möglichkeit, die komplette Steuerung über das Fahrzeug zu übernehmen. Somit sind ein Ausweichen oder Fahrstreifenwechsel durch den Autobahnchauffeur möglich.

## 4. Durchführung der Bewertung

### 4.1. Bewertungskriterien

Für die Simulationsauswertung werden Kriterien definiert, anhand derer die Szenarien in Auswertungskategorien zusammengefasst werden können. Für die Effektivitätsbewertung der Fahrerassistenzsysteme bezogen auf Unfälle mit Schwerverletzten und Getöteten auf Außerortsstraßen (Vision Zero Wirkfeld) werden Kategorien festgelegt, die eine Aussage zur Auswirkung der Systeme auf das Unfallgeschehen erlauben. Darüber hinaus soll es möglich sein, anhand der Kategorien Potenziale für Systemerweiterungen als auch zukünftige Systemansätze zu identifizieren. Für die Gegenüberstellung zwischen FAS und HAF werden Auswertungskategorien gewählt, anhand derer primär Unterschiede zwischen den Funktionen identifiziert werden sollen. Nachfolgend werden die Bewertungskriterien beider Anwendungsfälle erläutert.

#### 4.1.1. Bewertungskriterien FAS Vision Zero Wirkfeld

Um eine Aussage zu ermöglichen, welche Unfälle mit Schwerverletzten und Getöteten durch den Einsatz der zu untersuchenden Fahrerassistenzsysteme potenziell vermieden werden könnten, wird jedes untersuchte Szenario einer der folgenden drei Ergebniskategorien zugeordnet:

- Green Spots: Diese Szenarien können von den betrachteten FAS (hier ACC, AEB und LKS) in deren Basiskonfiguration gelöst werden. Diese Kategorie zeigt das Potenzial der aktuellen Systeme zur Unfallvermeidung.
- Grey Spots: Szenarien, die von den betrachteten FAS in der Basiskonfiguration nicht gelöst werden können. Es werden aktuelle Systemgrenzen überschritten. Nach der Erweiterung der betrachteten Systeme, kann die Situation von diesen adressiert werden. Zum Lösen der Situation ist kein neuartiger Systemansatz erforderlich.
- White Spots: Szenarien, die von den betrachteten FAS nicht adressiert werden. Diese Kategorie zeigt Potenziale für zukünftige, neuartige Systemansätze auf.

Ein Szenario wird als adressiert identifiziert, wenn die folgenden Kriterien erfüllt sind:

- AEB: Bremseneingriff vor Erstkollision
- ACC: Wunschbeschleunigung  $< 0 \text{ m/s}^2$  vor Erstkollision
- LKS: Lenkeingriff mit einem Betrag des Lenkmoments  $> 0 \text{ Nm}$  vor Erstkollision

Ein Szenario wird als gelöst identifiziert, wenn die folgenden Kriterien erfüllt sind:

- Keine Kollision
- Szenario adressiert
- Für Unfälle bedingt durch Fahrstreifenverlassen: Kein Verlassen innerhalb der Dauer der GIDAS PCM Unfallrekonstruktion ( $t \leq 5 \text{ s}$ )

#### 4.1.2. Bewertungskriterien Vergleich FAS / HAF Autobahnreferenzwirkfeld

Zum Vergleich der hochautomatisierten Fahrfunktion mit Fahrerassistenzsystemen werden zur Bewertung der Szenarien drei Auswertungskategorien definiert: Szenario gelöst, Szenario nicht gelöst & adressiert, Szenario nicht gelöst & nicht adressiert. In Tabelle 1 werden die die Auswertungskategorien sowie die dazugehörigen Kriterien erläutert.

Tabelle 1: Bewertungskategorien und -kriterien

Längsführung	Querführung
Szenario gelöst	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systemeingriff vorhanden</li> <li>• Keine Kollision</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systemeingriff vorhanden</li> <li>• Keine Kollision</li> <li>• Kein Fahrstreifenverlassen für <math>t \leq 10 \text{ s}</math></li> </ul>
Szenario nicht gelöst, adressiert	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systemeingriff vorhanden</li> <li>• Kollision vorhanden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systemeingriff vorhanden</li> <li>• Kollision vorhanden <i>oder</i> Fahrstreifenverlassen für <math>t \leq 10 \text{ s}</math></li> </ul>
Szenario nicht gelöst, nicht adressiert	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein Systemeingriff</li> <li>• Kollision vorhanden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein Systemeingriff</li> <li>• Kollision vorhanden</li> </ul>

## 5. Ergebnisse

### 5.1. Effektivität von FAS (Vision Zero Wirkfeld)

Im ersten Schritt wurde die Effektivität der Fahrerassistenzsysteme ACC, AEB und LKS zur Unfallvermeidung in Szenarien auf Außerortsstraßen mit Schwerverletzten oder Getöteten untersucht. Um eine repräsentative Aussage bezogen auf Gesamt GIDAS zu ermöglichen, wurde neben der simulativen Bewertung auf Basis von PCM-Fällen zusätzlich eine manuelle Einzelstudie für alle verbleibenden bewertbaren Fälle ohne PCM durchgeführt.

Bezogen auf das im Abschnitt 3.2.1 beschriebene Vision Zero Wirkfeld kann der Systemverbund der drei FAS ACC, AEB und LKS 12 % aller Unfälle auf Außerortsstraße mit PKW-Beteiligung und mindestens einer schwerverletzten oder getöteten Person vermeiden (Green Spot). Insgesamt 7 % aller betrachteten Unfallszenarien fallen prinzipiell in den Wirkungsbereich von Abstandsregeltempomat, Notbremse und Fahrstreifenhalteassistent, erfordern zur Unfallvermeidung jedoch Erweiterungen der aktuellen Funktionsausprägungen (Grey Spot). Der verbleibende Anteil von 81 % fällt nicht in den Wirkungsbereich der betrachteten FAS (White Spot).

### 5.2. Vergleich von FAS und HAF (Autobahnreferenzwirkfeld)

Im zweiten Schritt wurden die FAS ACC, AEB mit dem Autobahnchauffeur in den Szenarien des Autobahnreferenzwirkfelds (siehe Abschnitt 3.2.2) im direkten Vergleich bewertet. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung der Fahrerassistenzsysteme mit der hochautomatisierten Fahrfunktion sind in Bild 2 dargestellt.

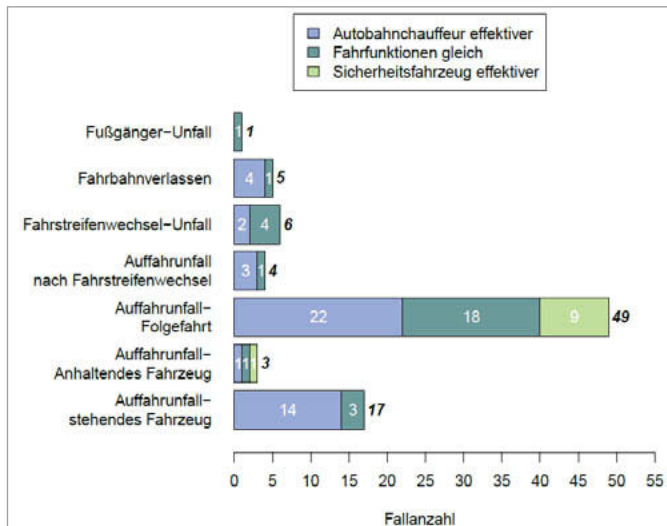


Bild 2: Gegenüberstellung von FAS und HAF

In Szenarien mit Fahrbahnverlassen, Auffahrunfällen nach einem Fahrstreifenwechsel, Auffahrunfällen in einer Folgefahrt und Auffahrunfällen auf stehende Fahrzeuge besitzt der Autobahnchauffeur eine höhere Effektivität als die Fahrerassistenzsysteme. Die hochautomatisierte Fahrfunktion reduziert in Längsrichtung bei Annäherung an ein vorausfahrendes Fahrzeug zeitlich früher die Geschwindigkeit, wodurch sich eine höhere Effektivität bei Längsverkehrsunfällen ergibt. Darüber hinaus reagiert der Autobahnchauffeur auch auf initial stehende Fahrzeuge, während das in dieser Arbeit betrachtete ACC nur auf angehaltene, nicht aber auf initial stehende Fahrzeuge mit einer Bremsung reagiert. Szenarien, in denen die Fahrerassistenzsysteme eine höhere Effektivität besitzen, sind insbesondere auf die Notbremsfunktion der AEB zurückzuführen. Dieses System ist in der Lage, kurz vor einer drohenden Kollision eine automatische Notbremsung einzuleiten. Der in dieser Arbeit betrachtete Autobahnchauffeur besitzt keine Notbremsfunktion. In Szenarien, in denen eine frühzeitige Komfortbremsung nicht für eine Unfallvermeidung ausreicht, wie beispielsweise Situationen mit plötzlichen Bremsungen des Vorderfahrzeugs, besitzen die Fahrerassistenzsysteme eine höhere Effektivität. In Bezug auf die Querführung fällt die höhere Effektivität des Autobahnchauffeurs bei Unfallsituationen ausgelöst durch ein Fahrstreifenverlassen auf. Im Gegensatz zu den Fahrerassistenzsystemen arbeitet der Autobahnchauffeur zusätzlich mit Kartendaten, anhand derer das Sys-

tem frühzeitig den Verlauf des vorausliegenden Fahrbahnabschnitts ermitteln kann. Der Autobahnchauffeur ist so in der Lage, die Fahrgeschwindigkeit gegebenenfalls frühzeitig an eine Kurve anzupassen. Die Fahrstreifenhalteassistentz LKS erkennt den Fahrbahnverlauf ausschließlich über Kameradaten und hat keinen Einfluss auf die Fahrgeschwindigkeit.

## 6. Diskussion und Ausblick

Die in dieser Studie entwickelte Methodik zur Bewertung von Fahrerassistenzsystemen und hochautomatisierten Fahrfunktionen leistet einen wertvollen Beitrag zum Verständnis des künftigen Unfallgeschehens. Auf Basis gegenwärtiger Unfalldaten können Szenarien identifiziert werden, die von aktuellen Systemen gelöst werden können. Darüber hinaus lassen sich gezielt Unfallkonstellationen ausweisen, die von den betrachteten Systemen nicht vermieden werden können und somit unbedingt bei der Auslegung künftiger Funktionen zum teil- und hochautomatisierten Fahren berücksichtigt werden sollten. In einer weiterführenden Arbeit wurde ein generischer Kreuzungsassistentz zum Adressieren der innerhalb der White Spots identifizierten Kreuzungsunfälle entworfen und getestet .

Die Berücksichtigung von hochautomatisierten Fahrfunktionen und der Vergleich mit Fahrerassistenzsystemen stellt innerhalb der Effektivitätsbewertung einen völlig neuen und gleichzeitig wichtigen Schritt auf dem Weg zum hochautomatisierten Fahren dar. Mit der Analyse sämtlicher GIDAS-Unfälle auf Außerortsstraßen und Autobahnen mit mindestens Schwerverletzten wird eine systemunabhängige Datengrundlage eingesetzt. Dieser neu entwickelte Ansatz ermöglicht neben der Untersuchung einer Systemeffektivität zusätzlich die Identifikation von nicht adressierbaren Situationen. Zukünftig sollte dieses Verfahren auch auf Unfallszenarien auf Innerortsstraßen ausgeweitet werden, wodurch insbesondere Unfälle mit Fußgängern und Radfahrern zunehmend in den Fokus gerückt werden. Hierfür müssen die in dieser Arbeit verwendeten, stark vereinfachten Sensormodelle erweitert werden, um Mechanismen wie beispielsweise die nur bei Bewegung des Fußgängers mögliche Detektion zu berücksichtigen. Durch die Verwendung von Unfalldaten zur simulativen Bewertung von Fahrerassistenzsystemen und hochautomatisierten Fahrfunktionen ist es möglich, den Aspekt der Reduktion von schweren Verkehrsunfällen bei der Systementwicklung zu berücksichtigen. So kann von Unfallforschern, Systementwicklern und letztendlich den Fahrzeugherstellern ein wertvoller Beitrag zur Vision Zero geleistet werden.

## 7. Literatur

- [1] Statistisches Bundesamt, „Verkehrsunfälle 2018,“ Wiesbaden, 2019.
- [2] M. Maurer, J. C. Gerdes und B. Lenz, Autonomes Fahren, H. Winner, Hrsg., Heidelberg: Springer Vieweg, 2015.
- [3] D. Blower, „Assessment of the effectiveness of advanced collision avoidance technologies,“ 2014.
- [4] J. M. Wille und M. Zatloukal, „rateEFFECT - Effectiveness evaluation of active safety systems,“ in *5th International Conference on ESAR 2012*, 2012.
- [5] S. Busch, „Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme,“ Berlin, 2005.
- [6] C. Erbsmehl, „Simulation of real crashes as a method for estimating the potential benefits of advanced safety technologies,“ in *Proceedings of the 21st international technical conference on the enhanced safety of vehicles (ESV 2009)*, 2009.
- [7] T. Hummel, M. Kühn, J. Bende und A. Lang, Fahrerassistenzsysteme: Ermittlung des Sicherheitspotenzials auf Basis des Schadensgeschehens der Deutschen Versicherer, Berlin, 2011.
- [8] K. Langwieder, J. Gwehenberger und T. Hummel, „Sicherheitsgewinn durch ESP - Internationale Erfahrungen aus Realunfällen,“ in *1. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme*, München, 2004.
- [9] S. Alvarez, Y. Page, U. Sander, F. Fahrenkrog, T. Helmer, O. Jung, T. Hermitte, M. Düring, S. Döring und O. O. Camp, „Prospective Effectiveness Assessment of ADAS and Active Safety Systems via virtual Simulation: A Review of the current practices,“ *ESV*, 2017.
- [10] T. Helmer, Development of a methodology for the evaluation of active safety using the example of preventive pedestrian protection, Springer, 2014.
- [11] Elektrobit, „EB Assist ADTF,“ [Online]. Available: <https://www.elektrobit.com/products/automated-driving/eb-assist/adtf/>. [Zugriff am 16 August 2019].
- [12] H. Appel, G. Krabbel und D. Vetter, Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion, Kippenheim: Verlag INFORMATION Ambis GmbH, 2002.

- [13] D. Otte, „In-Depth-Unfallforschung und deren Möglichkeiten der Nutzung von Daten - Ein historischer und prospektiver Überblick,“ in *1. ADAC Symposium Unfallforschung*, Landsberg am Lech, 2015.
- [14] Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt), *Unfallforschung - GIDAS*, 2015.
- [15] Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH (VUFO), „Codebook GIDAS,“ Dresden, 2019.
- [16] Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH (VUFO), „Codebook GIDAS based Pre-Crash-Matrix,“ Dresden, 2019.
- [17] L. Stark, M. Düring, S. Schoenawa, J. E. Maschke und C. M. Do, „Quantifying Vision Zero: Crash Avoidance in rural and motorway accident scenarios by combination of ACC, AEB and LKS projected to German accident occurrence,“ *Traffic Injury Prevention*, 2019.
- [18] S. Schoenawa, „Pegasus Projekt, Kritische Szenarien für den Menschen,“ 2017. [Online]. Available: [https://www.pegasusprojekt.de/files/tmpl/PDF-HZE/05\\_Kritische-Szenarien-fuer-den-Menschen.pdf](https://www.pegasusprojekt.de/files/tmpl/PDF-HZE/05_Kritische-Szenarien-fuer-den-Menschen.pdf). [Zugriff am 23 August 2019].
- [19] A. Bartels, K.-H. Siedersberger, M. Schiementz, H. Schmitt, H. Schittenhelm, U. Eberle, F. von Zeppelin und J. Mazzega, „Autobahn-Chauffeur Systembeschreibung,“ 2017.
- [20] SAE International, *SAE J3016*, 2014.
- [21] Verband der Automobilindustrie e. V., *Automatisierung*, 2015.
- [22] L. Stark, S. Obst, S. Schoenawa und M. Düring, „Towards Vision Zero: Addressing White Spots by Accident Data based ADAS Design and Evaluation,“ in *2019 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, Cairo, 2019.



## **Behavior of sensor systems for safety in automated driving with different weather conditions under reproducible conditions**

**Dr. D. Schöppe, Dr. D. Steinhauser, B. Thöresz, S. Hasirlioglu,**  
**Prof. Dr. T. Brandmeier,**  
Center of Automotive Research on Integrated Safety Systems and  
Measurement Area (CARISSMA), Technische Hochschule Ingolstadt

### **Zusammenfassung**

Die Steigerung der Sicherheit und des Komforts durch Fahrerassistenzsysteme bis hin zum automatisierten Fahren ist durch technische Herausforderungen wie Sensorik, Signalverarbeitung, der Funktionsentwicklung bis hin zur entsprechenden Aktuatorik geprägt. Die Problematik, die Sicherheit beim automatisierten Fahren sicherzustellen, liegt vor allem in der Vielfalt der Situationen, unter denen das Gesamtsystem Fahrzeug zuverlässig funktionieren muss. Betrachtet man nur eine regelmäßige tägliche Fahrt zur Arbeit, so ergeben sich schon aufgrund unterschiedlicher Witterungs- oder Verkehrsverhältnisse eine sehr große Anzahl von Randbedingungen. Heute fehlt es an umfassenden Möglichkeiten, um Sensoren gezielt zu testen und Simulationsmodellen zur Situationserkennung unter vorgenannten Bedingungen zu validieren.

Durch Schaffung reproduzierbarer Randbedingungen in einer definierten Versuchsumgebung werden Verfahren zum Testen der Performance von Sensorsystemen und die Generierung einer Basisdatenbank ermöglicht. Hiermit können Simulationen validiert und Modelle für Funktionen und (Sensor-)Störgrößen entwickelt werden.

Am Beispiel der Witterungseinflüsse, die besonders kritisch für die Sensorsysteme sind, wird dieser Prozess beispielhaft untersucht. Zunächst wird der Einfluss von Regen und Nebel auf verschiedene Sensorsysteme des automatisierten Fahrens dargestellt. Mit Hilfe spezieller Testanlagen wird der Einfluss der Witterungsbedingungen auf die Sensoren quantifiziert. Dazu werden kalibrierbare Nebel- bzw. Regenanlagen im Testfeld eingesetzt. Ein Schwerpunkt bilden die Untersuchungen der Radartechnik, da sie bei widrigen Sichtbedingungen ein hohes Potenzial der Gefahrendetektion und -bestimmung aufweist. Die Versuchshalle musste für die Radaruntersuchungen so optimiert werden, dass in der Versuchsumgebung wenig störende Reflektionen auftreten, damit die volle Funktion bezüglich der Radare getestet werden kann.

## Abstract

Increasing safety and comfort by driver assistance systems up to automated driving is characterized by technical challenges such as sensor technology, signal processing, functional development, and the corresponding actuator technology. The challenge of ensuring the safety of automated driving lies above all in the variety of situations in which the entire vehicle system has to operate reliably. Considering only a regular daily commute to work a huge number of constraints arise due to different weather or traffic conditions. Today there is a lack of comprehensive possibilities to test sensors and to validate simulation models for situations under the conditions mentioned above.

By creating reproducible boundary conditions in a defined test environment, methods for testing the performance of sensor systems and generating a database is possible. Thereby simulations can be validated and models for functions and sensor noise can be developed.

Considering the example of weather conditions, which are particularly critical for sensor systems, this process is investigated exemplary. First, the influence of rain and fog on different sensor systems of automated driving is shown. Using specialized test equipment, the influence of weather conditions on the sensors is quantified. For this purpose, calibratable fog or rain systems in the test hall are used. One focus is on radar technology, as it has a high potential for hazard detection in critical visibility conditions. The test hall had to be optimized for the radar testing that little disturbing reflections occur in the test environment and the full function regarding the radar sensors can be tested.

## 1. Einleitung und Motivation

Im Jahr 2018 wurden in Deutschland 5 067 Unfälle mit Personenschaden gemeldet, die aufgrund schlechter Wetterverhältnisse wie Nebel, Regen, Schnee oder Hagel entstanden sind [1]. Schlechtes Wetter und eine mangelhafte Wahrnehmung wirken sich beim Fahren allerdings nicht nur auf den Menschen aus, sondern auch Sensorik kann hierdurch gestört werden. Aktuelle Prognosen und Tests zeigen, dass autonome Fahrzeuge aufgrund der Sensoren derzeit noch Probleme bei schlechten Wetterbedingungen vorweisen [2]. Um automatisiertes Fahren verwirklichen zu können, müssen Sensorsysteme jedoch bei jeder Umgebung und Umweltbedingung zuverlässige Informationen bereitstellen.

Einige Untersuchungen mit Sensoren bei Regen und Nebel weisen darauf hin, dass schlechte Witterungsbedingungen eine besondere Herausforderung für die Wahrnehmung der Fahrzeugumgebung durch Sensorik darstellen. Beispielsweise wurde in [3] ein um 10,2 % geringerer Abstand zum Objekt mittels LiDAR bei Regen gemessen. Für Radar wurde bei Regen mittels eines 76 GHz Serienradars zusätzliche Cluster im Nahbereich des Sensors beobach-

tet [4]. Die Bildqualität von Kamerabildern kann durch Regen bzw. Nebel deutlich verschlechtert sein, wie exemplarisch in [5 bis 6] gezeigt wird. Die aufgeführten Beispiele verdeutlichen, dass unterschiedlichste Probleme durch Witterung hervorgerufen werden und keine Sensorart perfekt bei allen Wetterbedingungen ist. Störungen durch Regen bzw. Nebel können durch eine teilweise Rückstreuung der elektromagnetischen Welle an den Wassertropfen zum Sensor hervorgerufen werden [7]. Eine weitere Störungsursache ist unter anderem eine durch die Wassertropfen verminderte Transmission, welche eine Dämpfung der Objektintensität bewirken kann [7]. Das Ausmaß solcher Störungen sind von spezifischen Sensoreigenschaften (z.B. Wellenlänge) wie auch der Witterungsbedingungen (z.B. Regenintensität, Größe der Regentropfen, etc.) abhängig. Daher sind Untersuchungen mit verschiedenen Sensortypen wie auch bei unterschiedlichsten Witterungsbedingungen notwendig.

Um Unfälle zu vermeiden bzw. die Schwere von Sach- wie Personenschäden zu vermindern, ist es wichtig zu erkennen, was sich aktuell an Objekten im Umfeld befindet. Das Nahumfeld des Fahrzeugs ist hierbei ins Besondere für zukünftige Sicherheitsfunktionen im Bereich des PreCrashes, wie einer frühzeitigen Aktivierung eines Airbags, relevant. Das Fahrzeug muss dabei unter allen Wetterkonditionen seine nahe Umgebung erkennen und präzise und zuverlässige Informationen auswerten können, um eine adäquate Entscheidungsfindung zu gewährleisten. Hierfür werden reproduzierbare Tests in einer kontrollierten Umgebung, welche es ermöglichen soll, unterschiedliche Umweltbedingungen zu untersuchen, benötigt. Im Folgenden wird daher der Aufbau einer Testumgebung beschrieben, die es ermöglicht unterschiedliche Regen- und Nebelszenarien zu generieren.

## 2. Aufbau einer Testumgebung

Um Sensorik für das autonome Fahren unter verschiedenen Bedingungen testen zu können, wird eine Testumgebung aufgebaut in dem die Indoor Versuchshalle in CARISSMA mit zusätzlicher Gebäudeinfrastruktur erweitert wird. Der wesentliche Vorteil beim Indoor-Betrieb ist die Unabhängigkeit vom aktuellen Wetter und die Möglichkeit einer kontrollierten Umgebungsbedingung. Der Fokus liegt insbesondere auf die gezielte Umsetzung von realitätsnahen Umweltbedingungen, um die Auswirkungen von Störeinflüssen auf vorausschauende Fahrzeugsensorik untersuchen zu können. Hierzu müssen Umweltbedingungen wie Regen, Nebel und Beleuchtung einstellbar und kontrollierbar sein und relevante Charakteristiken des realen Regen und Nebels Indoor nachgebildet werden. Nachfolgend werden hierzu die Regen- und Nebelanlage vorgestellt. Des Weiteren ist es wesentlich, Sensorversuche nicht nur mit statischen Targets durchführen zu können, sondern auch in dynamischen Fahrsituationen um die Funktionstüchtigkeit der Sensorik und der nachstehenden Algorithmen in mög-

lichst vielen realitätsnahen Fahrsituationen untersuchen und mit abdecken zu können. Auf der Indoor Versuchsanlage stehen hierzu eine Versuchsfläche von 100 m Länge und 18 m Breite zur Verfügung, in der Fahrversuche bis zu einem mittleren Dynamikbereich von 50 km/h durchgeführt werden können. Neben realen Fahrzeugen können auch Attrappen (z.B. Fußgänger, Fahrzeug), die auf einem überfahrbaren, autonomen Plattformroboter montiert sind, zum Einsatz kommen. In Bild 1 ist die Versuchshalle zu sehen. Um Radarsensorik auf der Indoor-Anlage verwenden zu können, wurden auf den Barrieren entlang der Versuchsfläche Radarabsorberpanele angebracht, die Störungen vermindern. Der jetzige Stand wird aktuell simulationsgestützt weiter optimiert, um gezielt starke Direkt- und Mehrfachreflexionen zu unterdrücken und dadurch eine geeignete Testfläche für heutige und zukünftige Fahrzeug- und Systemtests inklusive der Verwendung von Radarsensoren zu schaffen. Die entstandene Testumgebung, mitsamt der Regen- und Nebelanlage, bietet die Möglichkeit zum Testen von Sensorperformances, dem Vergleich von verschiedenen Sensoren, einer Basis zur Entwicklung von Detektions- und Klassifikationsalgorithmen und dem Aufbau von Datenbanken.



Bild 1: Indoor Versuchshalle mit installierten Radarabsorberpanelen

## 2.1. Regenanlage

Beim Aufbau der Regenanlage steht die Nachbildung von möglichst realitätsnahen Regenszenarien im Fokus. Hierzu wurde mit spezieller Messtechnik in Ingolstadt über einen längeren Zeitraum realer Regen vermessen, um Referenzwerte für die Auslegung der Regenanlage zu erhalten. Die Ergebnisse flossen in eine stetige Optimierung der Anlagentechnik ein. Insbesondere die Größe der Regentropfen ist ein wichtiges Merkmal zur Charakterisierung des Regens. Neben einer mittleren Größe ist zudem das Vorhandensein einer Verteilung von großen und kleinen Tröpfchen notwendig [8], um realen Regen zu simulieren. Dabei treffen in der Natur Regentropfen mit einem Durchmesser zwischen 0,5 mm und 5 mm auf den Boden. Das besondere Augenmerk auf die Tröpfchengrößenverteilung bei der Konstruktion der Regenanlage hat den Hintergrund, dass ausgehend von theoretischen Betrachtungen die Störungswirkung durch Regentropfen auf vorausschauende Sensorik im Wesentlichen von dem Verhältnis von Tropfenradius zur Wellenlänge des Sensors abhängt [7].

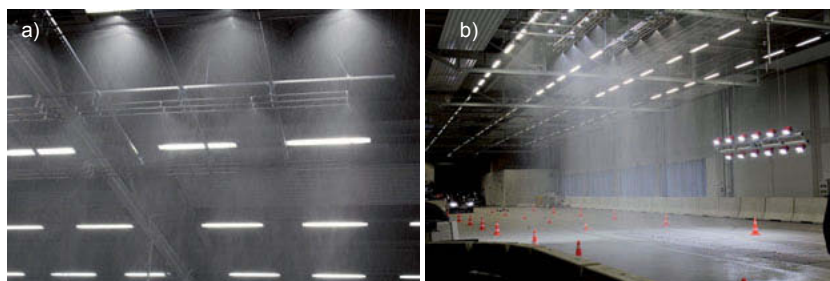


Bild 2: a) Düsensystem zur Erzeugung von Regentropfen  
b) Versuchsfläche mit Regen auf einer Länge von 50 m

Mittels eines Testaufbaus [9] und einem anschließenden, im Vergleich zur aktuell vorhandenen Anlage kleinen Prototypen, wurden erste Tests zur Entstehung von Regen mittels eines Düsensystems durchgeführt. Der erzeugte Regen wurde charakterisiert und erste Störungseinflüsse auf Sensoren untersucht. Basierend hierauf wurde ein Konzept für eine ca. 50 m lange und etwa 4 m breite Anlage entworfen und umgesetzt (siehe Bild 2). Die Reproduzierbarkeit der Witterungsverhältnisse steht dabei im Mittelpunkt des Aufbaus. Die Anlage wird mit drei starken Wasserpumpen betrieben, die ein großflächiges Netz aus Rohren und Schläuchen speisen. An den Kegeldüsen wird das mit Druck anliegende Wasser aufgefächert, sodass sich großflächig Wassertropfen bilden können. Die Regenstärke ist bis zu einer

Intensität von ca. 100 mm/h einstellbar und kann dem gewünschten Regenszenario angepasst werden. Die Länge der Regenfläche kann in 4,2 m Schritten bis zu einer maximalen Länge von 50 m erhöht werden. Neben dem Regeneffekt können ebenfalls die Auswirkungen von nassem Asphalt auf die automotive Umfeldsensorik untersucht werden.

## 2.2. Nebelanlage

Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % beginnt die Feuchtigkeit der Luft bei einer Differenz der Temperatur und des Taupunkts  $\leq 3^{\circ}\text{C}$  zu kondensieren. Es entsteht Nebel. In der Natur gibt es verschiedene Ursachen und damit Arten von Nebel. Zu erwähnen sind folgende Arten: Advektion (maritimer Nebel), bei der sich warme Luft über einer kalten Oberfläche befindet, Orographie (Bergnebel), Verdunstung (nach Niederschlägen) und Strahlung (kontinentaler Nebel). Beim Strahlungsnebel gibt der Boden Wärme an die Luft ab. Es entstehen fein verteilte Wassertröpfchen in Bodennähe, welche insbesondere das einfallende Licht streuen, was zu einer verminderten Sichtweite führt.

Um Nebel Indoor nachzubilden wurden zunächst verschiedene Voruntersuchungen zur Erzeugung von Nebel mittels Ultraschallvernebler [5] bis hin zu verschiedenen Düsensystemen durchgeführt. Vielversprechende Ergebnisse lieferte ein Düsensystem, das im Vergleich zu anderen Methoden homogenen und nicht nur stark lokal konzentrierten Nebel erzeugt und eine deutlich bessere Integration in der Halle erlaubt. Zunächst wurde ein prototypischer Testaufbau von 10 m mit unterschiedlichen Düsen errichtet und die Eigenschaften des Nebels untersucht. Insbesondere wurde auch die Tröpfchengrößenverteilung mit einem Aerosolmessgerät gemessen. Anschließend wurde das Düsensystem, bestehend aus Strängen von Düsen unterschiedlichen Durchflussvolumens, optimiert und auf einer Länge von 50 m installiert. Es wird ein stehender Nebel im Bereich unterhalb der Regenanlage erzeugt, welcher, anhand der gemessenen Eigenschaften, mit dem Strahlungsnebel verglichen werden kann.

Die Anlage kann in zwei verschiedenen Betriebsarten Nebel erzeugen. Im pulsierenden Betrieb wird die Nebelerzeugung in festen Zeitintervallen gestartet und gestoppt. In einer zweiten Betriebsart kann auf ein Eingangssignal geregelt werden. Momentan stehen hier die Feuchtigkeit sowie die Sichtweite als Regelungsparameter zur Verfügung. Typische Einstellungen der Sichtweite für Tests liegen zwischen 10 m und 100 m.

### 3. Verhalten von vorausschauender Sensorik unter schlechten Umweltbedingungen

Zur demonstrativen Verwendung der aufgebauten Testumgebung wurden Messungen mittels verschiedener Sensorik und unterschiedlichen Szenarien durchgeführt. Nachfolgend werden beispielhaft einige Ergebnisse dargestellt, welche die Störung der Radarsensorik und der Kamera durch Regen bzw. Nebel im Nahumfeld des Sensors verdeutlicht. Als Referenz wurde jeweils das gleiche Szenario ohne Regen und Nebel gemessen. Für die Radarmessungen wurde ein hochauflösender 76 GHz Radar mit Bandbreite von 2 GHz verwendet, um für zukünftige PreCrash-Anwendungen im Nah-Umfeld des Fahrzeugs die Entfernung in notwendiger Genauigkeit bestimmen zu können.

#### 3.1 Messungen bei Regen

Um die Störung der Sensorik durch Regen zu untersuchen, wurden Tests mit drei verschiedenen Regenintensitäten durchgeführt: leichter Regen mit 16 mm/h, mittlerer Regen mit 66 mm/h, starker Regen mit 98 mm/h. Hierbei wurde in einer Messreihe verschiedene Objekte betrachtet. In Bild 3 sind Kamerabilder eines sich nähernden Fahrzeugs jeweils im Abstand von ca. 5 m zum Sensor zu sehen. Durch den Regen verringert sich der Kontrast des Bildes und die Kontur des Fahrzeugs hebt sich schlechter von seiner Umgebung ab. Zusätzlich sieht man Spiegelungen des Fahrzeugs, insbesondere der Scheinwerfer, auf der nassen Fahrbahn. Dies erschwert eine Fahrzeugdetektion und die Bestimmung von Objektparametern.

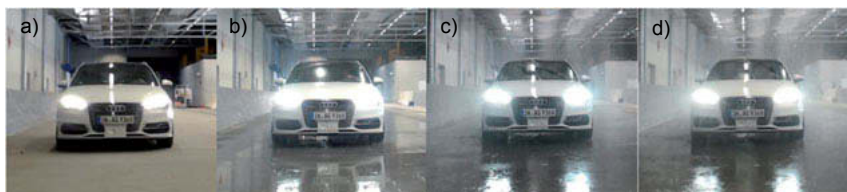


Bild 3: Kameraaufnahmen bei verschiedenen Regenstärken. a) ohne Regen  
b) leichter Regen c) mittlerer Regen d) starker Regen

Zur Untersuchung des Einflusses von Regen auf Radarmessungen wurde ein Winkelreflektor mit einer Kantenlänge von 10 cm in einem Abstand von 10,4 m vor den Sensor aufgestellt. Der Winkelreflektor stellt im Radar ein reflektierendes Punktziel dar und wird oftmals als definiertes Zielobjekt zur Bewertung der Radarsensorik verwendet. Die Radarmessungen wurden in einer noch nicht optimalen Testumgebung aufgenommen und es sind zusätzliche Ob-

jekte durch Wand und Decke mit geringer Intensität sichtbar. In Bild 4 ist die rückgestreute Intensität über dem Abstand für die unterschiedlichen Regenintensitäten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Intensität des Winkelreflektors bei 10,4 m durch den Regen nicht ändert. Im Nahfeld des Sensors ist eine signifikante Abschwächung der Intensität durch verringerte Transmission der Radarwellen durch die Regentropfen auch nicht zu erwarten, da die Abschwächung bei 76 GHz und starkem Regen im Bereich von nur 60 dB/km zu erwarten ist [7]. Was hingegen deutlich zu beobachten ist, ist ein Anstieg des Sensorrauschens im sehr nahen Umfeld des Sensors von ca. 1 m bis ca. 7 m. Hierbei ist zu beachten, dass der Sensor in einem Abstand von 1 m vor die berechnete Fläche gestellt wurde, um das Messsequipment trocken zu halten und keinen Einfluss durch einen Wasserfilm auf dem Radom zu bekommen. Die vom Radarsensor ausgestrahlte Radarwelle trifft teilweise auf Regentropfen, welche einen Anteil zurückstreuen, was sich als Rauschen in den Messdaten des Sensors widerspiegelt. Die Erhöhung des Rauschens kann eine Objekterkennung im sehr nahen Umfeld des Sensors für zum Beispiel PreCrash-Anwendungen kurz vor dem Kollisionspunkt beträchtlich beeinflussen, wie nachfolgend an Beispielen verdeutlicht wird.

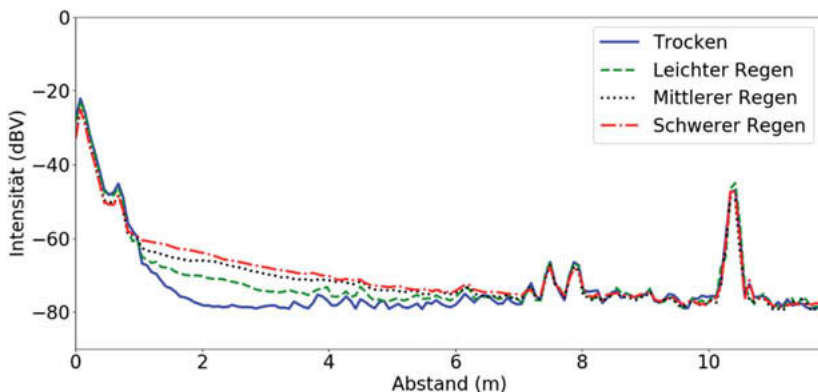


Bild 4: Vergleich von Radarmessungen eines Winkelreflektors bei verschiedenen Regenstärken

Es wurden Versuche mit einem sich nähernden Fahrzeug durchgeführt, das im Abstand von ca. 5 m vor dem Sensor ein Ausweichmanöver in Form einer Kurve beginnt. In Bild 5 ist exemplarisch das Fahrzeug im Radarbild nach einem Detektionsalgorithmus mit adaptiver Schwelle für einen Zeitpunkt abgebildet. Ohne Regen sind hier nur Detektionen vorhanden, die durch Reflektionsstellen am Fahrzeug erzeugt wurden. Es ist ein Teil der Kontur des Fahrzeugs zu erkennen und insbesondere ist der am nächsten liegende Punkt des Fahr-



zeugs zum Sensor deutlich sichtbar, welcher z.B. für ein frühzeitiges Bewerten einer gefährlichen Situation durch ein mögliches Kollisionsobjekt von Bedeutung ist. Hingegen wird die Messung im Regen durch das Rauschen im Nahfeld deutlich gestört. Es ist keine klare Abgrenzung der Fahrzeugkontur mehr zu erkennen. Dies ist problematisch für Standard-Cluster-Algorithmen, wie z.B. die dichtebasierte Clustermethode DBSCAN [10], da diese durch Clusterung von Detektionspunkten Objekte bilden. Um trotz Regen Objekte im Nahfeld zuverlässig identifizieren und präzise Objektinformationen bestimmen zu können, müssen Detektions- und Clusteralgorithmen sowie nachfolgende Funktionen für zukünftige Sicherheitssysteme die entstandenen Störungen durch die Regentropfen berücksichtigen. Das Messergebnis verdeutlicht, dass das Testen von Sensorsystemen unter verschiedenen Witterungsbedingung unumgänglich ist. Die Umweltbedingungen müssen untersucht werden um daraufhin Optimierungen durchführen zu können, die dem Ziel dienen ein sicheres, automatisiertes Fahren bei jeder Umgebung zu realisieren.

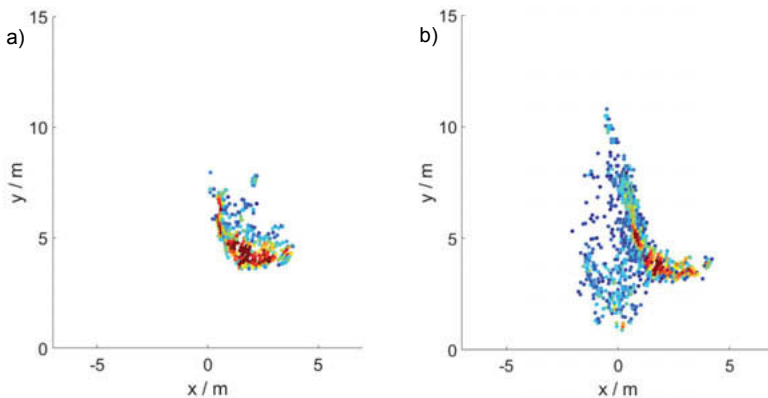


Bild 5: x-y-Darstellung eines sich nähernden Fahrzeugs. a) trocken.  
b) mit starkem Regen.

Ein Vorteil von Radar gegenüber anderer Sensorik ist die direkte Messung der radialen Geschwindigkeit. In Bild 6 ist eine Momentaufnahme eines Fußgängers im Abstands-Geschwindigkeitsdiagramm zu sehen, der sich radial auf den Sensor zubewegt. Der Fußgänger befindet sich in der Gehphase (siehe Kamerabild in Bild 6c), in der ein Bein steht und das andere am Durchschwingen mit maximaler Geschwindigkeit ist. Der Fußgänger erscheint im Radar (siehe Bild 6a) als ein ausgedehntes Ziel mit unterschiedlichen Geschwin-

digkeitskomponenten, welches als Mikro-Doppler-Effekt bezeichnet wird und hervorgerufen ist durch die unterschiedliche Bewegung der Gliedmaßen beim Gehen [11]. Die Mikro-Doppler-Merkmale stellen wichtige Informationen für automotiv Sicherheitssysteme dar und können beispielsweise zur Klassifikation von Fußgängern verwendet. Ohne Regen ist der Mikro-Doppler Effekt deutlich zu erkennen und kann problemlos extrahiert werden. Durch den Regen, wie in Bild 6 b) zu sehen ist, entsteht eine Störung im unteren Geschwindigkeitsbereich. Der radiale Anteil der Geschwindigkeit der fallenden Regentropfen spiegelt sich daher in einem Rauschen wieder, das durch die an den Regentropfen direkt rückgestreute Welle erzeugt wird. Dies stört die Beobachtung von Objekten, die sich langsam bewegen wie zum Beispiel ein Fußgänger. Da eine gute Trennfähigkeit von Objekten im Radar insbesondere durch die Geschwindigkeit erfolgt [12] kann diese Störung erhebliche Auswirkungen auf die Objekterkennung und Klassifikation von Verkehrsobjekten haben. Dies muss in zukünftigen Analysen noch genauer untersucht werden. Für den Fußgänger bedeutet dies zudem, dass der Mikro-Doppler Effekt nicht mehr problemlos extrahiert werden kann und Methoden entwickelt werden müssen, um eindeutige Informationen trotz Regenstörung zu erhalten.

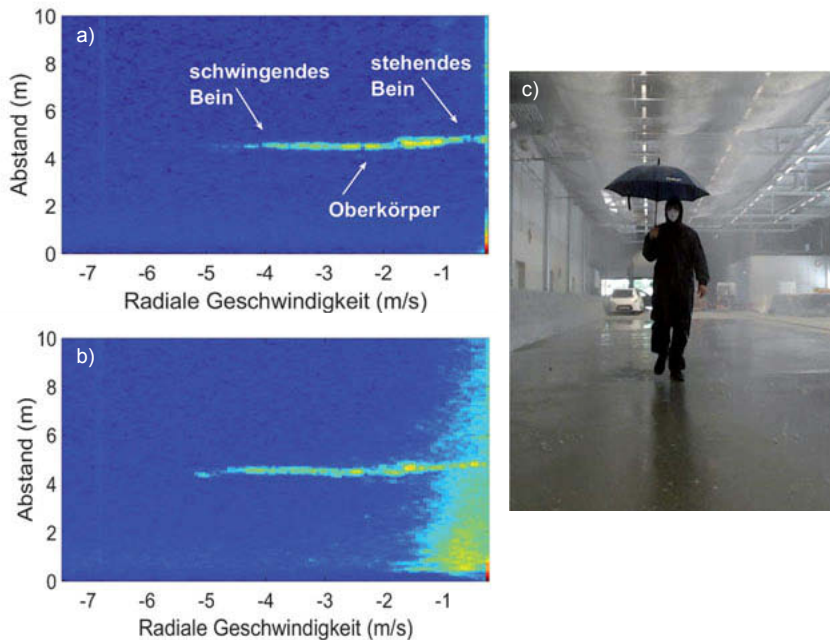


Bild 6: Radial in Richtung des Sensors gehender Fußgänger. Radarmessung  
a) ohne Regen b) bei starkem Regen c) Kamerabild bei starkem Regen.

### 3.2 Nebel

Es wurden Nebelversuche durchgeführt, bei denen zwei verschiedene Nebeldichten eingestellt wurden. Zur Charakterisierung der Nebelstärke wurde die Nebeldichte in Sichtweite in Metern gemessen. In Bild 7 sind Kameraaufnahmen eines Fahrzeugs im Abstand von ca. 5 m für verschiedene Nebelstärken zu sehen. Bild 7 b) zeigt den Einfluss des Nebels mit einer Sichtweite von etwa 50 Metern. Der Kontrast des Bildes ist gegenüber der Referenz ohne Nebel deutlich verringert und die Kontur des Fahrzeugs ist signifikant schlechter zu erkennen. Bei dichtem Nebel (siehe Bild 7 c) lassen sich kaum noch Konturen beobachten und es ist zudem eine starke Streuung des Scheinwerferlichts vorhanden. Dies verdeutlicht, dass Kamera zum Einsatz bei Nebel problematisch sein kann. Für ein sicheres automatisiertes Fahren müssen daher Systemgrenzen von optischen Sensorsystemen untersucht werden, um abschätzen zu können, wie verlässlich Informationen der Sensoren sind.



Bild 7: Kameraaufnahmen bei verschiedenen Nebelstärken a) trocken  
b) Nebel mit Sichtweite von 50 m c) Nebel mit Sichtweite von 10 m

Dieses Beispiel zeigt, welche Grenzen optische Kameras bei dichtem Nebel haben. Die Ergebnisse zeigen, dass es sinnvoll ist Sensoren mit verschiedenen Messprinzipien für ein sicheres automatisiertes Fahren zu verwenden, um alle möglichen Szenarien und Umweltbedingungen abdecken zu können. In Bild 8 ist eine Radarmessung eines Winkelreflektors bei dichtem Nebel mit einer Sichtweite von nur 10 m im Vergleich zur Referenz ohne Nebel zu sehen. Es ist kein Einfluss auf die Messung durch den Nebel im Nahfeld beobachtbar. Dies zeigte sich auch in weiteren durchgeführten Messungen mit unterschiedlichen Objekten. Das Ergebnis ist zudem konsistent mit theoretischen Überlegungen zum Einfluss von Nebel auf die Sensorik [7]. Folglich ist der Radarsensor ein wesentlicher Bestandteil eines Sicherheitssystems um zuverlässige Informationen zum Fahrzeugumfeld bei kritischen Umweltbedingungen zu erhalten.

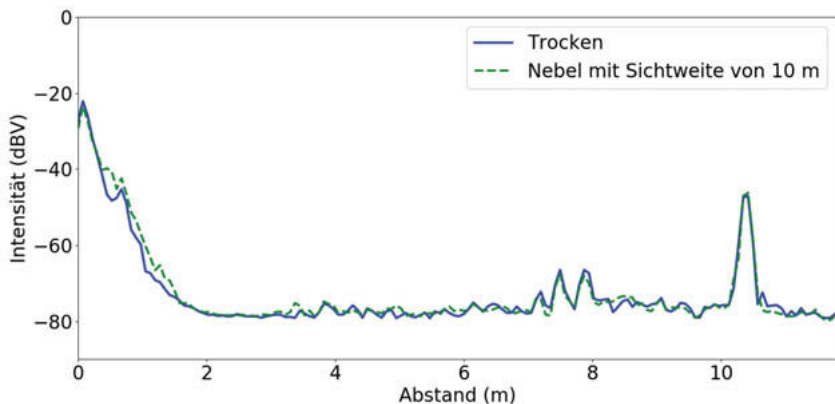


Bild 8: Vergleich von Radarmessungen eines Winkelreflektors bei verschiedenen Nebelstärken.

#### 4. Zusammenfassungen und Ausblick

Es wurde der Aufbau einer Testumgebung vorgestellt um Sensortests für das sichere automatisierte Fahren unter unterschiedlichsten Witterungsbedingungen realisieren zu können. Insbesondere wurden eine Regen- und Nebelanlage in der CARISSMA- Versuchshalle entwickelt und installiert, mit der die Witterung Indoor reproduzierbar nachgebildet werden kann. Hierdurch können Tests in einer kontrollierten und einstellbaren Umgebung durchgeführt werden. Die Testumgebung wird stetig optimiert und weiterentwickelt, um wichtige Testmöglichkeiten bezüglich des sicheren automatisierten Fahrens zu schaffen. Es wurde exemplarisch mittels einiger Versuche demonstriert, dass sowohl Regen als auch Nebel im Nahfeld von vorausschauender Sensorik intensiv analysiert werden müssen. In Kameraaufnahmen zeigte sich bei Regen sowie Nebel eine verminderte Bildqualität. Bei den Untersuchungen mit der Radartechnologie wurde ein Anstieg des Rauschens im sehr nahen Umfeld des Sensors beobachtet, was zu einer Verschlechterung von Objektdetektion und -klassifikation führen kann. Die Messergebnisse zeigen, dass es wichtig ist in zukünftigen Untersuchungen die Störungseinflüsse auf Sensorik sowie nachgeschalteten Algorithmen genauer zu analysieren und Sensorsysteme zu entwickeln, die bei allen Wetterbedingungen zuverlässige Informationen bereitstellen.

#### DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchten die Autoren ihren Dank an das Deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), insbesondere dem Programm „Forschung an Fachhochschulen“ (Förderkennzeichen 13FH71031A) und dem Projekt „Test und Entwicklung einer passiven Sicherheitsfunktion“ (Förderkennzeichen 13FH030PX5), für die finanzielle Unterstützung aussprechen.

## Referenzen:

- [1] Statistisches Bundesamt: Gesellschaft und Umwelt, Ursachen von Unfällen mit Personenschaden. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Destatis), 2019, Letzter Zugriff am 08.10.2019, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Tabellen/ursachen-personenschaden2.html>
- [2] Bratzel, S., & Thömmes, J.: Alternative Antriebe, Autonomes Fahren, Mobilitätsdienstleistungen: Neue Infrastrukturen für die Verkehrswende im Automobilsektor (No. 22). Schriften zu Wirtschaft und Soziales, 2018, pp.40-41
- [3] Filgueira, A., González-Jorge, H., Lagüela, S., Díaz-Vilariño, L., & Arias, P.: Quantifying the influence of rain in LiDAR performance. *Measurement*, 95, 2017, pp. 143-148
- [4] R. Gourova, O. Krasnov, and A. Yarovoy: Analysis of rain clutter detections in commercial 77 ghz automotive radar. 2017 European Radar Conference EURAD. 2017, pp. 25–28
- [5] S. Hasirlioglu, I. Doric, A. Kamann, and A. Riener, "Reproducible fog simulation for testing automotive surround sensors," in *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Sydney, NSW, Jun. 2017 - Jun. 2017, pp. 1–7
- [6] Hasirlioglu, S., Doric, I., Lauerer, C., & Brandmeier, T.: Modeling and simulation of rain for the test of automotive sensor systems. *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2016, pp. 286-291
- [7] S. Hasirlioglu and A. Riener: Introduction to rain and fog attenuation on automotive surround sensors. *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2017, pp. 1–7
- [8] M. Colomb, P.Duthon, S. Laukkanen: Characteristics of Adverse Weather Conditions. 2017 DENSE D2.1. 2017, [www.DENSE247.eu](http://www.DENSE247.eu).
- [9] S. Hasirlioglu, A. Kamann, I. Doric, and T. Brandmeier: Test methodology for rain influence on automotive surround sensors. *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2016, pp. 2242–2247
- [10] M. Ester, H. Kriegel, J. Sander, and X. Xu: A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. *Proc.of 2nd International Conference on Knowledge Discovery and DataMining*. 1996, pp. 226–231
- [11] P. Held, D. Steinhauser, A. Kamann, T. Holdgrün, I. Doric, A. Koch, and T. Brandmeier: Radar-based analysis of pedestrian micro-doppler signatures using motion capture sensors. 2018 29th IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). 2018
- [12] H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, and C. Singer, eds.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015

## X-Ray Car Crash (X-CC)

### Hochdynamisches Röntgen beim Crash analysiert künftige Fahrzeuggenerationen

Dr. **Jens Fritsch**, Fraunhofer EMI, Freiburg;  
Prof. **Norbert Schaub**, Daimler AG, Sindelfingen;  
Dr. **Stefan Moser**, Fraunhofer EMI, Efringen-Kirchen

#### 1. Kurzfassung

Die zielgerichtete Weiterentwicklung der dynamischen Hochenergie-Röntgendiagnostik ermöglicht die Sichtbarmachung von schnell ablaufenden Deformationsprozessen im Innern eines Fahrzeugs während eines Crashversuchs. Damit eröffnet sich ein zusätzliches Beobachtungsfenster zu Erhebung experimenteller Daten für den Abgleich mit den Ergebnissen aus prädiktiven FE-Crashsimulationen. Bedingt durch die inhärente Reduktion von 3D Deformationsinformationen realer Komponenten auf ein 2D Röntgenbild, bedarf es der Entwicklung eines integralen Auswerteverfahrens unter Einbeziehung zu Verfügung stehender ab-initio Informationen aus der FE-Simulation. Dieser als Datenassimilation getaufter Prozess ermöglicht die Rückprojektion der 2D Daten in die 3D Welt und ist notwendig für den quantitativen Vergleich von Experiment und Simulation. Zusätzlich zu der daraus resultierenden konventionellen (geometrischen) Abweichungsanalyse wird ein neuartiges Vorgehen zur Rückführung von Daten in die FE-Simulation vorgeschlagen.

#### 2. Motivation und Idee

In Deutschland starben im Jahr 2018 mehr als 3200 Menschen an den Folgen eines Verkehrsunfalls (EU weit waren es mehr als 25.500), ca. weitere 400.000 Menschen wurden leicht oder schwer verletzt. Deshalb ist es nach wie vor ein zentrales Anliegen der Automobilindustrie, neue Fahrzeuge sicherer zu gestalten – sowohl für die Insassen als auch für andere Unfallbeteiligte wie Fußgänger und Radfahrer. Auch die Entwicklung neuartiger Fahrzeug- und Antriebskonzepte, die im Zuge des Klimawandels und zunehmender Ressourcenknappheit die Mobilität der Zukunft bestimmen werden, schaffen neue Herausforderungen beim Thema Fahrzeugsicherheit. Das gilt besonders für die großflächige Einführung der beiden Technologien Elektromobilität und autonomes Fahren. Neuartige Konstruktionsweisen, veränderte Masseverteilungen und spezielle Schutzstrukturen für alternative Energiespeichersysteme

(Batteriepacks, Wasserstofftanks) führen zu neuen Lastpfaden im Crashfall. Um die Sicherheit neuer Modelle und Komponenten sowie komplett neuer Fahrzeugkonzepte zu testen und zu gewährleisten, setzt die gesamte Branche zunehmend auf die Digitalisierung und Virtualisierung der automobilen Produktentwicklung. Für deren zuverlässige Prognosefähigkeit nutzt die Automobilindustrie sowohl hoch instrumentierte experimentelle Crashtests als auch detaillierte virtuelle Crashtestsimulationen.

Die Entwicklung neuer Komponenten und Prototypen erfolgt aus Effizienzgründen zu einem großen Teil auf Basis der Ergebnisse numerischer Simulationen. Obwohl sich die Prognosefähigkeit der Crashtestsimulation in den letzten Jahren deutlich verbessert hat, können die Einführung neuer Leichtbaumaterialien (Verbund- oder Hybridwerkstoffe), das oftmals damit einhergehende komplexe Materialversagen, die teils notwendige Nutzung vereinfachter Materialmodelle und neue Verbindungstechnologien immer noch zu Unterschieden zwischen numerischer Simulation und physikalischem Experiment führen. Außerdem verlangen Gesetzgeber und Ratinginstitute die Durchführung von Hardwareversuchen. Daher sind Crashtests trotz ihrer hohen Kosten immer noch für den Nachweis der Fahrzeugsicherheit notwendig und vorgeschrieben. Gleichzeitig ermöglichen sie die Bewertung und Validierung der numerischen Simulationsmodelle, die entlang des gesamten Entwicklungsprozesses eingesetzt werden. Dazu müssen im Rahmen der experimentellen Untersuchungen möglichst viele Daten mit maximaler Genauigkeit und Datendichte (Punktraster  $< 5$  mm, Genauigkeit  $< 0,5$  mm) gewonnen werden. Nur so können anschließend die Parameter für die Simulationen wirklichkeitsgetreu eingestellt werden, um Simulationsmodelle mit guten Prognoseeigenschaften zu generieren. Unter Crashbelastungen finden die für die Fahrzeugsicherheit entscheidenden dynamischen Deformations- und Versagensprozesse an innenliegenden Komponenten eines Fahrzeugs statt. Diese sind für optische Messsysteme nicht oder nur ausschnittsweise zugänglich und können daher bislang nicht bildgebend in-situ untersucht werden.

Hier setzt das X-Ray Car Crash (X-CC) Projekt an: Mittels einer neuartigen, dynamischen Hochenergie-Röntgendiagnostik sollen wertvolle Informationen über die Deformations- und Versagensprozesse ehemals verborgener Strukturen während eines Crashes generiert werden. Es wird dazu ein integrales Mess- und Auswerteverfahren bestehend aus Hochgeschwindigkeits-2D-Röntgenbildgebung und Einbeziehung von 3D-FE-Simulationen des Vorgangs entwickelt, das die quantitative Rückspiegelung experimenteller Informationen in die digitale Ent-



wicklungsumgebung gestattet. Dies ermöglicht die Optimierung prädiktiver Simulationsmodelle und dient somit als Teil-Voraussetzung für das Erreichen des Ziels einer rein virtuellen Entwicklung im Automobilbereich.

### 3. Erste Pilotanwendung

Das hohe Potential der Technologie konnte bereits durch erste Umsetzungen, wie etwa der Beobachtung von Türschließmechanismen beim Seitenaufprall während des Crashes, gezeigt werden. Wie in vielen anderen denkbaren Anwendungen lag in diesem Fall die Motivation zur Nutzung von Röntgen im Crash in der Sichtbarmachung ansonsten nicht beobachtbarer Strukturdeformationen.



Bild 1: Aufbau Seitencrash als Pilotanwendung.

Um die Insassen bei einem Unfall sicher im Fahrzeug zu halten, ist es u.a. zwingend notwendig, dass eine Türöffnung beim Crash vermieden wird. Sollte sich in einem Entwicklungsstadium zeigen, dass sich bei einem Seitenaufprall eine Türöffnung ergibt, ist es im derzeitigen Entwicklungsprozess gängige Vorgehensweise, aufwendig Messtechnik an vielen Stellen im Inneren des Schlosses zu applizieren. Durch die Untersuchung der Mechanismen mit Röntgentechnik konnte durch nur eine zusätzliche Analyse ein großer innenliegender Bereich betrachtet werden, um so Ursachen im Detail und voll umfassend zu erfassen. Bei der anschließenden Entwicklungsarbeit kann somit sofort an der richtigen Stelle angesetzt werden.

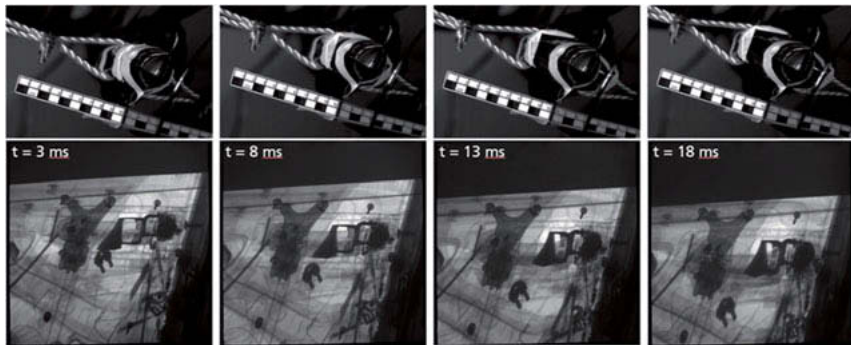


Bild 2: Darstellung einer Zeitreihe während eines dynamischen Türöffnungsvorgangs. In den Röntgenbildern ist die Mechanik des Mechanismus gut zu erkennen.

#### 4. Herausforderungen und Lösungsansatz

Auch wenn sich, wie in Kapitel 3 dargestellt, bereits wertvolle Informationen aus einzelnen Röntgenbildern ziehen lassen, so wird aus der Betrachtung von Bild 2 auch klar, dass die korrekte Interpretation der Bilder nur mit profundem Expertenwissen der beobachteten Komponente möglich ist. Die schwierige Interpretierbarkeit von Röntgenbildern ist dabei Resultat unterschiedlicher Ursachen. Ein Röntgenbild stellt prinzipiell die integrierten Absorptionseigenschaften aller Materialien und Komponenten, die zwischen Röntgenquelle und Detektor liegen, dar. Das bedeutet, dass die dreidimensionalen Objekte auf ein zweidimensionales Bild projiziert werden. Die Konturen der im Strahlengang hintereinanderliegenden Komponenten überlappen und werden daher schwerer identifizierbar. Hinzu kommt, dass kurze Durchstrahlungslängen von Materialien mit hohem Röntgenabsorptionskoeffizienten den gleichen Effekt haben können wie größere Durchstrahlungslängen von Materialien mit geringerem Absorptionskoeffizienten. Des Weiteren erfahren die Objekte in einem Röntgenbild unterschiedliche Vergrößerungen, abhängig von ihrer Position zwischen Quelle und Detektor, was zu Verzerrungen dreidimensionaler Objekte auf dem Röntgenbild führt. Der Vergleich eines Röntgenbilds mit der aufgenommenen Struktur als optisches Foto ist in Bild 3 dargestellt.

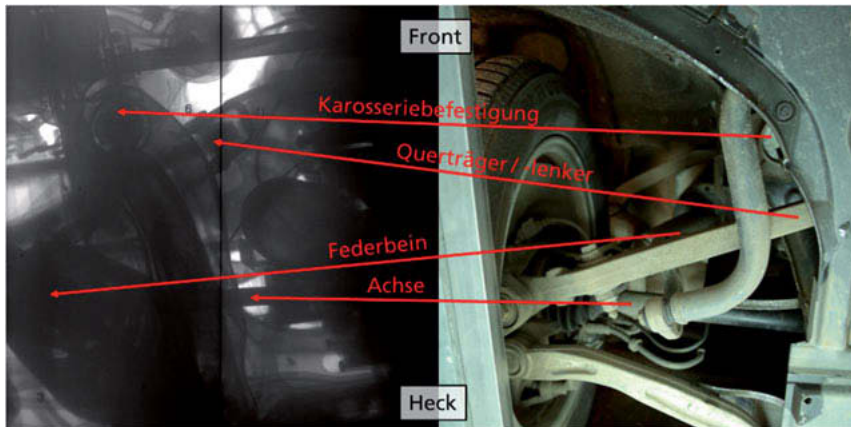


Bild 3: Vergleich von 2D-Röntgenbild mit optischer Aufnahme im Bereich der vorderen Rad- aufhängung. Eine Zuordnung der Bauteile ist nur mit Expertenwissen möglich.

Aus Bild 3 wird ersichtlich, dass Röntgenbilder für eine quantitative Auswertung per se nicht ausreichend sind. Röntgendiagnostische Untersuchungen an statischen, unbewegten Strukturen bieten die Möglichkeit der Zusammenführung sehr vieler (>1000) Röntgenprojektionen aus unterschiedlichen Blickwinkeln, um mit entsprechenden Rekonstruktionsalgorithmen das untersuchte Volumen in 3D zu rekonstruieren. Mit Hilfe dieser sehr großen 3D-Datensätzen lassen sich einzelne Komponenten besser auffinden, wie in Bild 4 beispielhaft dargestellt.

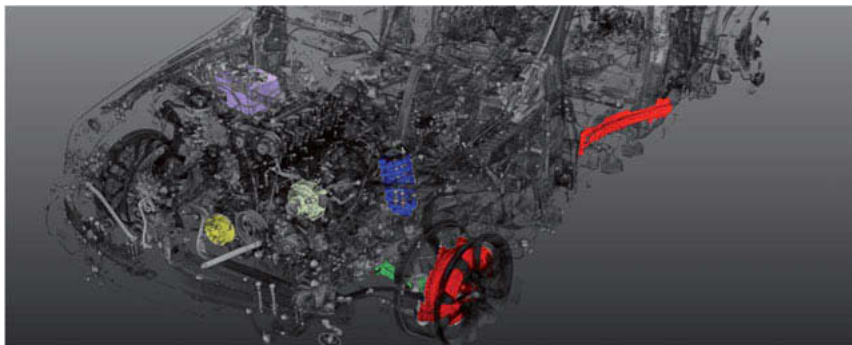


Bild 4: Veranschaulichung der Objekterkennung in einem vollständigen 3D-Datensatz.

Bei der Untersuchung der schnell ablaufenden Vorgänge während eines Fahrzeugcrashs hat man diesen Luxus nicht. Man ist seitens der Röntgendiagnostik zunächst auf eine Abfolge von 2D Röntgenbildern aus nur einer Perspektive beschränkt. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die beobachteten Komponenten in der Regel innerhalb der Beobachtungszeit stark deformieren und im Raum bewegen. Um sich dennoch in die Lage zu versetzen einzelne Objekte zu erkennen und während ihrer Deformation verfolgen zu können, nutzt man die vorhandenen Informationen aus der FE-Crashsimulation. Um diese Informationen für die Analyse von Röntgenbildern nutzbar zu machen, führt man – basierend auf den FE-Crashsimulationen – sog. Röntgensimulationen durch. Das Prinzip der Röntgensimulation ist in Bild 5 dargestellt.

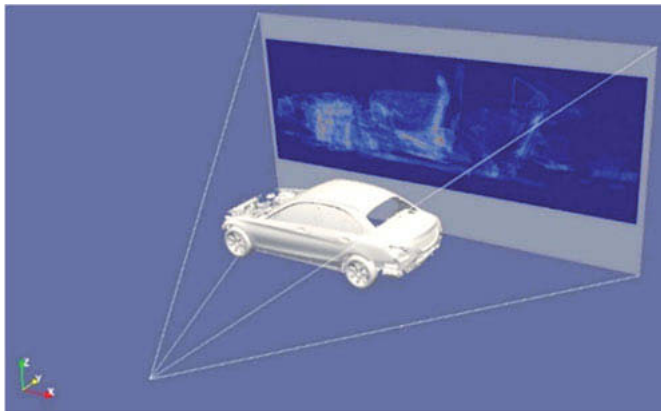


Bild 5: Darstellung einer Röntgensimulation (genauer Ray-Tracing Simulation) basierend auf deiner FE-Crashsimulation.

Die Rolle der Röntgensimulation basierend auf FE-Crashsimulationen wird in dem in Bild 6 skizzierten Lösungswegs deutlich: Zum einen ermöglicht sie vorab die Optimierung der experimentellen Parameter mit dem Ziel der Maximierung der Erfassung von Deformationsinformationen durch die Röntgendiagnostik. Zum anderen ermöglicht sie die den direkten Vergleich der mit den experimentell generierten Röntgenbildern.

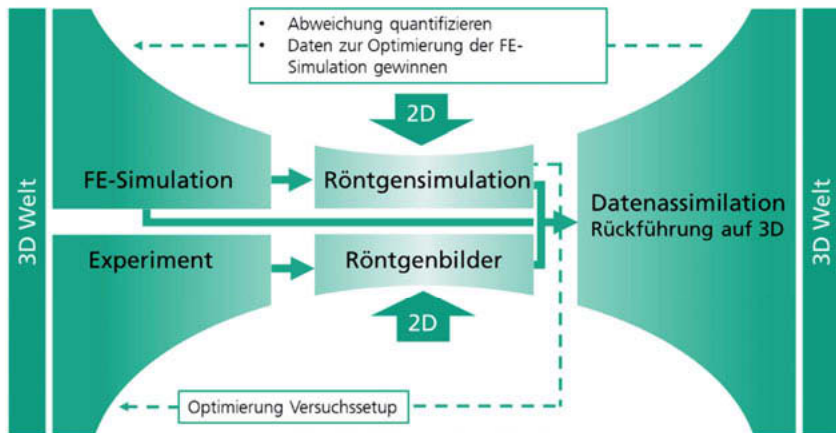


Bild 6: Schematische Darstellung des Datenflusses bei der Vergleichenden Analyse von Experiment und Simulation.

## 5. Datenassimilation

Um die Unterschiede, die zwischen den (auf der FE-Simulation basierenden) simulierten Röntgenbildern und den realen, im Experiment gewonnenen, Röntgenbildern zu erklären, existiert in der Regel eine große Menge an Möglichkeiten. Der Prozess der Rückführung der Ergebnisse der 2D-Bildanalyse in Verschiebungsvektoren im 3D-Raum stellt also ein prinzipiell unbestimmtes mathematisches Problem dar.

Konkret lässt sich dies durch folgendes Beispiel nachvollziehen: ist im Röntgenbild lediglich die Abbildung eines einfachen, dünnen Blechs zu erkennen, und zeigt das Experiment, dass sich zwei der gegenüberliegenden Kanten aufeinander zubewegt haben, könnte man dafür zwei mögliche Erklärungen vorschlagen. Entweder das Blech wurde gestaucht (d.h. senkrecht zur Projektionsrichtung komprimiert) oder es hat sich im Raum gedreht, wodurch sich die fraglichen Kanten ebenfalls aufeinander zubewegen. In der Praxis lässt sich dieses einfache Problem durch zusätzliche Informationen auflösen, indem z.B. über die Messung der Länge der Kante das Vergrößerungsverhältnis (und damit eine Aussage über die lokale Verschiebung entlang der Projektionsachse) bestimmt und damit Rückschlüsse auf eine mögliche Drehung gezogen werden kann.

Bei der Untersuchung von Deformationsvorgängen während des Autocrashes sind die zu untersuchenden Teile in der Regel deutlich komplexer, sowie die Zahl der Überlagerungen von Konturen deutlich höher. Selbst unter Zuhilfenahme aller, aus dem Röntgenbild erfassbarer, Informationen bleibt das Problem in der Regel unterbestimmt und die Zahl an unsicheren Messungen oder fehlenden Datenpunkten aufgrund von Überlagerungen oder Verdeckungen in vielen Fällen signifikant.

Für vergleichbare Herausforderungen werden in der Praxis oft Methoden aus dem Bereich der Datenfusion angewendet. Grundgedanke dieser Verfahren ist meist, dass prinzipiell unsichere Messungen aus verschiedenen Quellen miteinander kombiniert und gegenüber einer Hypothese oder einem Modell des Systems bewertet und getestet werden. Im Anschluss kann darauf basierend die am besten, sowohl mit dem Modell als auch den Messdaten (im Rahmen der Fehler), übereinstimmende Lösung gefunden werden.

Übertragen auf den Fall des Auto-Crashes handelt es sich bei dem Modell, das zur Erklärung von Unstimmigkeiten in den Messdaten verwendet werden soll, um eine äußerst komplexe FE-Simulation. Diese kann nicht nur in räumlicher, sondern auch zeitlicher Dimension vom Experiment abweichen. Daher trägt das Verfahren, das derzeit bei Fraunhofer für diese komplexe Problemstellung entwickelt wird, die Bezeichnung „Datenassimilation“. Dieser Begriff ist methodisch und mathematisch eng mit der Datenfusion verwandt und stammt aus der Meteorologie, wo man darunter das Einpflegen aktueller Messungen in eine Simulation der aktuellen Wetterlage versteht. Dort hat die Datenassimilation zum Ziel, die Beschreibung der aktuellen Wetterlage mit möglichst vielen aktuellen Daten anzureichen, Abweichungen zur Realität zu vermindern und damit die Vorhersagekraft zu verbessern. Dies ähnelt – trotz des völlig anderen Hintergrunds – stark dem Ziel, dass sich die Fraunhofer-Forscher für die Verbesserung der FE-Simulationen gesetzt haben.

Übertragen auf die konkrete Anwendung bedeutet das, dass im ersten Schritt die FE-Simulation dazu herangezogen wird, um die Unsicherheiten zu füllen, die nicht durch die Röntgenbilder bestimmt werden können. In der Röntgenpraxis bedeutet dies in der Regel Bewegungen, die direkt in Richtung der Projektionsachse verlaufen. Hier lässt sich zwar – wie im einfachen Beispiel des Blechs erklärt – über Vergrößerungsfaktoren ein Trend ablesen, für eine genaue Messung ist dies jedoch bei den typischerweise erwarteten Abständen und Objektgrößen meist nicht ausreichend.

Da die Automotive-Firmen die Methode der FE-Simulation mit einem hohen Maß an Erfahrung und Knowhow stetig weiterentwickeln, können diese in der Regel bereits heute sehr gut beschreiben, welche Prozesse beim Crash tatsächlich passieren. Dies bedeutet, dass die in FE-

Simulationen beobachteten Prozesse prinzipiell gut dazu geeignet sind, um Lücken in der Beobachtung zu füllen. Damit wird der Schritt zurück von der 2D-Bildebene in den 3D-Raum möglich.

Kernpunkt dieses Schrittes ist der Ansatz, dass die FE-Simulation nicht einfach als zusätzliche Datenmenge zum „Auffüllen“ der fehlenden Informationen benutzt wird, sondern die Auswahl dieser tatsächlich herangezogenen Informationen bewertet und vorgefiltert wird. Konkret wird angenommen, dass die grundlegenden Prozesse (die möglichen Pfade, auf denen sich eine Komponente im Auto beim Crash verformt) korrekt vorhergesagt werden. Um dies zu prüfen, wird vor der eigentlichen Rekonstruktion eine Plausibilitätsanalyse durchgeführt. Fällt diese positiv aus, wird bewertet, inwieweit die Simulation auf Basis der sichtbaren Abweichungen hinsichtlich Amplitude (also der „Stärke“ einer Verformung) sowie der Zeit, zu dem diese Verformungen stattfinden, vom Experiment abweicht. Diese Analyseergebnisse werden genutzt, um die FE-Simulation lokal und global auf die im Experiment gewonnenen Daten zu mappen. Damit werden die Beiträge, die die im Experiment nicht erfassbaren Daten vervollständigen, entsprechend skaliert und in der Zeitleiste des Experiments angepasst.

Nach Abschluss dieses Vorgangs kann die quantitative 3D-Analyse der Abweichungen zwischen Experiment und Simulation zu jedem Zeitschritt als Ausgabe von Verschiebungsvektoren im Raum realisiert werden. Diese Informationen können dann grafisch zeitlich und räumlich aufgelöst dargestellt werden. Damit können die Simulationsingenieure sehen, wo und zu welchem Zeitpunkt sich Experiment und Simulation um welche Distanz unterscheiden. Die Simulationen können verbessert werden, um diese Unterschiede zu minimieren.

Dieser Prozess bietet die Perspektive, die Ingenieure und Wissenschaftler beim Verbessern der Simulation noch stärker als durch eine einfache Quantifizierung der Abweichungen zu unterstützen. Die Vision ist es, dies in Zukunft einmal automatisiert zu ermöglichen. Der erste Schritt dahin ist der zu einer Metrik, die die Abweichung nicht in räumlichen Einheiten wie Millimetern, sondern in physikalisch und insbesondere in FE-Simulationen aussagekräftiger zu interpretierenden Dimensionen wie abweichend wirkende Kräfte und Differenzen von Energien charakterisiert. Erste Ansätze hierzu werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

## **6. Abweichungsanalyse durch Rückführung von Daten in die FE-Simulation**

Die Technologie des X-Ray Car Crashes erlaubt wertvolle Einblicke in das dynamische Verhalten verborgener Strukturen unter Crashbelastung. Durch eine entsprechende Nutzbarmachung der erhobenen Informationen kann langfristig ein wertvoller Beitrag zur Validierung und Optimierung von Simulationsmodellen und -methoden geleistet werden. Die Weiterverarbei-

tung sowie die zur Durchführung einer Abweichungsanalyse notwendige Rückführung der erhobenen heterogenen Datensätze in den Bereich der numerischen Simulationen stellt eine große Herausforderung dar und bedarf neuartiger Methoden. Die Heterogenität der Datensätze ist durch eine große Variation der Beobachtungsunsicherheit gekennzeichnet, welche zum einen vom Ort bzw. der Verfügbarkeit von wiedererkennbaren Features sowie zusätzlich von der Crash-Kinematik des betrachteten Objekts bezüglich der Anordnung von Röntgenquelle und Detektor abhängt.

Im Rahmen des aktuellen Forschungsprojekts wird dazu eine Methode entwickelt, die durch Überführung der experimentellen Beobachtungen in einen dynamischen virtuellen Lösungskorridor die Durchführung einer Abweichungsanalyse ermöglicht [01]. Die Ergebnisse dieser Abweichungsanalyse erlauben hierbei eine physikalisch interpretierbare Beschreibung von Abweichungen zwischen FE-Simulation und Experiment. Zu diesem Zweck wird eine erneute FE-Simulation durchgeführt, bei der es zu einer Einschränkung der Kinematik eines betrachteten Objekts kommt. Diese Einschränkung wird mit Hilfe von künstlichen, sich bewegenden Hüllflächen realisiert, welche ausschließlich mit dem betrachteten Objekt interagieren und deren Kinematik die Beobachtung eines Experiments repräsentiert. Der Abstand dieser Hüllflächen bestimmt die Breite des Lösungskorridors und korreliert mit den zugehörigen Unsicherheiten der Beobachtung. Das Vorliegen von Abweichungen zwischen initialer Simulation und zugehöriger experimenteller Beobachtung führt zu entsprechenden Interaktionen zwischen der Begrenzung des Lösungskorridors und dem betrachteten Objekt. Die Auswertung der dabei erfassten physikalischen Interaktionsgrößen erlaubt eine umfangreiche örtlich und zeitlich aufgelöste Bewertung von vorliegenden Abweichungen.

Anhand eines rein virtuell betrachteten Minimalbeispiels wurde in einer ersten Studie die Machbarkeit dieses Ansatzes überprüft [01]. Die Ergebnisse dieser Machbarkeitsstudie werden im Folgenden näher erläutert. Bild 7 zeigt das dabei verwendete Simulationssetup bestehend aus einer elastischen Aluminium Platte (grün), einem gekrümmten Starrkörper (grau) mit Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  sowie den synthetischen Hüllflächen (rot). Durch Variation der kinetischen Energie des Starrkörpers (Massenskalierung oder Geschwindigkeitsskalierung) wurden zwei abweichende Simulationsergebnisse generiert. Das Ergebnis der ersten Simulation wurde hierbei als experimentelle Beobachtung (Referenzsimulation) interpretiert, während das Resultat der weiteren Simulation als ein von der „experimentellen Beobachtung“ abweichendes Simulationsergebnis interpretiert wurde. Im weiteren Verlauf wurde ohne Berück-



sichtigung von Unsicherheiten und unter Annahme der vollständigen Kenntnis des „Experiments“ die abweichende Simulation durch die dynamischen synthetischen Hüllflächen ergänzt und deren Kinematik basierend auf den Ergebnissen der Referenzsimulation definiert.

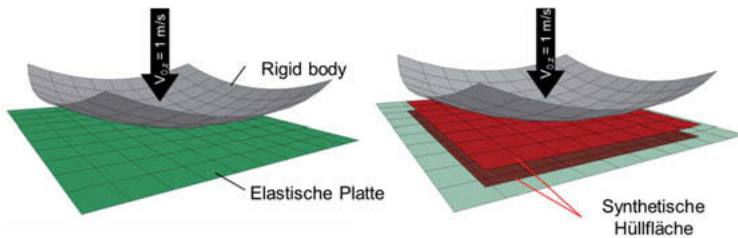


Bild 7: Simulationssetup des in der Machbarkeitsstudie betrachteten Minimalbeispiels bestehend aus einem Starrkörper (grau), einer elastischen Platte (grün) sowie den dynamischen synthetischen Hüllflächen (rot), siehe [01].

Bild 8 zeigt das Zeitintegral der zur Fixierung der Platte im Raum notwendigen Kräfte (links) sowie die innere Energie der elastischen Platte (rechts) für die drei durchgeführten Simulationen (Massenskalierung von 25%).

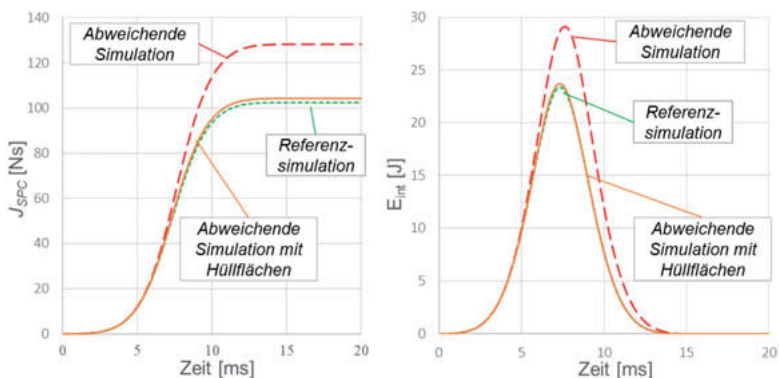


Bild 8: Zeitintegral der Kräfte zur Fixierung der Platte im Raum (links) sowie innere Energie der elastischen Platte (rechts) von Referenzsimulation ( $m_{rigid}=m_{ref}$ ), abweichender Simulation ( $m_{rigid}=1,25 \cdot m_{ref}$ ) sowie abweichender Simulation mit Hüllflächen ( $m_{rigid}=1,25 \cdot m_{ref}$ ), siehe [01].

Die abgebildeten Kurven verdeutlichen, dass die ursprünglichen Abweichungen zwischen der abweichenden Simulation und der Referenzsimulation unter Verwendung der Hüllflächen auf einen geringen Wert minimiert werden. Die erhöhte kinetische Energie des Starrkörpers wird somit nahezu vollständig durch die resultierende Interaktion zwischen der Begrenzung des Lösungskorridors und der elastischen Platte kompensiert. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde neben unterschiedlichen Implementierungsmöglichkeiten sowie einer Variation der „Breite“ des Lösungskorridors zusätzlich untersucht, mit welcher Genauigkeit auf Basis dieser Interaktion Rückschlüsse auf die bekannte Abweichung der initialen Randbedingung möglich sind. Im Falle der in Bild 9 gezeigten Abweichung aufgrund einer Massenskalierung von 25% konnte hierbei die Randbedingung des „unbekannten Experiments“ (Referenzsimulation) mit einer relativen Abweichung von 1,8% bestimmt werden [01].

Im weiteren Verlauf gilt es zu untersuchen, welchen Einfluss die Verwendung von virtuellen Hüllflächen auf Ergebnis und Stabilität umfangreicher Simulationsmodelle hat. Des Weiteren muss die Übertragbarkeit der im Rahmen der Machbarkeitsstudie gewonnenen Erkenntnisse auf diese Simulationsmodelle geprüft werden.

## 7. Danksagung

An der Bearbeitung der hier dargestellten Arbeiten sind weitere Personen ganz maßgeblich beteiligt, die ich an dieser Stelle als weitere Co-Autoren aufführen möchte:

Dr. Norman Uhlmann, Fraunhofer EZRT, Fürth; Dr. Hanna Paul, Daimler AG, Sindelfingen; Thomas Soot, Fraunhofer EMI, Freiburg; Dr. Tobias Leismann, Fraunhofer EMI, Freiburg; Prof. Stefan Hiermaier, Fraunhofer EMI, Freiburg; Prof. Dr. Rodolfo Schöneburg, Daimler AG, Sindelfingen; Prof. Randolph Hanke, Fraunhofer EZRT, Fürth, Dr. Stefan Moser, Fraunhofer EMI, Efringen-Kirchen; Dr. Siegfried Nau, Fraunhofer EMI, Efringen-Kirchen; Dr. Malte Kurfiß, Fraunhofer EMI, Efringen-Kirchen.

## 8. Literaturverzeichnis

[01]: T. Soot, M. Dlugosch, und J. Fritsch, „Processing of numerical simulations and experimental X-ray car crash data for deviation analyses and model quality assessment“, Proc. NAFEMS World Congr. 2019, 2019.

## **Validierungsprozedur für Simulationsmodelle in einem virtuellen Prüf- und Bewertungsprozess der passiven Sicherheit hochautomatisierter Fahrzeuge**

### **Validation procedure for simulation models in a virtual testing and evaluation process for the passive safety of highly automated vehicles**

Dr.-Ing. **Andre Eggers**,  
Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach;  
Dipl.-Ing. **Christian Mayer**, Daimler AG, Sindelfingen;  
Prof. Dr. **Steffen Peldschus**, LMU Munich, Biomechanik und  
Unfallforschung, Institut für Rechtsmedizin, München

#### **Kurzfassung**

Zukünftig ist eine zunehmende Verbreitung hochautomatisierter Fahrzeuge im Straßenverkehr zu erwarten. Diese werden im automatisierten Betrieb auch neue Nutzungsarten und neue Sitzpositionen ermöglichen (z.B. drehbare Sitze, Arbeits- und Ruhepositionen). Weiterhin ist damit zu rechnen, dass, im Vergleich zum heutigen Unfallgeschehen, Kollisionen mit hochautomatisierten Fahrzeugen zu anderen Unfallszenarien und damit Belastungsarten der Fahrzeuginsassen führen.

Um auch weiterhin alle Fahrzeuginsassen in allen Situationen bestmöglich zu schützen, werden neuartige Insassenrückhaltesysteme (Gurte, Airbags und Sitzkonzepte) erforderlich sein. Für die Entwicklung und Bewertung dieser neuen Schutzsysteme in neuen Anprallszenarien werden eventuell heute verfügbare Crashtestdummys nicht mehr geeignet sein. Eine Alternative könnten Simulationsmodelle des Menschen sein. Diese virtuellen Modelle, die auch in Bezug auf Anthropometrie und Alter verschiedene Verkehrsteilnehmer abbilden können, sind eine mögliche Grundlage für eine virtuelle Prüfung und Bewertung der passiven Sicherheit hochautomatisierter Fahrzeuge in Ergänzung zu bestehenden Prüfverfahren und realen Tests.

Die Weiterentwicklung und Konsolidierung dieser virtuellen Test- und Entwicklungswerkzeuge ist ein Ziel des EU-Projekts OSCCAR (Future Occupant Safety for Crashes in Cars). Um diese in einem rein virtuellen Prüf- und Bewertungsprozess zu verwenden, ist jedoch neben einer Qualifizierung dieser Menschmodelle auch eine zuverlässige und auf realen Versuchen

basierende, nachprüfbare Validierung des Modells des Fahrzeuges bzw. der Rückhaltesysteme notwendig.

Eine entsprechende Validierungsprozedur wird im Projekt OSCCAR aufbauend aus Erkenntnissen aus dem EU-Projekt IMVITER erarbeitet. In diesem Paper werden Vorschläge für diese Validierungsprozedur dargestellt und anhand von einem beispielhaften Prüflastfall demonstriert, welcher eine stark zurückgeneigte Sitzposition umfasst.

## Abstract

In the future, an increasing amount of highly automated vehicles in road traffic is to be expected. These will enable new seating positions (swivel seats and reclined positions). Furthermore, it is expected that collisions with highly automated vehicles will lead to new accident scenarios and thus loading conditions of vehicle occupants.

To continue protecting all passengers in all situations in the best possible way, innovative occupant restraint systems (including new belt and airbag systems and seating concepts) will be required. For the development and evaluation of these new protection systems in new impact scenarios, probably current crash test dummies will not be suitable anymore. A possible alternative could be the use of human body models. These virtual models, which can also represent different road users in terms of anthropometry and age, are a possible basis for a purely virtual test and evaluation procedure of the passive safety of highly automated vehicles in addition to existing real test procedures.

The further development and improvement of these virtual test and development tools is one goal of the EU project OSCCAR (Future Occupant Safety for Crashes in Cars). However, in order to use these tools in a purely virtual testing and evaluation process, in addition to certification of these human models, reliable validation procedures of the model of the vehicle and/or the restraint systems based on real tests are needed.

Within the OSCCAR project a validation procedure will be developed taking into account the results from the EU project IMVITER. This paper will provide proposals for a validation procedure. The concept of this procedure will be applied to a new load case test scenario related to a reclined seating position.

## 1. Introduction

Within the EC-funded project OSCCAR, new approaches for the assessment of occupant protection in the context of increasingly automated vehicles are developed. It is expected that high levels of automation will bring new accident scenarios (primarily in mixed traffic) as well as new vehicle interior concepts. Such interior concepts may include new seating positions,

such as reclined seat backs, and seats rotated about the vertical axis enabling interactions between occupants in a “living room environment” (see Fig. 1).



Fig. 1: Example of new interior concept and user behavior in HAV (highly automated vehicles) and automated driving mode (Source: Daimler).

Ensuring the safety of occupants in such altered conditions requires the design of new protection principles and safety systems. To evaluate and assess the safety level of these new concepts and systems the adaption or development of assessment procedures will be necessary. It may not be possible to develop test procedures with current ATDs (Anthropometric Test Devices) that have the potential to address the mechanical effects of interest under those conditions. Therefore, a possible alternative is seen in complementing real testing (RT) under established conditions with virtual testing (VT) employing human body models under new conditions.

## 2. Motivation for Virtual Testing with Human Body Models

A main benefit of the application of virtual testing is the option to represent the occupant in a more detailed and biofidelic model of the human body rather than in terms of an ATD / crash test dummy. ATDs have several limitations in the accuracy of representing the injury mechanics of the human body due to their nature of a rather robust physical test tool.

ATDs can by definition only represent a very narrow bandwidth of the population, usually indicated by a target anthropometry like a 50<sup>th</sup> percentile male northern American. Addressing specific population groups of vehicle occupants such as people with smaller stature, obesity, or the core of the female population, already constitutes a remarkable challenge.

In addition, latest research and development offers the opportunity to implement human behavior in terms of muscle activity to virtual human body models (HBMs) to represent human characteristic also in pre-crash driving modes and scenarios (Fig. 2).

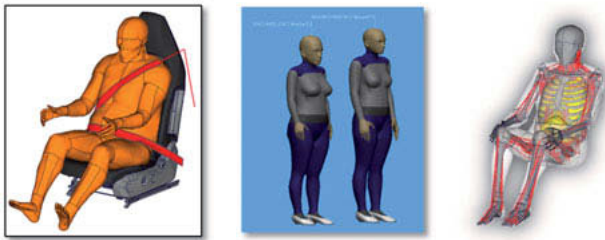


Fig. 2: Examples of special human body models: Obese occupant, small female (Asian & Western anthropometry), HBM with active muscles.

The injury criteria that have been developed for the use with ATDs cannot always discriminate between more effective and less effective protection of the occupant. The criteria are in some cases not sufficiently sensitive. This is, for instance, the case if the benefits of inflatable seat belts are to be demonstrated. Established ATD chest instrumentation and related criteria are very limited in showing the positive effect of increasing the contact area between thorax and belt. In other cases, criteria may not be available or the design of the ATD may not allow addressing newly arising injury mechanisms.

A core requirement of an ATD is its biofidelity, i.e. the representation of the behavior of the human body under impact loading in the intended application scenario. ATDs are usually strongly limited in their biofidelity to a specific application, such as side impact, frontal impact, etc. If loading conditions outside an established scenario are to be addressed, the biofidelity of an ATD is in a first step to be questioned. In cases where the whole occupant, as in a far-side impact, or a certain body region as by a reclined seat-back are loaded in a new way, major modifications would be needed to achieve a reasonable ATD biofidelity as a requirement to assess associated injury risks.

Finally, design peculiarities of existing ATDs may limit the usability in newly arising loading conditions. Reclining a seatback for instance implies challenges in positioning and handling of the dummy.

Within the research project OSCCAR, potential future interior concepts in combination with future accident-relevant scenarios for highly automated vehicles are studied. The reflection on such concepts includes the assessment of the protection of occupants under those conditions. One of the core objectives of the project is the demonstration of a potential VT process for systems related to occupant protection. The consequences of a potential frontal impact in a forward-facing seating position with reclined seat back are to be assessed in this demon-

stration. For the reasons given above, virtual testing with HBMs is complementing physical testing within this demonstrator.

The demonstrator will include the assessment of occupant protection in both, a seating position considered as standard today and a position with reclined seatback. While in the standard position ATD testing with a dummy is applied, simulations with HBMs will be used for assessing risks in the position with reclined seatback. Using HBMs will allow analyzing the risk of submarining on a more biofidelic level. Furthermore, with human body model simulations it will be possible addressing the mechanical behavior of the involved body structures and tissues, which would not be feasible with an existing ATD. For example, strain-based assessment of rib fracture risk will be possible to use instead of deflection-based dummy chest injury criteria which might not be valid for this kind of loading. Due to limitations of the ATD chest instrumentation it might not be possible at all to calculate the dummy-based criteria. In a next step also the estimation of lumbar spine injury risk will be possible when HBM-based criteria for this kind of injury will become available. An additional advantage of Virtual Testing with HBMs is that in the implementation phase of new test scenarios the risk of damage to test equipment is minimized.

### 3. Review of VT procedures for application in consumer testing and type approval

Due to the advantages described above, HBMs have already been used in injury biomechanics research since decades. Meanwhile HBMs are also used in automotive industry for the design and evaluation of safety systems whenever the use of ATDs is limited due to the above described issues. However, up to now no procedure for virtual testing is available that includes the use of HBMs for vehicle safety assessment in type approval or consumer testing in a similar way like the current ATD injury criteria-based procedures. One main objective of OSCCAR is to propose a new VT procedure making use of HBMs.

To develop a new VT procedure the results of the EC-funded project IMVITER (**I**mplementation of **V**irtual **T**esting in **S**afety **R**egulations FP7-2007-SST-218688) were reviewed. The focus of IMVITER was the development of VT procedures for existing RT based regulations. However, no HBM as virtual test tool was involved in the IMVITER VT process. Nevertheless, the procedures developed within IMVITER will be discussed regarding their applicability towards a possible new OSCCAR VT process based on HBMs.

The starting point of the IMVITER procedures was the EU regulation No. 371/2010 [1]. Annex 3 of the regulation defines the validation process of the mathematical model and the following approval process in a general way in form of a flowchart (Fig. 3). The key part of this procedure is based on a validation process. However, many details of this validation process

cedure were not specified in the regulation. Based on that within the IMVITER project a more detailed flow chart was developed (Fig. 4).

Phase 1 of this procedure is the model development and verification, which is always within the main responsibility of the vehicle manufactures. The vehicle manufacture has to assure that the simulation model is developed according to state of the art modelling quality criteria. Within phase 2 a validation and certification of the model is done by comparing simulation results to real test. After that step in a third phase the simulation model can be used for virtual approval tests.

Furthermore, different approaches (ways to proceed through the flowchart), hybrid and full virtual, were developed within IMVITER and applied to different regulations (pilot cases). Details can be found in the IMVITER deliverables and publications [2], [3].

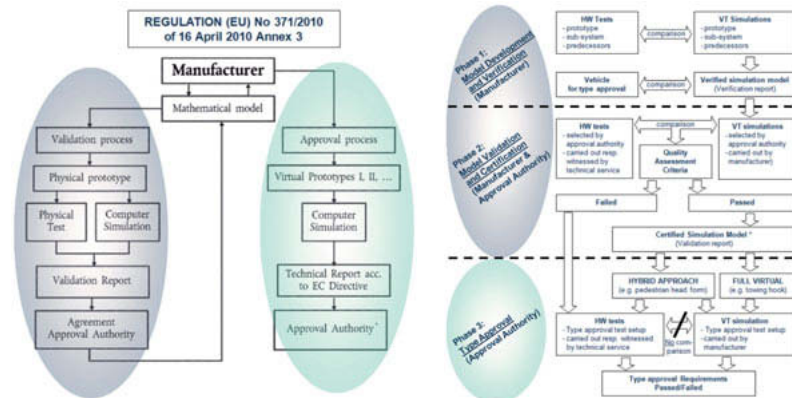


Fig. 3: Flowchart in Commission Regulation (EU) No. 371/2010. Fig. 4: General IMVITER Virtual Testing implementation flowchart.

The approaches and the potential applicability towards the OSCCAR pilot cases are discussed in the following.

A hybrid approach was proposed, which can be applied to test procedures involving high number of test cases in phase 3. The concept of the hybrid approach is that all tests assigned to phase 3 are carried out by virtual testing. A subset of test cases is performed by real testing. The results are compared within phase 2 of the procedure. If the validation is confirmed by agreed validation criteria the RT results are transferred to phase 3 and com-



plemented by the VT results. Within IMVITER this approach was successfully demonstrated by the pedestrian head impact and lower leg impact regulation [4].

Application of the hybrid approach to an OSCCAR pilot case would make it necessary to compare virtual tests carried out in phase 3 to real tests in the same loading condition. However, this is not possible, because the assessment or homologation load case in phase 3 will include an HBM as virtual test tool. A corresponding real test is not possible, because no corresponding real test tool is available. Thus, the hybrid approach of IMVITER cannot be directly transferred to the HBM-based OSCCAR pilot cases.

Another approach developed within IMVITER is called full virtual approach. The main idea of this approach is that no real tests are carried out within phase 3. This requires a more extensive detailed validation assessment of the model in phase 2. The validation is not done in a loading condition which is exactly representing the assessment or homologation condition of phase 3. Instead the validation is done on sub-systems, component or material level. This approach seems to be appropriate for OSCCAR. Within IMVITER this approach was demonstrated for the EC Regulation 77/389, Motor-vehicle towing-devices.

However, one important difference between the IMVITER towing hook pilot case and a potential OSCCAR pilot case is the virtual test tool (HBM) that will be used in phase 3. The IMVITER full VT approach still offers the possibility to carry out the assessment test in phase 3 by a real test in case of any the validation fails (Fig. 4). In the case of a test tool that only exists virtually this option is not available. Due to that the availability of an accepted comprehensive validation procedure is even more important. A flowchart outlining the OSCCAR HBM-based VT procedure is shown in Fig. 5.

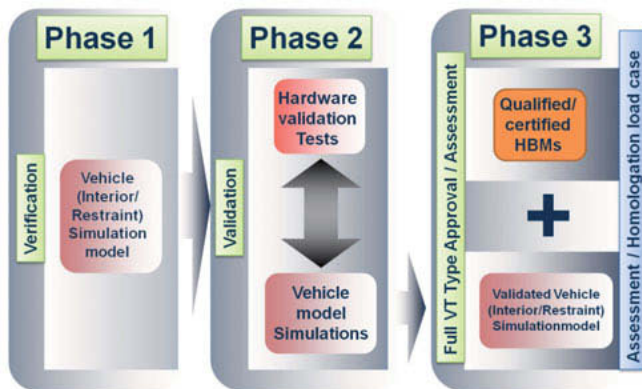


Fig. 5: Flowchart of OSCCAR's Virtual Testing procedure including HBMs.

An agreement on qualified or certified HBMs to be used in this process is a pre-requisite for this kind of VT procedure. Furthermore, a standardized approach is needed to combine in phase 3 the HBM and the vehicle model, which was validated before in phase 2. This includes for example requirements related to the HBM positioning into the vehicle model. These two aspects will also be addressed within OSCCAR, but will not be further discussed in this paper. The focus of this paper is on the definition of reasonable tests to validate the interaction between HBM and the vehicle interior in the loading condition relevant for the assessment/homologation load cases.

#### **4. Vehicle/restraint validation procedure for an HBM-based VT process**

As described above a key part in the OSCCAR VT procedure is the validation of the vehicle model. Therefore, a key activity is to define a reasonable set of real tests that can be used to demonstrate the validity of the interior model in the assessment loading condition. As the aim is to protect occupants the focus is on a procedure which allows for the validation of the vehicle interior model including all restraint components that are in contact with the occupant such as a belt, airbag and seat. In general, several categories of real tests are appropriate for the validation of a vehicle interior model on different levels.

##### **Full-scale crash tests with (standard) ATDs in standard configuration**

Highly automated vehicles might lead to very different, new interior concepts and new seating positions as well as new accident scenarios. This will lead to new and different vehicle safety assessment or homologation load cases. However, most probably some of the currently existing real tests with currently used ATDs will still be required. The results of these tests would still be available, and thus, could be used for the validation of the vehicle model. This model could then be used for VT to assess the new loading conditions with a new virtual test tool (HBM). However, this test data might only be sufficient for validation of the vehicle model, if the new VT load case is very similar as well as the human-like test tool is the same or similar in terms of anthropometry. In all other cases the use of this test data is very limited and may only serve as a starting point for baseline validation. Furthermore, the high variation of signals in a real full-scale test is another limiting factor related to the usability of the test data for validation.

##### **Full-scale crash tests with standard ATDs in new test configurations**

The same restrictions related to full-scale test result variation apply for full-scale tests in new crash configurations. However, if the crash condition is very different, an additional full-scale test might be necessary. The data could also be used as input to determine the crash deceleration pulse for validation sled tests. If the new test configuration includes a new occupant

position or alignment of the seat within the vehicle the ATD might also show limitations in terms of usability or biofidelity in this new loading condition.

### **Sled tests in new loading conditions with ATDs**

The motivation for HBM-based VT procedures is the limitation of the currently available ATDs in new loading conditions (e.g., tests with highly reclined or rotated seats). Due to that the currently available ATDs might also not be applicable to be used in derived sled tests. Even if the ATD can be installed in the new position the biofidelity in terms of whole body kinematics or interaction with restraint system (belt system, airbag) might show limitations. There is also the risk that the ATD is damaged in the new loading condition as it is not designed to be used for that. However, sled tests with currently available dummies in a loading condition similar to the assessment/homologation loading condition could be an option to validate the vehicle model on a sled test level. A well established variation of parameters (e.g., seat back angle, pulse, loading direction etc.), avoiding also the risk of damage to the dummy, could improve the robustness of validation. However, in this case a combination with component tests is recommended. An important question that needs to be addressed is how many test configurations close to the assessment loading are needed to accept or demonstrate that the interior model is validated.

### **Component tests**

If it is not possible to perform sled tests with an existing validation test tool (ATD) exactly representing the loading condition of the virtual test tool in the assessment/homologation setup, another option could be additional component tests. For validation of restraint system components like seat belt, airbag of seats standard validation test are available that have been used so far by OEMs or suppliers internally to validate the models to be used in existing standard loading configurations. However, these tests might not be sufficient for new loading conditions. This might require the development of new validation tests or even new test devices.

Another option could be component tests that are imposing the loading of relevant body parts on the restraint systems and interior parts like belt, airbag or seat in the new loading conditions. By comparison of forces and other relevant signals between the respective body parts and the interior or restraint a validation of the relevant vehicle model part will be possible. In component tests also small variations in relevant parameters like the belt angle or dummy positioning could be introduced to ensure a more robust validation. Further component tests might be useful for the validation of realistic restraint to occupant interaction. For both kinds of component validation tests the development of new validation test tools representing the relevant human body part might be an option.

### Tests with simplified test tools/dummy or new validation dummy

The vehicle model has to be validated for a loading condition that is representative for the assessment or homologation load case. However, if the current ATD cannot be positioned in this desired assessment test condition the loading is not representative. Even if it is possible to position the ATD in the relevant test condition the interaction between the relevant ATD body part and the vehicle interior and restraint might not be biofidelic. To address this, a possible solution could be the development of a validation dummy (loading dummy) that has mainly the purpose to be representative of the virtual tests tool (HBM) in terms of restraint loading, whole body kinematics and restraint interaction. This kind of ballast dummy or loading dummy should be designed as simple as possible, but still show a sufficient biofidelity related to external loading. However, biofidelity of internal instrumentation for injury assessment would not be needed at all, as this will be completely addressed by HBM-based VT. The concept of a validation dummy could also be transferred to the level of isolated body parts for component testing.

## 5. Application to OSCCAR pilot case

The OSCCAR homologation pilot case will include a test setup with a highly reclined seat in a frontal loading direction with an average occupant. To ensure a baseline validation of the vehicle model an available full-scale crash test, which is similar in terms of the crash pulse compared to the new loading velocity and impact direction could be used. For the possible OSCCAR homologation case this could be a frontal impact, preferably a full frontal test, with a 50<sup>th</sup>ile ATD (Hybrid III 50%, THOR-M 50%) that might still be a regulatory of consumer testing requirement in the future. However, the seat back angle, which is usually in the range of 18° to 25° would be very different to the seat back angle of the OSCCAR pilot case, which would be in the range of 40° to 60°.

Additional validation tests will be needed representing the restraint interaction with the virtual test tool in the new loading condition. The preferred option for this kind of validation test would be a crash test or sled test with an ATD put in the exact same loading conditions as in the assessment loading conditions. In OSCCAR for evaluation of the VT procedure no full-scale crash test, but sled tests will be used to evaluate the method in general (see Fig. 6 and Fig. 7). For application in a real homologation or consumer test procedure a crash might also be an option especially if the impact differs from that in other crash test procedures.

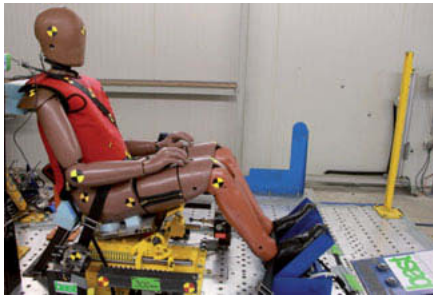


Fig. 6: Sled test setup with THOR-M 50 in standard seating position (Thorax angle 23°) – for dummy-based injury assessment and baseline validation of the vehicle environment.



Fig. 7: Sled test setup with THOR-M 50 in reclined seating position (Thorax angle: 48°) – only to be used for validation of the vehicle environment in Virtual Testing.

The applicability of currently used ATDs like THOR or Hybrid III in sled tests for validation of a highly reclined position also implies certain limitations. In any case the biofidelity of internal dummy measurements in a reclined position, see Fig. 7, is very questionable. Thus the measurement signals of the dummy will not be used for injury assessment. This will be done with a virtual test tool, the HBM, by virtual testing in the new loading condition. However, for highly reclined seats it might not be even possible to position the ATDs in the exact condition of the assessment load case. For a seat back angle of 60° most probably a conventional ATD like the THOR could not be positioned.

Even if the dummy can initially be positioned in this extreme position the sled test might not result in reasonable kinematics and restraint loading to the test tool to be used for validation. In that case an option would be to perform a sled test with a less reclined seat back angle. The question to be answered is how far the assessment load case condition can differ from this, if the model should be considered validated based on comparison with a sled test in this condition. Additional component or subsystem tests might be an option to further validate on a robust level the interaction between restraint and HBM in the extremely reclined seat position.

Additionally to conventional component tests that are used to validate seat and belt simulation models new component validation tests might be needed. Another solution for a component test would be test with an isolated dummy pelvis. With such a component test different pelvis angles and belt angles relatively to the pelvis could be investigated to increase the

robustness of validation in the relevant loading condition. However, even if the ATD could be positioned in the same position that is desired for the assessment load case it does not necessarily mean that the whole body kinematics and the interaction between restraint system (belt, seat) and test tool are represented in a biofidelic way. To address this, a special validation test tool (validation dummy) as described above might be a possible solution.

To address the validation of pelvis-to-seat interaction, such a dedicated validation test could include a device mimicking the surface of human buttocks with a rather stiff surface. This device, being applied on the seat cushion with normal and tangential forces forcing it to slide forward on the seat, would allow to compare the mechanical response of seat model and physical seat in submarining-relevant loading conditions. The conditions to be used need to be identified from parametric studies - numerical or physical ones.

## 6. Outlook and next steps within OSCCAR

Within the project OSCCAR, the transformation of Virtual Testing approaches from the IMVITER project to the application of an HBM-relevant load case will be done. As described above, this requires specific adaptations of the process relating to the representation of the occupant.

The load case of a frontal impact in forward-facing position with a reclined seat back has been chosen. The load case is realised in a sled environment. The description of the Virtual Testing procedures is meant to enable a demonstration of the physical testing and numerical simulation for this specific load case.

For the numerical simulation, the same models (occupant model, seat and restraint systems) are applied in the three codes LSDyna, VPS and Simcenter Madymo. Differences between the codes in the occupant environment validation phase and as well the HBM related output within homologation load case will be evaluated. The results will be assessed and considered for future definitions of a VT procedure and requirements.

The procedure will include the following elements:

- Definitions of physical tests at several levels (full-scale, sled, component) for seat and restraint system
- Acceptance criteria for the performance of the numerical models in those tests to be admitted to the Virtual Testing procedure with a Human Body Model
- Structure of physical and virtual tests complementing each other, i.e. definition of the transition from physical test to virtual test in terms of seat back angle for this specific application

It is expected that the procedure developed for this specific demonstrator within the OSCAR project will pave the way to further applications of Virtual Testing with HBMs in the future.

## 7. 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. The content of the paper is partly based on OSCAR deliverable D5.1.

## 8. References

- [1] COMMISSION REGULATION (EU) No 371/2010 of 16 April 2010, replacing Annexes V, X, XV and XVI to Directive 2007/46/EC (Framework Directive)
  
- [2] IMVITER 2011. Deliverable Report D3.1 – Potentials of virtual testing for homologation/regulation procedures.
  
- [3] Eggers, Andre; Schwedhelm, Holger; Zander, Oliver; Cordero-Izquierdo, Roberto; García-Polanco, Jesus; Paralikas, John; Georgoulas, Konstantinos; Chrysosouris, George; Seibert, Dominic; Jacob, Christophe; 2013. Virtual Testing based Type Approval Procedures for the Assessment of Pedestrian Protection developed within the EU-Project IMVITER. ESV 2013 Conference, Seoul, Korea. Paper Number 13-0344.
  
- [4] REGULATION (EC) No 78/2009 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 14 January 2009 on the type-approval of motor vehicles with regard to the protection of pedestrians and other vulnerable road users, amending Directive 2007/46/EC and repealing Directives 2003/102/EC and 2005/66/EC





# **A study of the effect of reclined seatback on the occupant kinematics in an autonomous emergency braking using a MADYMO active human body model**

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

## **Abstract**

In the future car, the highly autonomous driving system will have the leading-role for controlling. The driver will release the car's control intervention and tend to find a more comfortable seated posture. It is predicted that highly reclined seatback posture would have a potentially higher rate in comparison with some other seated positions, especially in the long-range travel with the highly autonomous driving. The highly reclined seatback with the standard D-ring on B-pillar belt left along with around the occupant's rib cage needs to be investigated the efficiency because it was concluded that the belts only work well when they're worn correctly. Also, earlier research has shown that a lack of awareness could significantly increase the response time of the driver and longer reaction time in pre-crash in autonomous driving. This work aims to evaluate the impact of the reclined rear seatback on the occupant kinematics in the autonomous emergency braking (AEB) maneuver. A computational method that used the MADYMO human body model to simulate the behavior of the occupant in various different reclined seatback angles during the AEB with a standard D-ring seatbelt system (D-ring on the B-pillar) and seat-integrated D-ring belt system (D-ring on the seat structure), and various muscle tension levels.

**Keywords** reclined seatback, human body model, occupant kinematics, pre-crash maneuvers, highly autonomous driving.

## **1. Introduction**

The highly autonomous driving is predicted that will have a leading role in controlling the car. The drivers will focus on other activities during traveling. They can read books, can use computers or mobile phones, talk to other passengers freely, even they can take a snap. In long-range travel, the driver would have the trend to find a comfortable position by adjusting the seatback angle to a higher reclined position. However, the current restraint system was designed to protect the passengers in the standard position (the upright seatback posture). In

particular, a test with a volunteer on the front seat in the fully reclined seatback with a standard seatbelt attached to the B-pillar of the vehicle was conducted as seen in Fig. 9 of the Appendix. We realized a significant gap between the shoulder seat belt and the upper torso. This gap could reduce the effectiveness of the seatbelt and this will be addressed in this paper.

In the past, the researchers in [1] were conducted a survey on the traffic crashes from 1995-2005 in United State using data from the Crash Injury Research and Engineering Network (CIREN) and the National Automotive Sampling System Crashworthiness Data System (NASS). They found many victims have their seats partially or fully reclined. Passengers may fully recline their seats while sleeping, especially on long trips. The survey showed up the chest, and spinal injuries with the shoulder belt appeared to be one mechanism in fully reclined occupants wearing a seatbelt and the positioning of the lap belt resulted in upper abdominal injuries. In the developing trend of highly autonomous driving, the new restraint system would be more suitable to the alternative positions as mentioned in [2] will be necessary. Therefore, the study on the occupant response in these alternative positions during some emergency maneuvers to provide the data set to the manufacturers will be very useful.

To examine the restraint system in a vehicle, dummies are usually used to assess and validate. However, dummies which were made of rubbers, foams, and metallic structures were not designed to simulate the human responses in such positions with the fully reclined seatback. The study in [3] showed the dummies exhibit a different kinematic chain in the reclined position than they do in the traditional upright position, especially have a large influence on the forces experienced by the lumbar spine sensors in the dummies. They also suggested using a human body model to investigate more closely what happens to the human spine during a frontal reclined crash. Whereas the human body model (HBM) with bones, muscles, and organs was predicted that it can get more closely investigating that of an actual occupant. Over the past years, a few researchers used HBM to simulate and estimate the human responses and the death risk during a frontal reclined crash. [4] used a HBM of Global Human Body Model Consortium (GHBMC) owned 50th percentile male to estimate the impact of the different reclined seatback angles, the seat cushion materials, and the different angles of the lap belt on the occupant kinematics during a frontal crash, while [5] also used GHBMS to perform some simulations to approach the influence of the reclined seatback on the pelvis rotation and lumbar spine torque. To show how the reclined seatback increases the injury severity and shifts injury pattern, [6] simulated the human response in a car with a standard D-ring seat belt (the D-ring on the B-pillar) by using a scaled Hybrid III 5th percentile ATD on the reclined seat. The study clearly indicated the unfavorable kinematics subjecting the front

of the neck to interact with the locked shoulder belt and the lap belt slid over the pelvis and directly loaded into the abdomen.

These studies addressed the influence of the highly reclined seatback on the occupant kinematics and the restraint interaction in simulated frontal collisions by using the human body models. However, these studies did not cover the pre-crash phase which affects the posture of the occupant especially in an emergency braking maneuver and furthermore the muscle activation was not addressed, which is important for the posture during the pre-crash phase. On the other hand, the integrated safety system in the automated car requires data to predict the occupant kinematics in the pre-crash phase in order to evaluate the effect of a system active before the crash phase [7]. Therefore, the occupant response in the highly reclined posture during a pre-crash phase should be also focused to study. Additionally, the volunteer test with the seatback reclined during some pre-crash phases could be conducted successfully and it is potential to supply the data set to validate the human body model. As the knowledge of the authors, there is no paper focused on the occupant kinematics during an emergency braking maneuver with the fully reclined seatback. The aim of this study is to simulate the occupant responses in the different seatback angles during a braking maneuver by using a MADYMO active human model. We also examined the influence of the different muscle activities and the different D-ring positions as well as the seatback angles on the occupant kinematics to supply useful information to manufacturers to improve the integrated safety systems in the future car.

## 2. Study method.

In this study, an emergency braking maneuver of 3.1s was analyzed using MADYMO simulations. The models included a simplified vehicle interior and an active human model which can simulate the human postures and the muscle tension as well. At the first step, a simulation for the occupant in the standard posture (equivalent to 23° upright seatback) was imposed on a 1g deceleration braking pulse in 3.1s. The models have validated the body kinematics, the muscle activities, and the seatbelt behavior by comparing them to the volunteer data set to Fig. out the best setting parameters of the model. Afterward, the models were tuned to two different reclined occupant postures by keeping all setting parameters except the seatback angles, one for 38° reclined and one for 53° reclined. At last, the simulation results were collected, evaluated and given the conclusions.

### Vehicle model.

Fig. 10 in the Appendix shows the simplified interior model representing a cabin which includes the dashboard, front door trim, center console, front passenger seat, and seat belt. The distance of console and door trim, as well as the position of the front seat in relation to the dashboard and footwell, were derived from the test car used in [13]. The front seat model was created based on scan data of the original front passenger seat. The material data was characterized using the quasi-static loading of the vehicle seat (see Fig. 1). The parameters of the damping, the elastic coefficient and the contact friction of the seat model were optimized in the MADYMO program as the input data for the next simulation basing on the validation results. The seat model has just tuned to three different seatback angles included  $23^\circ$  reclined (standard seatback),  $38^\circ$  reclined (half reclined seatback), and  $53^\circ$  reclined (fully reclined seatback) as seen in Fig. 2, and kept all other setting parameters. The angles of seatback were set following the vehicle specifications of the manufacturer.

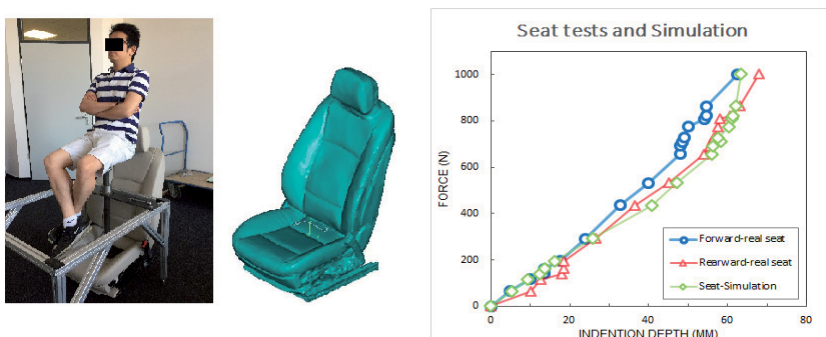


Fig. 1: The front seat model and the comparing result to the seat tests with volunteers.

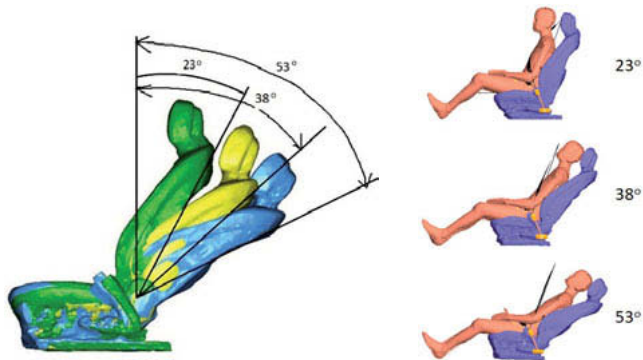


Fig. 2: Three different angles of the front seat model and the corresponding reclined postures.

The seat belt model has a typical configuration as described in [8]. The seat belt model consists of different sub-components as a buckle MB model attached to the seat, an anchor MB model and a retractor MB model attached to the vehicle. The acceleration threshold for the ball sensor of the retractor was set at 0.85g and for the webbing payout at 0.7g (the following part of this study will show the method to find out these parameters). The seat belt also has the function of pretension and load limited force but in this study, we did not focus on the impact of these elements, therefore they were disabled. The D-ring position was also corrected following to the real vehicle as seen in Fig. 10 of the Appendix. It is a B-pillar D-ring standard seat belt model. To investigate the effect of D-ring position on the occupant kinematics during the braking maneuver, the seat belt models with D-ring position on the frame seatback (called seat-integrated D-ring) were built corresponding to three different seatback angle models. In this study, we did not try to build a seat model with seat-integrated D-ring correctly to the real one. The seat-integrated D-ring position was addressed using a D-ring position attached to the right-upper seat bolster of the seatback model.

### Active human model (AHM).

In this study, we used a MADYMO mid-size male human body model representing the 50th percentile in the seated position to simulate the occupant sitting posture in three different seatback angles. As presented above, this is an active human body model version 3.0 which was developed by TNO Automotive Safety Solutions (TASS) BV, Netherlands in the MB and FE software package MADYMO version 7.7 [9]. The active human model consists of 190

bodies (182 rigid bodies and 8 flexible bodies). The first branch connects the head and vertebral bodies to the pelvis. Two branches attach the shoes and the bodies of the left and right leg to the pelvis. Separate branches connect the patella, toes and other bodies in the foot. Two branches attach the fingers and the bodies of the arm to the spine. The thumb is connected to the mid-hand joint on a separate branch from the fingers. The thorax and the abdomen each consist of 4 flexible bodies that divide the thorax and abdomen into horizontal slices. Attached to each slice at the left and right side and at the front, bodies have been placed for attachment of the force models. The thorax and abdomen bodies are divided over 3 branches (front, left and right) for each slice [10]. The model was verified by various loading tests, including a volunteer with the sled and with vehicle tests and post modern human substitute tests. The muscle model implemented in MADYMO is based on a description originally formulated by Hill. Unfortunately, the muscle activation of AHM hasn't been verified during the pre-crash phase. In this study, we also presented the validation results of muscle responses in the neck and the arms of AHM by comparing to the volunteer test data in some braking maneuver.

#### **The AHM standard posture validation.**

In order to optimize the setting parameters related to muscle tension of AHM, the seat belt activations, and the footwell force, the authors selected 3 papers that presented the volunteer test data of the low deceleration braking events. The data test including the occupant kinematics, the muscle tension, the footwell force, and the seat belt activations was collected to compare to the simulation results of the model with the AHM in the standard posture. The setting parameters of the standard posture model achieved from these processes will be applied for the half reclined (38°) and fully reclined (53°) posture remaining.

In [11], Jóna M. Ólafsdóttir et al. (2013) recorded the front right seat passenger volunteer kinematics, the electromyographic (EMG) responses and the vehicle interaction forces in 1.1g autonomous braking events in a test vehicle driving on relatively empty rural roads. 09 volunteers seated in the passenger seat, each volunteer was restrained with a standard seat belt that would be focused on this study and a reversible pre-tensioned belt as well.

In [12], Philipp Huber et al. (2015) presented a detailed analysis of occupant kinematics with up to 25 subjects under emergency braking maneuvers at 12 km/h and 50 km/h. Detailed vehicle and occupant kinematic corridors are also presented.

In [13], driving tests with a total number of 30 volunteers (24 males and 6 females) were performed in the test vehicle was a BMW 535i Touring (F11). The tests were chosen to simulate typical precrash scenarios such as partial- or full-braking before an impact. The Racelogic Video VBox was used in order to record the volunteer motions during the tests. The motion of each passenger in each manoeuvre was measured by video analysis with the software TrackIt (IAT Ingenieurgesellschaft für Automobiltechnik mbH), which allows visual tracking of several markers placed on defined body parts of the subjects.

Based on the information of the above papers concerned with the test car loading, the event time, the passenger seat characteristics, the standard seat belt, we used the AHM in the standard posture to simulate the volunteer responses. The simulation resulted in the model kinematics, the muscle model activation, the seat belt model responses, and the force of footwell. The AHM was changed the muscle setting correspondingly to get the best results. Fig. 1-5 in the Appendix indicated the simulation results of the standard posture AHM in comparison to the volunteer data of the three papers which were mentioned above. As the author's opinion, the AHM can predict the occupant responds very well. The seat belt activations including the shoulder belt force and the belt pay-out are very close to the mean values of the volunteer data set as well as the footwell force simulation results. The muscle simulations at the neck and arm also got good results except for the anterior muscle at the neck (sternocleidomastoid muscle) will need to be improved due to the maximum peak reaction and the time reaction seemed to be much different.

#### **Initial model setting and simulation matrix.**

This study assumed an occupant seating on the front passenger seat with the different angles of the seatback in a low-deceleration braking event to investigate the occupant kinematics. The braking pulse applying for each case of simulations was similar and collected from the test vehicle in paper [13]. As mentioned above, 30 braking test times were conducted with a BMW 535i Touring (F11), it means 30 pulses were calculated to find out the average pulse which was the loading input of the MADYMO simulation. As shown in Fig. 11 in the Appendix, the time-history curves of the forward deceleration representing the emergency braking maneuvers were 3.1s. The maximum deceleration generated by braking was peaked around 1g and had the onset at around 0.5s.

The coordinate axis system of the vehicle model as a reference coordinate system was set following ISO 8855-2011 [14] whereas the original coordination point (Zero: 0) was set at the point of H-point of the front seat model. The AHM v3.0 was initially seated on the seat model with the Hip-point set at 11 mm below and 16 mm rearward of the seat H-point as following

the study of Matthew P. Reed [15]. The friction coefficient of seat cushion was set at 0.4 based on the validation model result of the AHM standard posture before performing proper equilibrium settling runs for the AHM model [16]. The purpose of this process is to ensure the AHM at the stable state without any loading force except for the gravity force. When the AHM found the equilibrium position, the initial position of the shoulder belt and the lap belt on the body of AHM were set as following the study [15]. Based on the mean values of that survey, the author set the middle point of the lap belt of the standard D-ring seat belt system is  $X = 94.6 \text{ mm}$  and  $Z = 58.9 \text{ mm}$  corresponding to the Hip-point, and the middle point of the shoulder belt was  $Y = -50 \text{ mm}$  corresponding to the sternum point (see Fig. 15,16 in [15]). However, for the seat-integrated D-ring seat belt, the shoulder belt was set with  $Y = 0$ .

As mentioned above, the study assumed the seatback reclined reward to  $38^\circ$  (half reclined) and  $53^\circ$  (fully reclined) from the standard position. The coordinate values of the point at head CG, C1, T1, T10, L1, hip, knee, and ankle were measured to monitor the occupant motion. Those points were calculated and converted into the reference coordinate system of the vehicle model. The displacement of each point was calculated assuming that the initial point without the braking maneuver was at 0.5s of each simulation. Furthermore, to investigate the effect of the muscle tension on the occupant kinematics in the three different seatback angles during the braking maneuver, the study assumed three levels of muscle tension of the AHM. The first level was called active muscle which was verified in the standard posture AHM ( $23^\circ$  reclined.) wherein the neck activation was set at 80% of MVC (maximum volunteer contraction) [11], the spine activation at 100% of MVC, while the hip, elbow, and shoulder at the same level was 1% of MVC, the knee level was set at 30% of MVC. The second level was called partially relaxed muscle which was set the same level of muscle activation of the hip, elbow, shoulder, and knee to the values of the active muscle, except for the neck at 50%, spine at 50% of MVC. The third level of muscle tension of the AHM was the full relaxed wherein all the muscle tension was set at 1% of MVC. (0% MVC was eliminated to ensure the stable model during the simulation). Additionally, the position of the D-ring of the seat belt was predicted to impact on the occupant response, therefore two different positions of D-ring were simulated. One simulation for the standard D-ring seat belt which was defined and mentioned the D-ring position on the B-pillar ( $X = -279\text{mm}$ ,  $Y = -280\text{mm}$  and  $Z = 605\text{mm}$  corresponding to the vehicle reference coordination system). One simulation for the seat-integrated D-ring seat belt with D-ring position was located on the upper right bolster, right shoulder seatback, 180mm of distance to the symmetrical plane of the seatback. Table I summarized 18 cases of all simulations.



Table 1: Simulation matrix

Case No.	The reclined seatback	The muscle tension	The D-ring position
1	Standard reclined	Active muscle	Standard B-pillar
2	Half reclined		
3	Fully reclined		
4	Standard reclined	Partial relaxed	
5	Half reclined		
6	Fully reclined		
7	Standard reclined	Full relaxed	
8	Half reclined		
9	Fully reclined		
10	Standard reclined	Active muscle	Seat-integrated
11	Half reclined		
12	Fully reclined		
13	Standard reclined	Partial relaxed	
14	Half reclined		
15	Fully reclined		
16	Standard reclined	Full relaxed	
17	Half reclined		
18	Fully reclined		

### 3. Results.

In order to investigate the effect of the reclined seatback on the occupant kinematics with the different muscle tension and the different D-ring seat belt position during the braking maneuver, 18 simulations were performed. In this section of the study, the maximum forward and the motion on the X and Z direction of the head CG, T1 were captured to indicate the effect of the reclined seatback. On the other hand, the rotation of the AHM pelvis around the Y-axis, the compression force of T12 and L5 on the spine was also plotted out as well as the shoulder belt force to indicate the effect of fully reclined seatback posture, and how those changed among three different postures. In addition, those factors also were plotted out in different cases with the different muscle tension levels and the D-ring position during the braking event. All simulations were performed from 0.5s to 3.1s following the history-time of the deceleration pulse in [13].

Fig. 6,7 and 8 in the Appendix show the occupant behavior based on the AHM in case of the standard D-ring seat belt during the braking maneuver wherein 09 simulations indicated the effect of three reclined seatback angles in relation to three levels of muscle tension at 0.5s (initial phase), 1.0s, and 1.5s (forward phase) of the time-history of the maneuver. These Fig.s did not show the maximum excursion of the upper torso of the occupant body, however,

they indicated intuitively the change of occupant posture, the forward and downward displacement of the head CG and T1 as well as the change of distance from the head to the headrest (called the head's distance) of the seat of each case. At the initial phase 0.5s in Fig. 6 of the Appendix, all cases had the AHM head contacting to the headrest except for the Case 1, Case 4, and Case 7 were 51mm of the head's distance. The distance value of the cases with 23° reclined seatback increased much at the middle time 1.0s while those distance values in cases of 53° reclined were smallest in the range of 46mm to 59mm (Fig. 7 of the Appendix). At that moment, the cases corresponding to the full relaxed of muscle state had the head's distance were larger than other remaining states. It was 303 mm of Case 7 comparing to 182mm of Case 1 and was 163mm of Case 8 in comparing to 88mm of Case 2. Fig. 8 of the Appendix indicated the posture of the occupant at 1.5s in the forward phase of the braking maneuver, the maximum and minimum distance of the head concentrated in the cases of fully reclined (53° reclined) as Case 3 and Case 9. They were 99mm of minimum and 555mm of maximum value. The partial relaxed cases (Case 4, Case 5, and case 6) almost had no different distance value while Case 7, 8, and Case 9 with the full relaxed muscle state had a bigger distance value than the other cases.

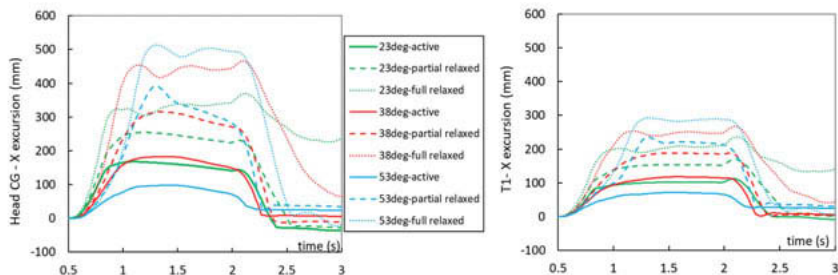


Fig. 3: The forward excursion of head CG and T1 according to the case of the different reclined seatback angles and level muscle tension.

Fig. 3 shows the forward excursions of the upper torso (head CG and T1) from the initial time (0.5s) to the end (3.0s) of the braking maneuver. Those included the initial phase, the forward displacement phase, and the backward phase, wherein the case of 53° reclined and full relaxed muscle tension was the biggest displacement of head CG and T1. In opposite, the case of 53° and active muscle tension was the smallest value of the displacement. These results based on the standard D-ring seat belt models.

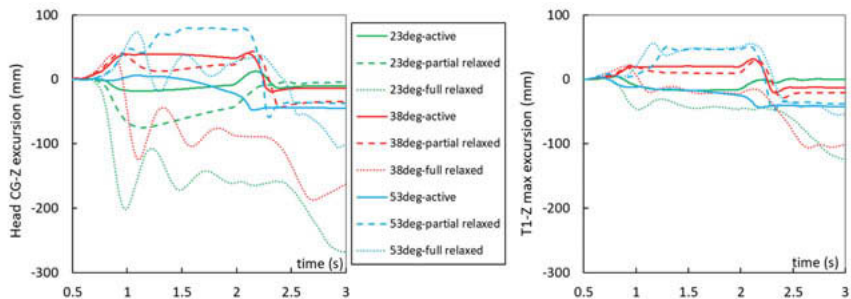
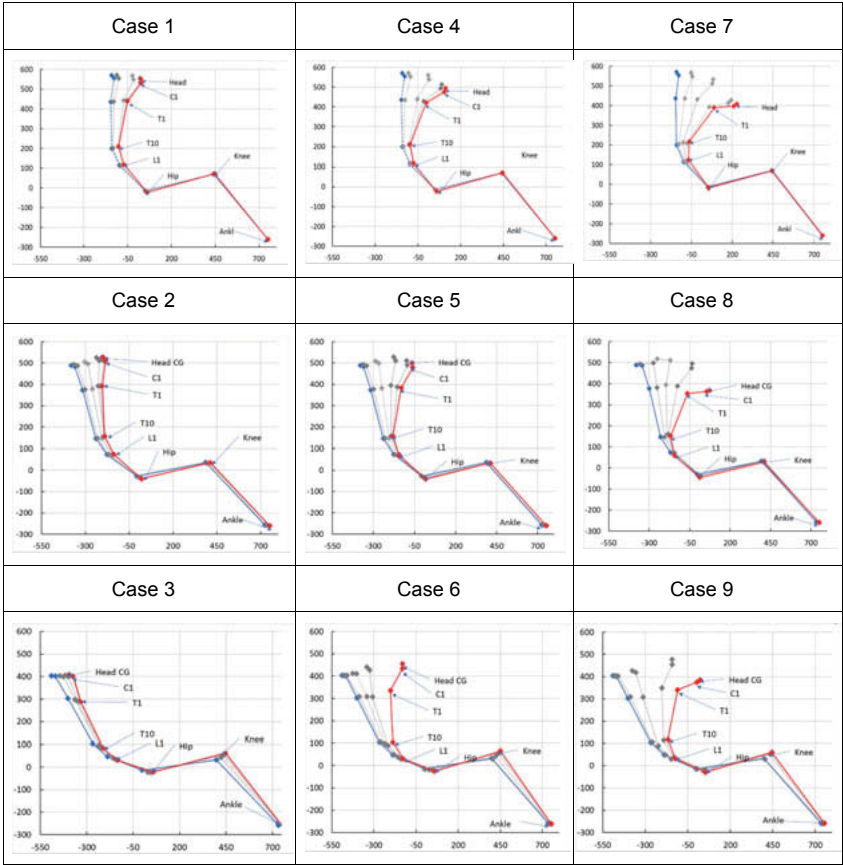


Fig. 4: The downward/upward excursion of head CG and T1 according to the case of the different reclined seatback angles and level muscle tension.

Following the Z direction, the head CG and T1 also moved upward and downward. In the case of 53° reclined and partially relaxed muscle tension, head CG and T1 moved upward around 80mm and 45mm correspondingly. The case of 53° reclined and fully relaxed muscle tension had similar upward values. However, the case of 23° reclined / fully relaxed muscle tension moved downward to around -270mm of head CG and -110mm of T1 as showing in Fig. 4.

Table 2: The maximum displacement of the main body point in the XZ plane.



To investigate the relationship between the initial point and the maximum displacement of the main point along the occupant body (head CG, T1, T10, L5, hip, knee, and ankle), the dot-blue line indicated the initial position at 0.5s in Table 2 of the Appendix while the solid-red line indicated the maximum displacement of those point in the symmetric vertical plane XZ. The cases wherein were the fully reclined seatback had significant forward displacement of the knee around 60mm while the standard reclined seatback almost had no significant displacement. The rotation of the upper torso in those cases with standard reclined seatback

also had a significant increase in the comparison to the other cases (the behavior of L1-Hip around hip point).

Fig. 5 shows the compression force of the contact T12-L1 and L5-S1 along the occupant's spine. The compression force of T12 in the cases of the fully reclined seatback was much higher than the cases of the standard reclined seatback. The compression force of L5 had a similar tendency to the T12 compression force. These plotted results had no significant different values of compression contact force of T12 and L5 among the cases of various muscle tension levels. Fig. 5 also plotted out the maximum values of the shoulder belt and lap belt force in relation to the reclined angles and the muscle tension level. Active muscle tension helped mitigate the belt force in the fully reclined seatback while the partially relaxed and fully relaxed resulted in a similar value around 600N of the shoulder belt and 320N of the lap belt.

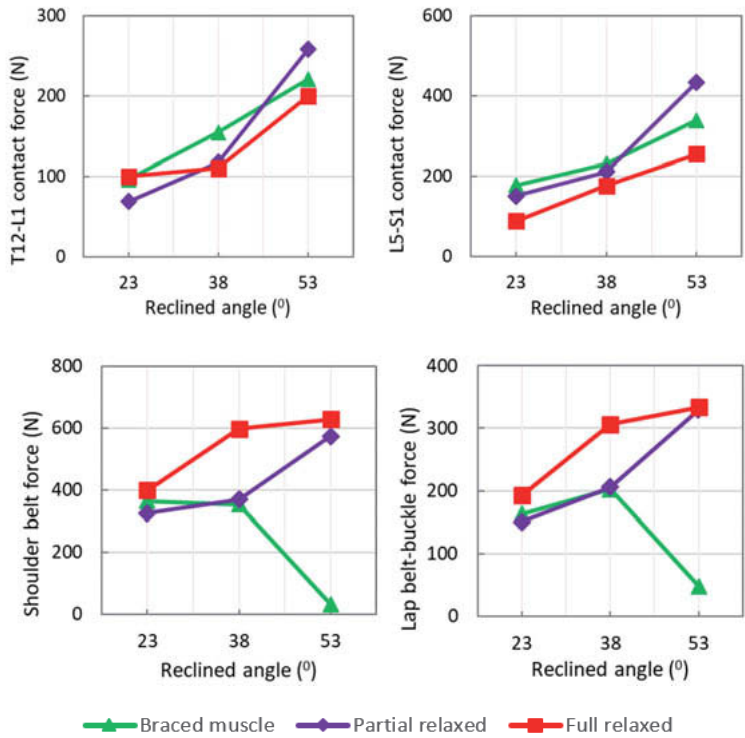


Fig. 5: The contact force of T12, L5 and belt force in the relationship between the reclined seatback angle and muscle tension

4. Discussion.

This study used a MADYMO active human body model (AHM) to simulation the occupant response in various reclined seatback angles (standard reclined, half reclined, and fully reclined) in an emergency braking maneuver. 18 cases of occupant behavior simulation were analyzed to investigate the impact of the reclined angles, the muscle tension levels, and the different D-ring positions on the occupant response. Only the standard reclined seatback model (23°) was validated by comparing it to the volunteer data set.

### **The standard reclined seatback (upright seatback) model validation.**

As shown in Fig. 1 to 5 in the Appendix, the standard reclined seatback model was verified based on the paper [11], [12], and [13]. Based on the [11] validation, the head displacement in the direction of the X-axis and Z-axis stayed in the volunteer data corridors. The T1 displacement and the seat belt reaction results were very close to the mean value of the volunteer data, and the vehicle test data. As seen in Fig. 1 of the Appendix, the AHM head was rotated around the Y-axis in counter-clockwise at around 1s of the time-history while the volunteer nearly kept at 0° due to the anterior/posterior muscle activations (Sternocleidomastoid muscle SCM and Splenius Capitus muscle CPVM) at neck to keep the volunteer eyes in the horizontal plane. The SCM and CPVM of the AHM also activated at 1s when the deceleration pulse reached to the maximum value to keep the eyes horizontally. However, the maximum co-contraction of the SCM was smaller than the average value of the volunteer and the CPVM activation had a signification delay in comparison to the average volunteer data as shown in Fig. 3 of the Appendix. In order to improve the AHM head rotation, the response of the neck should be verified in the next study. The response of the AHM in Fig. 5 of the Appendix was good. The forward displacement of head, shoulder, elbow, chest, pelvis, and knee was plotted out by the red curves which were in the volunteer data corridor of [13], however, in this Fig., the seat belt model was not validated. The seat belt model in this study just was validated based on the data from [11], and then the verified parameters of the seat belt were used as inputs for simulating BMW 5 touring (F11) seat belt behavior. This means it still has got a gap in this study because of lacking the data to make sure two seat belt systems in two test vehicles having a similar characteristic. However, using the vehicle model based on BMW 5 touring (F11) will be a potential success in validating the AHM in a fully reclined posture when conducting the volunteer test on this car.

Fig. 4 of the Appendix shows the validation result of the AHM in the standard posture, it indicated the head and the torso response of AHM (the blue curves) lying in the volunteer data corridors except for the torso rotation around the Z-axis. The AHM torso seemed not to rotate while the volunteer rotated more than that. Those were supposed that the seat belt restricted the shoulder right of the body, and the upper torso of the volunteer was more flexible than the AHM, therefore the shoulder left kept moving forward. The result of the footwell force response in Fig. 2 of the Appendix let us know partially how the lower limb (hip and legs) of AHM reaction during the maneuver but there is still a lack of validation analyzing the lower limb muscles. The activation of those muscles did not investigate in this section. The paper [11] supplied the validation data of the M-BF (biceps femoris longus), M-RF (Rectus-femoris), and M-TA (Tibialis-anterior) of the volunteer leg muscles but as the author

mentioned above, the muscle model of AHM was only validated in the crash and has never investigated in the pre-crash phase. Therefore, the work in the future on the leg muscle model to verify and validate the response will be very useful for improving the AHM.

### **The muscle tension and reclined angle study.**

To investigate the effect of muscle tension in relation to the reclined seatback angles in the similar condition of the D-ring position and the braking maneuver on the occupant kinematics and the seat belt activation, the maximum values of head, T1 displacement, and pelvis rotation was plotted out in Fig. 6 as well as the contact force of T12 and L5 in Fig. 5. Basing on those, some evaluations were given.

The muscle tension reduced the forward excursion of head, T1 and pelvis rotation while it has no significant difference in the forward excursion of the hip. When the reclined seatback angle increased the contact force of T12 and L5 also increased (Fig. 5). It means it was the higher lumbar compression load when the inclined seatback angle increased. The hip excursion in X-axis increased very much at the highly reclined seatback. In opposite, the rotation of the pelvis around the Y-axis was lower at the higher reclined seatback angle. In the comparison of head and T1 in X displacement, those factors did not pitch significantly at the highly reclined seatback.



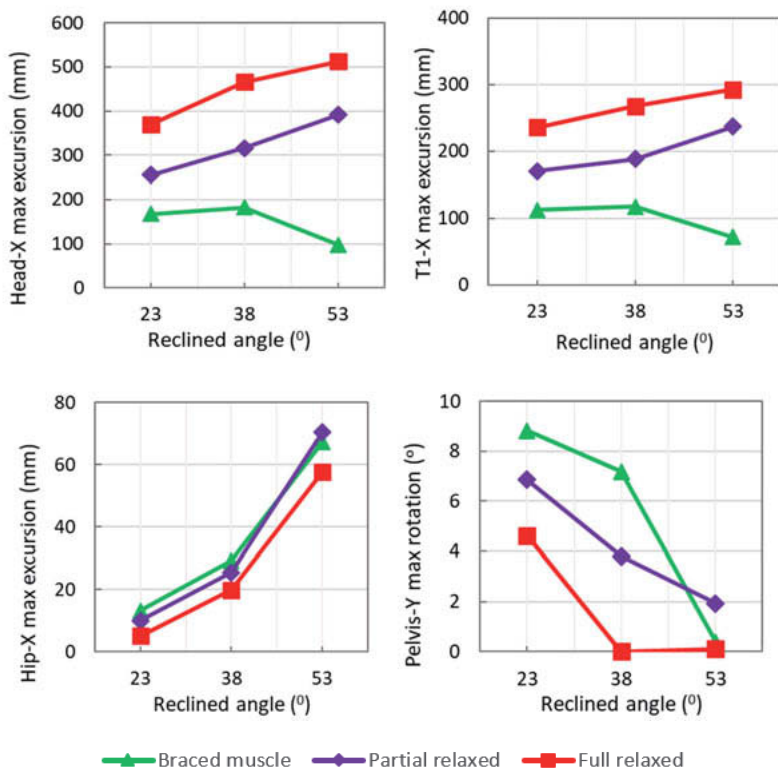


Fig. 6: The effect of muscle tension and reclined angle at a similar D-ring position

Fig. 7 illustrates the activation of the seat belt system in the different reclined angles and the various muscle tensions. At fully reclined seatback, the seat belt force reduced closely to 0N in case of active muscle because the shoulder belt nearly had no contact with the occupant's chest as the above comment in the first part of this study. The high muscle tension level helped restrain the chest forward, the lap belt also reduced but higher than 0N because the hip slipped forward along the seat cushion. With the lower reclined angle, it seems that was no significant difference in the seat belt force values. In case that muscle tension was relaxed or partially relaxed, seat belt force increased when the reclined seatback angle increased.

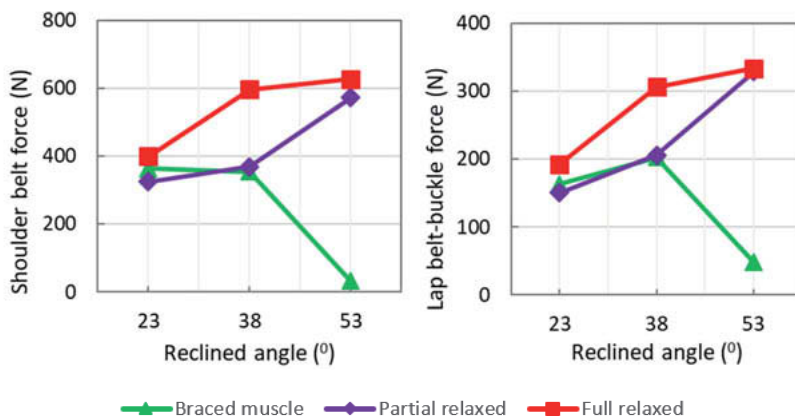


Fig. 7: Seat belt activation in various reclined seatback angle and muscle tension.

As mentioned above, this study assumed that the occupant body was two levels of relaxed muscle tension, one is partially relaxed in which the activation of the neck and spine were 50% of MVC and another one has fully relaxed in which the activations of all muscles were only 1% of MVC. These level tensions were maintained during the braking maneuver 3.1s. That means the muscle contraction of the AHM would not change in the whole event. However, it is predicted that the muscle contraction would change the state when the occupant aware of the maneuver happening and the brain had enough time to transfer the signal to the muscles to change the muscle activations. The body kinematics will change after then. The AHM at fully reclined seatback posture in this study was set at the state that has no change the muscle tension during the event. The model should be investigated in the future relating to this matter.

### The D-ring position and reclined angle study.

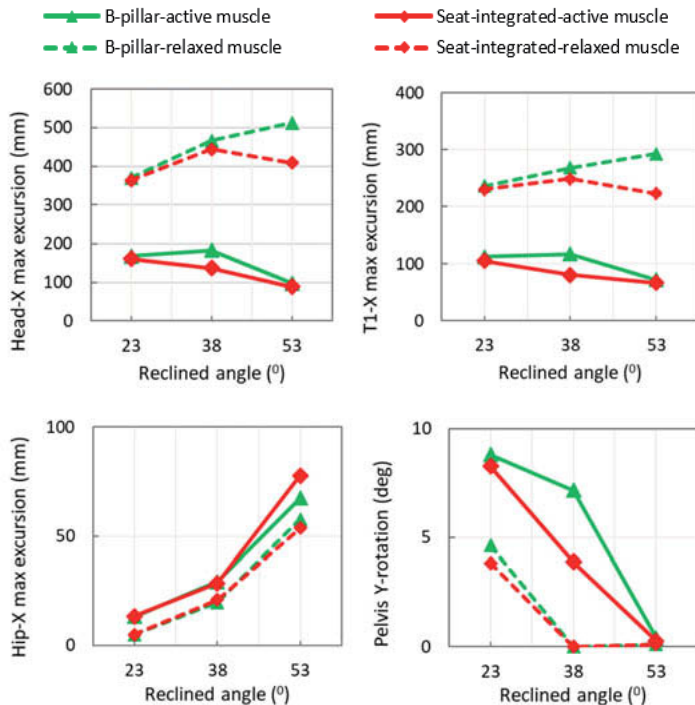


Fig. 8: The effect of D-ring position on the upper torso kinematics.

This part of the study assumed the AHM in various D-ring positions (one for B-pillar D-ring and one for seat-integrated D-ring) with the different reclined seatback angles. As seen in Fig. 8, when the muscle tension was active, the maximum values of the head, T1, hip displacement, and pelvis rotation had no big difference. This means that when the D-ring position had no significant effect on the occupant response at the same posture. When the reclined seatback angle increased, the displacement of head and T1 had no big change but the hip displacement increased at highly reclined seatback while the pelvis rotation around the Y-axis tended to reduce. However, when compared to the relaxed state of the muscle, the D-ring position impacted significantly on the head and T1 displacement at a highly reclined seatback angle. The seat-integrated D-ring helped reduce the pitch of the upper torso (head, T1 displacement reduced). Look at the maximum values of the lumbar compression loads in Fig. 9, when the muscles were active level, the lumbar compression

loads (T12 and L5 compression) seemed not to have big different value, the position of D-ring did not impact.

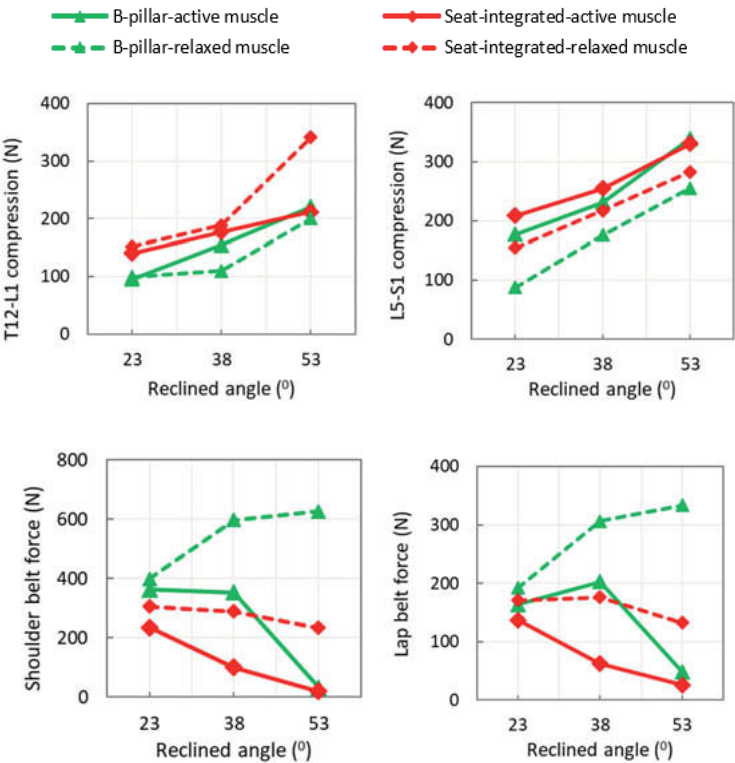


Fig. 9: The effect of D-ring position on the lumbar compression load and the seat belt activation

To see the effect of D-ring position on the seat belt activation, the seat-integrated D-ring reduced the shoulder belt and lap belt force at the highly reclined seatback. When the occupant seated in the standard position, the D-ring position almost did not influence on the seat belt activation.

## 5. Conclusion.

This study was successful in using a human body model with active muscle and a simple vehicle model to investigate the effect of the various reclined seatback angles on the occupant kinematics during an emergency braking maneuver. In addition, the study also showed the impacts of muscle tension and the D-ring seat belt position on the occupant response. The data of those investigations are very important for the integrated safety system during the pre-crash phase. The study altered three different postures to evaluate the influence of reclined seatback: 23° reclined (standard posture), 38° reclined (half reclined posture), and 53° reclined (fully reclined posture) wherein only the standard 23° reclined posture was validated by the volunteer data. The half reclined and fully reclined posture just kept all set of parameters as the standard posture had. In the braking maneuver, the fully reclined posture was predicted that can perform well with the volunteer in the real test car in the real-time traffic. That would be the next step of this study in the future to make the evaluations in this one more rigid.

## 6. Acknowledgment.

The authors would like to appreciate to TNO Automotive Safety Solutions (TASS) for their support in developing the human body model.

## 7. References.

- [1] Sharmila D., Robert K., Christopher M., Charles M., and Eileen B. The Effect of Reclined Seats on Mortality in Motor Vehicle Collisions. The Journal of TRAUMA Injury, Infection, and Critical Care. March 2008.
- [2] Sofia J, Katarina B, Annika L. Seating Positions and Activities in Highly Automated Cars – A Qualitative Study of Future Automated Driving Scenarios. IRCOBI Conference, 2017, IRC-17-11, pp. 7-9.
- [3] Huf, A. et al. 2018. Development of Occupant Restraint Systems for Future Seating Positions in Fully of Semi-Autonomous Vehicles. Proceedings of Airbag Conference.
- [4] 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.

- [5] 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.
- [6] Chandrashekar K. T. 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.
- [7] Jonas O. J'ona Mar'in O., Karin B. Modeling Active Human Muscle Responses during Driver and Autonomous Avoidance Maneuvers. Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [8] Model manual. MADYMO application model for integrate safety, Version 2.0. November 2016.
- [9] MADYMO 7.7 & Workspace 7.7 [<https://tass.plm.automation.siemens.com/new-madymo>].
- [10] MADYMO Human Models Manual Release 7.7. 2017. [<https://www.tassinternational.com/>].
- [11] Jóna M. Ó., Jonas K. H., Johan D., Karin B. Passenger Kinematics and Muscle Responses in Autonomous Braking Events with Standard and Reversible Pre-tensioned Restraints. IRCOBI Conference 2013, IRC-13-70.
- [12] Philipp H., Stefan K., Adrian P., Thomas S. Passenger kinematics in braking, lane change and oblique driving maneuvers. IRCOBI Conference 2015, IR-15-89.
- [13] Kirscht S, Müller G, Johannsen H, Goede W, Marker S. Observation of Front Seat Passenger Posture and Motion in Driving Maneuvers. IRCOBI Conference 2014, IRC-14-72.
- [14] Road vehicle – vehicle dynamic and road holding ability - vocabulary - ISO 8855-2011.
- [15] Matthew P. R., Sheila M. E. Effects of Recline on Passenger Posture and Belt Fit. University of Michigan Transportation Research Institute, Final Report UMTRI-2018-2, September 2018.
- [16] AHM & ATD Positioning Guidelines v2.0 [[www.tassinternational.com](http://www.tassinternational.com)].

8. Appendix.

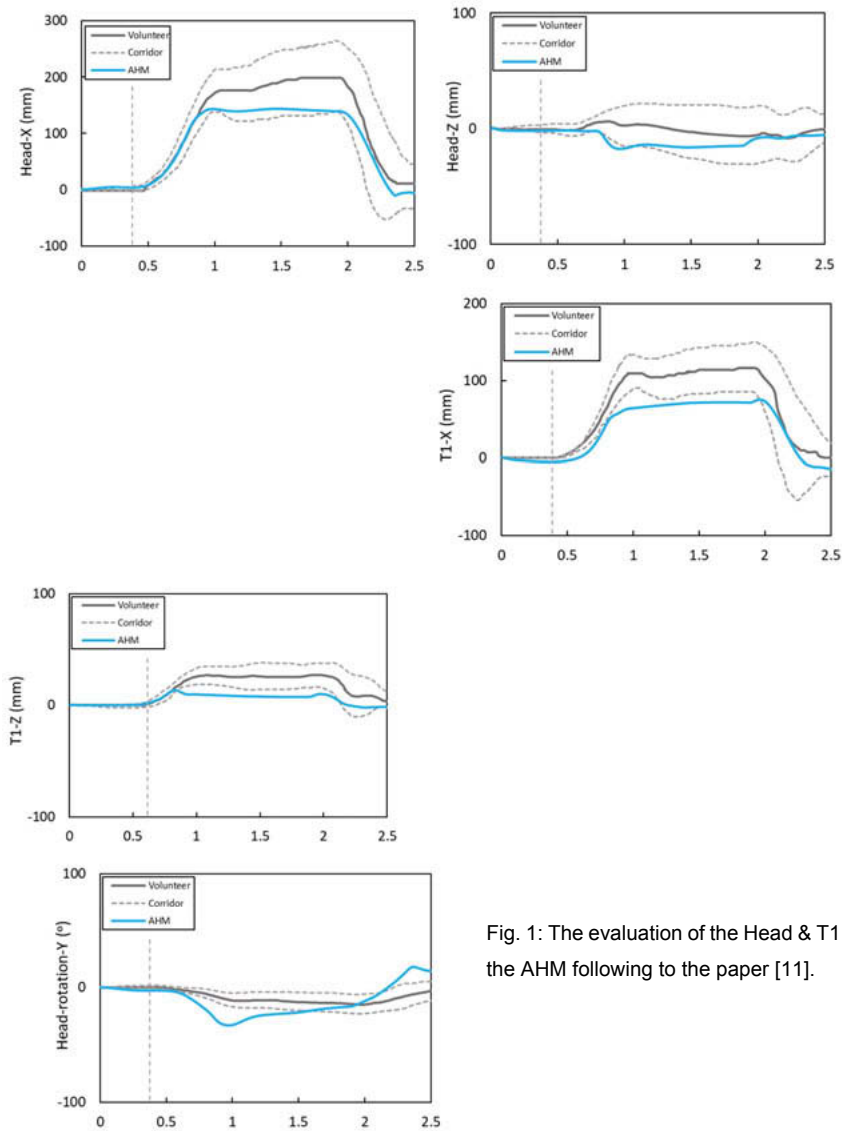


Fig. 1: The evaluation of the Head & T1 of the AHM following to the paper [11].

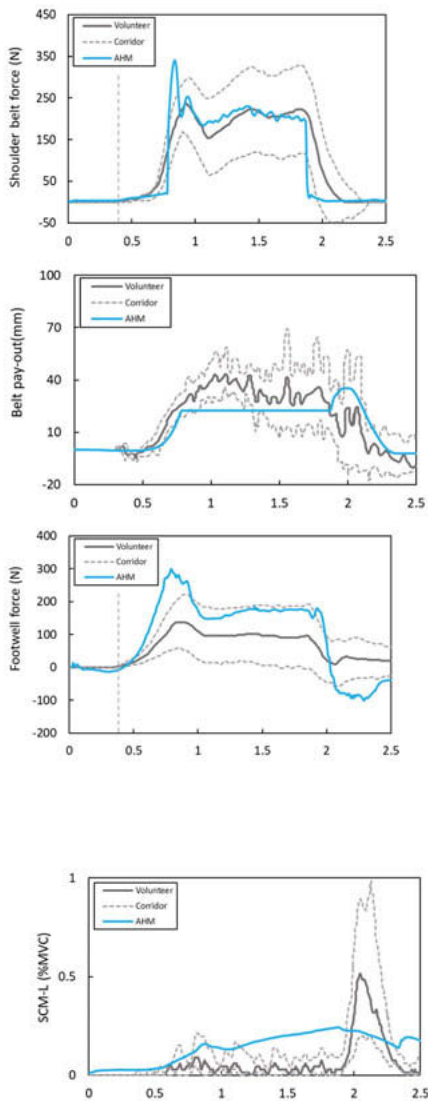


Fig. 2: The evaluation of the Shoulder belt, belt pay-out & Footwell force of the AHM following to the paper [11].



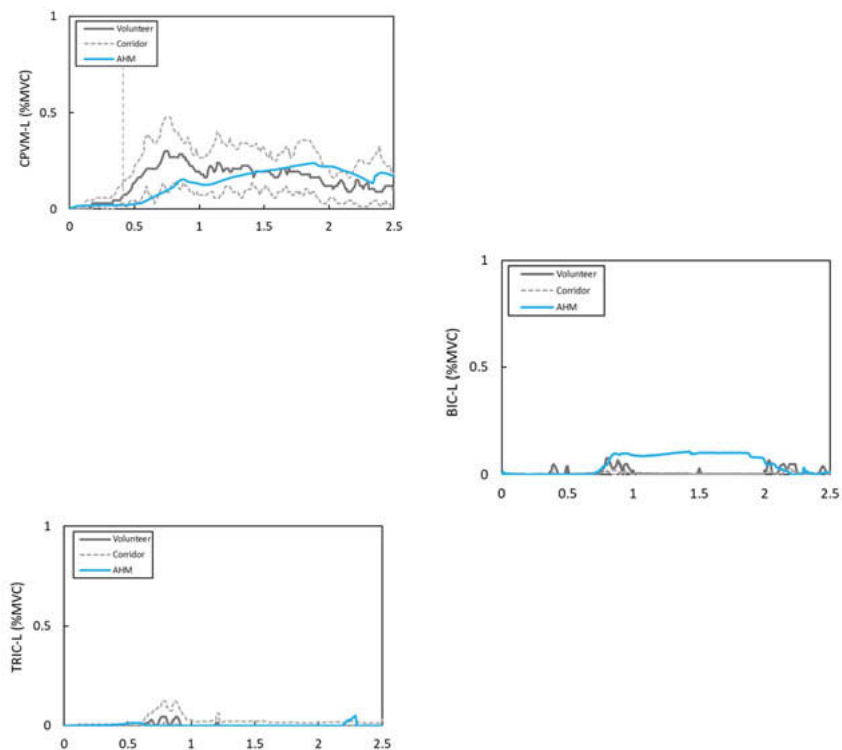
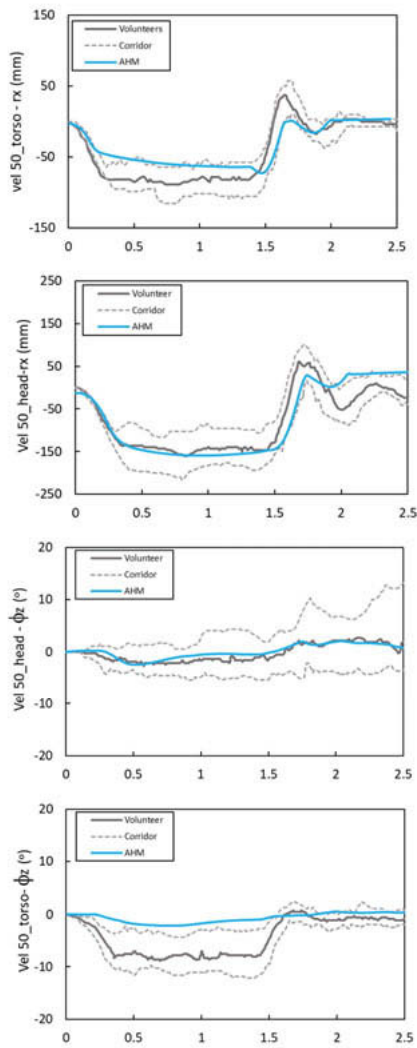


Fig. 3: The evaluation of the muscle activation at the neck & arm of the AHM following the paper [11].



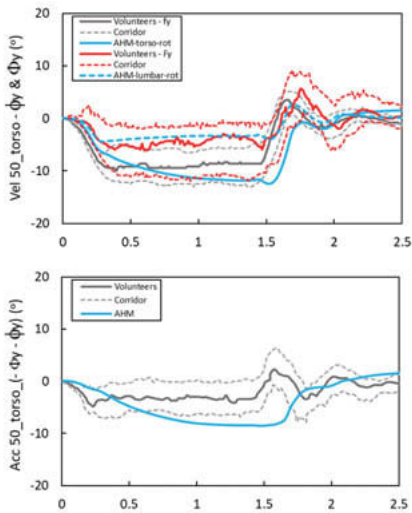
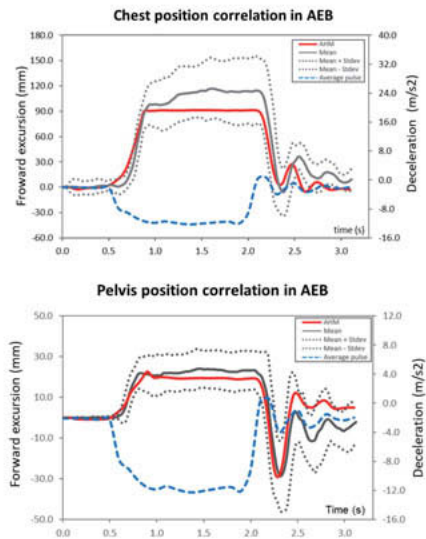
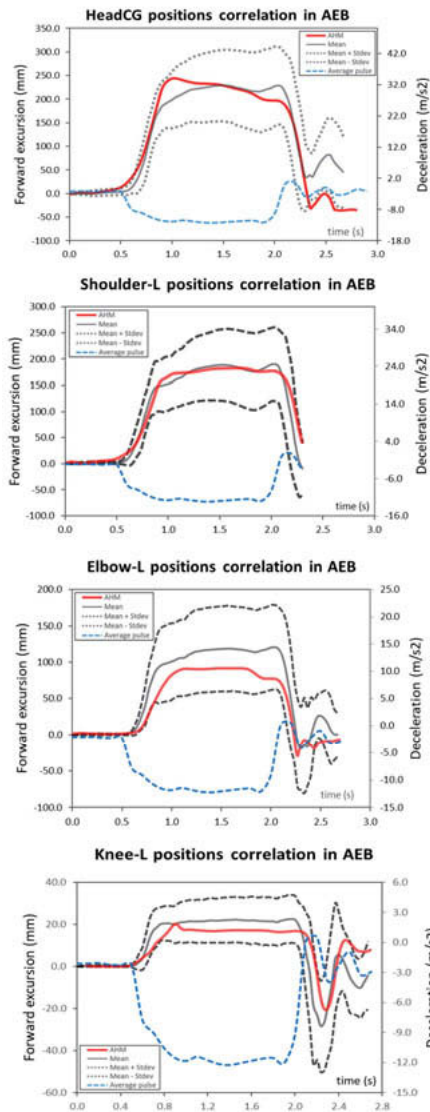


Fig. 4: The evaluation of the head & torso kinematics of the AHM in the braking maneuver (initial velocities of 50 km/h) following the paper [12].





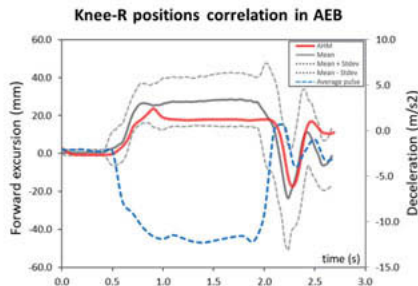


Fig. 5: The evaluation of the forward displacement of Head CG, Chest, Pelvis, Shoulder-L, Elbow-L, and Knees of the AHM in a braking maneuver simulation following to the paper [13].

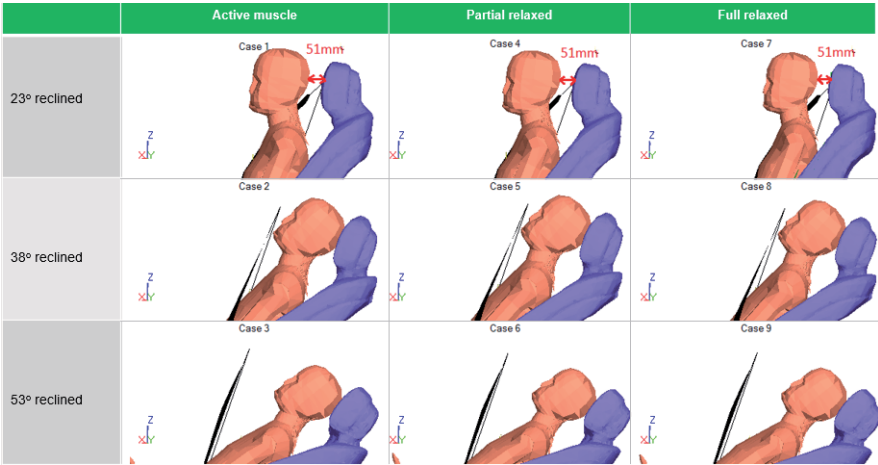


Fig. 6: The occupant posture in case of standard D-ring seat belt at 0.5s time-history of the braking maneuver.

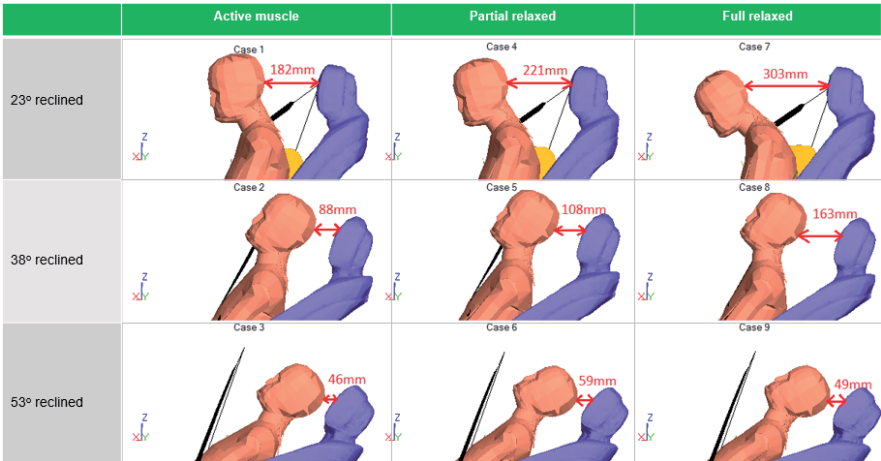


Fig. 7: The occupant posture in case of standard D-ring seat belt at 0.8s time-history of the braking maneuver.

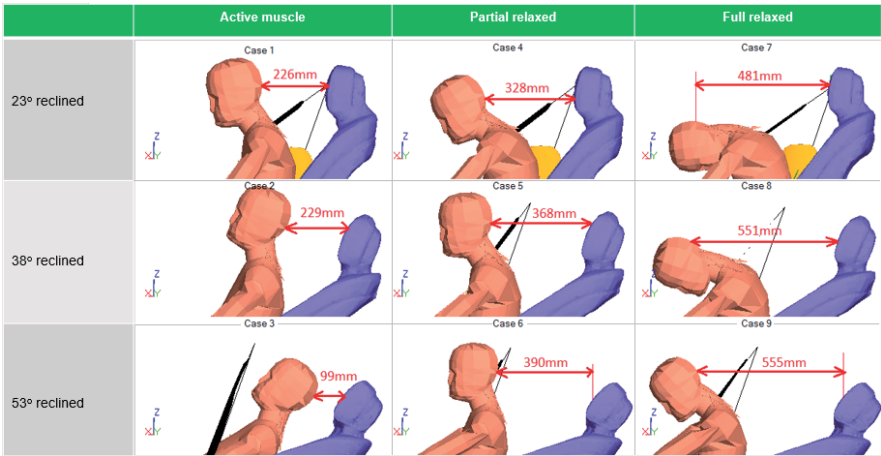


Fig. 8: The occupant posture in case of standard D-ring seat belt at 1.5s time-history of the braking maneuver.



Fig. 9: The shoulder seat belt doesn't contact to the body with the fully reclined seatback in BMW 535i Touring (F11).

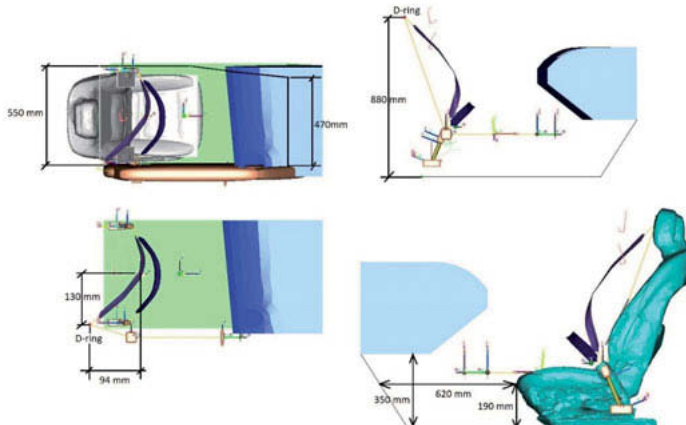


Fig. 10: The simplifier vehicle model.

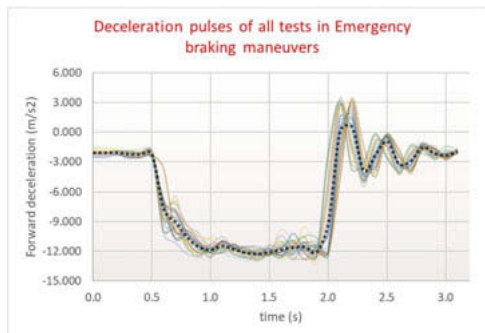


Fig. 11: The average pulse of 30 braking maneuvers in [13].



## **Entspannte Sitzpositionen im automatisierten Fahrmodus – Gefahr für die Lendenwirbelsäule bei einem Crash?**

### **Alternative seating positions in autonomous driving vehicles – a lumbar spine risk assessment**

Dr.-Ing. **Martin Unger, Daniel Hintze,**  
IAT Ingenieurgesellschaft für Fahrzeugtechnik, Berlin

#### **Zusammenfassung**

Automatisierte Fahrzeuge ermöglichen den Insassen, entspannt am Straßenverkehr teilzunehmen und erlauben Sitzpositionen, die weniger aufrecht sind als beim herkömmlichen Führen eines Fahrzeuges. Im Falle einer Kollision kann es durch die weiter nach hinten geneigte Sitzposition und der damit einhergehenden Veränderung der Lastenleitung in den menschlichen Körper zu erhöhter Belastung der Wirbelsäule kommen. Die auftretenden Druckkräfte und Biegemomente können besonders im Bereich der Lendenwirbelsäule zur Schädigung von Wirbelkörpern oder Verletzungen der Bandscheiben, sowie des Rückenmarks führen. Dummies ermöglichen zwar die Messung von Kräften und Momenten in diesem Bereich, bilden aber die realen Wirbelsäulencharakteristika nicht hinreichend ab. Nur mit einer genaueren Bild des Menschen wird auch eine Beurteilung des Verletzungsrisikos des Menschen in diesen Sitzpositionen möglich.

Für eine weitreichende Betrachtung wird eine Datenbasis mit Wirbelsäulengeometrien verschiedener Probanden unterschiedlichen Geschlechts, Körpergröße und Konstitution in diversen Sitz- und Liegepositionen erstellt. Zur Vermessung der Wirbelsäule wird auf radiologische Verfahren verzichtet und ausschließlich auf strahlenbelastungsfreie Verfahren zurückgegriffen.

Mit Hilfe dieser Datenbasis werden Wirbelkörperstellungen zueinander in verschiedenen Körperhaltungen und Sitzpositionen auf FE-Menschmodelle übertragen und in Insassenschutzsimulationen bewertet.

## Abstract

Autonomous driving provides the opportunity to choose between different seating positions. As it is not necessary to sit upright to hold the steering wheel, one can slouch for higher ease and more comfort up to an almost horizontal sleeping position. In the case of a frontal crash, the probability of suffering lumbar spine injuries increases. Namely, the acting loads can cause spinal fractures as well as intervertebral disc and spinal cord injuries.

Anthropomorphic test devices measure acting force and moment at the lumbar region, using deformable elements to mimic the behaviour of human lumbar. In FE-Simulation, human body models can provide a more detailed picture of the occupant kinematics and spinal loads during the crash phase. In consideration of vertebral position changes, the movement of the thorax and resulting load varies in certain cases. In consideration of minor position changes, the movement of the thorax and the resulting load varies more than expected in certain cases. The correct definition of the spinal curvature for particular seating positions therefore, plays a decisive role in lumbar spine injury assessments.

This study provides a basis of different spinal curvatures among different seating positions, gender, body length and age. Each subject is measured using radiation-free IDIAG M360. Gathered data is used to position the FE human body models and various spinal positions are assessed in sled-test simulations in terms of the lumbar spine injuries.

## Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage
2. Verletzungen der Lendenwirbelsäule durch axiale Kompression und Biegung
3. Einfluss unterschiedlicher Wirbelsäulenkrümmungen auf die  
Lendenwirbelsäulenbelastung
4. Ermittlung der Wirbelsäulenkrümmung in unterschiedlichen Sitzpositionen
5. Auswertung der erhobenen Daten
6. Auswirkung von fehlerhaften Wirbelkörperstellungen im Frontcrash
7. Fazit und Ausblick

## 1. Ausgangslage

Die fortschreitende Entwicklung von automatisiert fahrenden Kraftfahrzeugen bietet die Voraussetzung und zugleich den Anreiz, andere Sitzpositionen im Fahrzeug einzunehmen. Klassisch muss das Fahrzeug vom Fahrer gesteuert werden. Dafür sind definierte, mechanische Einrichtungen, wie z.B. Lenkrad und Pedalerie an genau beschriebenen Orten vorgesehen, die vom Fahrer bedient werden. Besteht diese Notwendigkeit nicht mehr, so können andere Tätigkeiten ausgeführt werden oder eine Ruhephase in entspannter Sitzposition erfolgen (Bild 1).

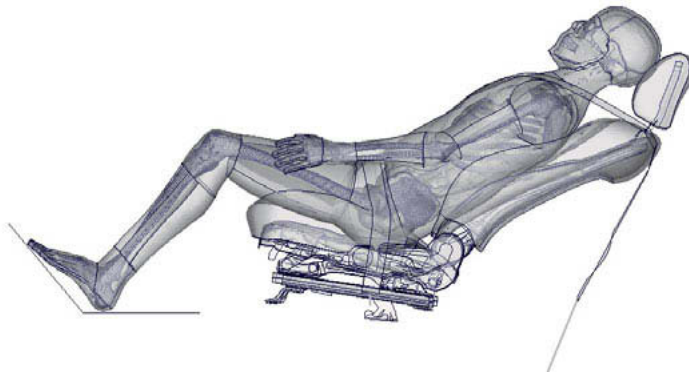


Bild 1: Entspannte Sitzposition eines Menschmodells [7].

Wie bereits in [8] gezeigt wurde, führen veränderte Körperhaltungen im Fahrzeug im Falle eines Crashes zu neuen Herausforderungen an die Rückhaltesystem des Insassen. Die Krafteinleitung in den menschlichen Körper muss auf die neuen Bewegungsrichtungen angepasst werden. Dabei werden andere Körperregionen stärker belastet als in einer aufrechten Sitzposition, die zum Steuern des Fahrzeugs notwendig ist.

Bei stark nach hinten geneigtem Oberkörper wird Submarining wahrscheinlicher, wenn keine geeigneten Gegenmaßnahmen getroffen werden. Wird Submarining jedoch erfolgreich verhindert, so liegt die Lendenwirbelsäule im direkten Lastpfad der Krafteinleitung in den Körper. Das Becken kann sich an der Sitzstruktur abstützen und im Gegensatz zu einer aufrechten Sitzposition wird der Oberkörper nicht vom Thoraxgurt zurückgehalten, sondern er taucht unter diesem durch und übt mit seiner Masse von  $m_{Thorax\_H350} \approx 43\text{kg}$  eine direkte Belastung auf die Lendenwirbelsäule aus. Die so auftretenden Momente und Kräfte in Längsrichtung der

Wirbelsäule können zu Brüchen der Wirbelkörper und Verletzungen der Bandscheiben und Bändern führen.

Vorausgegangene Untersuchungen haben gezeigt, dass besonders die Stellung der Wirbelkörper zueinander zu stark veränderten Kinematiken des Oberkörpers und der auftretenden Belastungen führen kann.

Diese Studie untersucht den Einfluss der Wirbelsäulenkrümmung in verschiedenen Sitzpositionen des Insassen im Fahrzeug auf die Höhe der Lendenwirbelsäulenbelastung.

Die normalerweise eingesetzten (Hybrid) Dummies bieten sich hierfür nicht an, da sie zwar in Hardwaretests eingesetzt werden, jedoch eine starke Abstrahierung der menschlichen Wirbelsäule aufweisen und keine stark zurückgeneigten Positionen einnehmen können. Ihr Einsatz beschränkt sich auf möglichst zerstörungsfreie Messung von Belastungen während eines Fahrzeugcrashes. Dabei stehen Messgenauigkeit und Wiederholbarkeit an vorderster Stelle, weniger jedoch die möglichst biofidele Bild der menschlichen Beweglichkeit.

In dieser Untersuchung wird das numerische FE-Modell eines realen Menschen verwendet. Die aufgeführten Simulationen werden mit einem THUMS v4.02 mit dem Solver LS-Dyna durchgeführt.

## **2. Verletzungen der Lendenwirbelsäule durch axiale Kompression und Biegung**

Die Fahrzeugsicherheit berücksichtigt in der Gesetzgebung, sowie in den Verbraucherschutztests nur die Bewertung der Halswirbelsäule. Mit dem NIJ wird ein Kriterium zur Bewertung der Belastungsschwere der Halswirbelsäule definiert [2]. Der weitere Verlauf der Wirbelsäule findet keine Beachtung in der Bewertung.

In herkömmlicher Sitzpositionen wird der Körper des Insassen im Frontalaufprall durch den Dreipunktgurt gleichmäßig abgestützt. Der Beckengurt hält die Beckenkämme zurück und der Thoraxgurt ermöglicht eine definierte Vorverlagerung des Oberkörpers. Der Kopf kann jedoch weit nach vorne pendeln, bevor er vom Airbag abgestützt wird. Die dabei entstehenden Zug- und Druckkräfte, sowie Extensions- und Flexionsmoment werden vom Nackenkriterium bewertet.

Verletzungen der Thoraxwirbelsäule durch Kraftfahrzeugunfälle sind unterrepräsentiert, können sich allerdings auch in axialer Kompression (Bild 2) durch den Schultergurt zeigen, wobei es in der Brust- und Lendenwirbelsäule zu Keilfrakturen kommen kann [4].

Vertikale Belastungen der Lendenwirbelsäule durch Kompression treten in der aufrechten Sitzposition weniger stark auf. Die axiale Belastung in Richtung der Wirbelsäule kommt erst zum Tragen, wenn das Fahrzeug z.B. die Fahrbahn verlässt und starke Beschleunigungen in z-

Richtung auftreten oder die Wirbelsäule des Insassen durch eine zurückgelehnte Körperhaltung in Verzögerungsrichtung einer Kollision gedreht wird.

Dementsprechend treten solche Belastungen in der Luftfahrt häufiger auf. Genannt sei hier das missglückte Landemanöver eines Hubschraubers oder die Rettung eines Jetpiloten mit dem Schleudersitz aus dessen Kanzel.

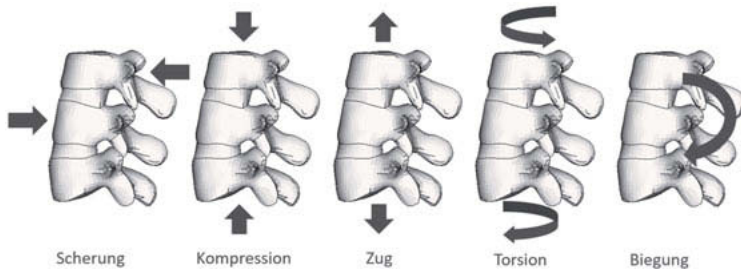


Bild 2: Belastungen der Wirbelsäule

Eine Untersuchung von 108 nicht tödlichen Rettungsausstiegen mit dem Schleudersitz hat gezeigt, dass 52% aller Piloten Wirbelsäulenverletzungen davontrugen, wobei es in 34% der Fälle zu Wirbelsäulenfrakturen gekommen ist. Neben flugzeugrelevanten Randbedingungen haben personenbezogene Eigenschaften, wie z.B. Größe, Gewicht und Alter einen Einfluss auf die Verletzungswahrscheinlichkeit und -schwere. Darüber hinaus wird genannt, dass die Haltung der Wirbelsäule zum Zeitpunkt des Ausstieges über die Verletzungsschwere der Wirbelsäule entscheidet [3].

Der Grenzwert für die axiale Kompression der Wirbelsäule bis zur Fraktur kann aus offensichtlichen Gründen mit Freiwilligenversuchen nicht ermittelt werden. Stattdessen werden „Komponententests“ mit funktionalen Einheiten aus mehreren Wirbelkörpern und Bandscheiben in dynamischen Stauchversuchen durchgeführt [4]. Kompressionsfrakturen können schon bei ca.  $F_z = 2\text{ kN}$  bis  $F_z = 6\text{ kN}$  auftreten. Die in der Luftfahrt geltende maximale Kompression der Lendenwirbelsäule ist auf  $F_z = 6.672\text{ kN}$  festgelegt. Darüber hinaus darf der Insasse keiner nach unten wirkender Beschleunigung von  $a_{100\text{ms}} = 40g$  ausgesetzt werden. Dadurch sollen Verletzungen der inneren Organe vermieden werden, da in dieser Lastichtung keine Abstützung durch das knöcherne Skelett erfolgen kann.

In [5] wird gezeigt, dass neben der axialen Last auf die Wirbelsäule zudem das wirkende Biegemoment einen Einfluss auf eine mögliche Wirbelfraktur hat. Auch hier erfolgt die Bewertung

mit funktionalen Einheiten mehrerer Wirbelkörper und Bandscheiben im Verbund. Dabei zeigt sich, dass bei einer axialen Kompression von  $F_{z1} = 5.009kN$  und einem Biegemoment von  $M_{y1} = 237Nm$  eine Fraktur auftreten kann, aber auch bei einer erhöhten Kraft von  $F_{z2} = 5.911kN$  bei gleichermaßen reduziertem Biegemoment  $M_{y2} = 165Nm$ .

Andere Untersuchungen nennen zum Teil höhere, kritische Axialkräfte, treffen jedoch keine Aussagen über die Wirbelsäulen Biegung während der Versuche. Auch ist zu beachten, dass die ermittelten Kräfte und Momente bei Fraktur an Wirbelsäulen älterer Personen von 61 und 66 Jahren ermittelt wurden.

### **3. Einfluss unterschiedlicher Wirbelsäulenkrümmungen auf die Lendenwirbelsäulenbelastung**

Die initiale Lage des FE Menschmodells muss für Insassenschutzsimulationen stets in die richtige Position entsprechend der Innenraumgeometrie und des verwendeten Fahrzeugsitzes gebracht werden. Die Positionierung, das Einsitzen, sowie Angurten erfolgt nach streng definierten Vorgaben für die jeweiligen Lastfälle, welche es zu untersuchen gilt. Unabhängig der Zielposition können so unterschiedliche Positionierungsmethoden gewählt werden. Vereinfacht können diese unterschieden werden nach:

- ➔ Zwangsführung durch Schubelemente oder Zugfedern
- ➔ Gelenkbewegung durch Aktuatoren
- ➔ „Echtzeit“ Repositionierung mittels analytischen Ansatzes

Die numerische Positionierung kann bei einem Dummy mit allen drei Varianten ohne Nachteile erfolgen. Für gewöhnlich werden dort in der Vorsimulation Gelenkbewegungen auf das Dummymodell aufgeprägt. Ein FE-Menschmodell hingegen muss auf andere Weise positioniert werden, da die menschlichen Gelenke nicht durch einfache, technische Verbindungen ersetzt werden können. Oft entsteht die Kinematik einer Extremität aus der Überlagerung von mehreren komplexen kinematischen Beziehungen. Daher findet hier die Positionierung normalerweise mit Hilfe von Schubelementen oder Zugfedern statt.

Wird nun das FE-Menschmodell für eine zurückgelehnte Sitzposition in den Fahrzeugsitz gezogen, werden die Hauptkörperregionen bewegt, wobei angrenzende Körperbereiche entsprechend der im Modell erreichten Biofidelität nachfolgen. Problematisch dabei sind besonders die inneren Organe, sowie der gesamte Wirbelsäulenverlauf. Ohne dass die Körperhaltung signifikant unterschiedlich ist, besteht die Möglichkeit das FE-Menschmodell mit unterschiedlicher Wirbelsäulenkrümmung zu positionieren (Bild 3).

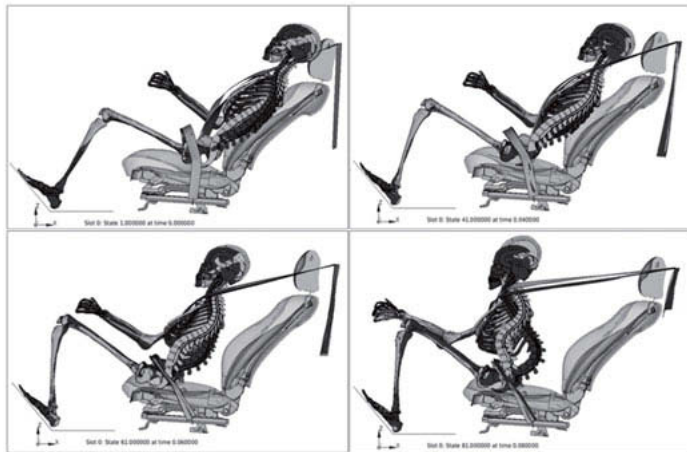


Bild 3: Vergleich der Wirbelsäulenkrümmung in identischer Sitzhaltung

Die Bewertung der Lendenwirbelbelastung im Frontalaufprall zeigt, dass es je nach Stellung der einzelnen Wirbelkörper zueinander zu zum Teil erheblich erhöhten Kompressionskräften kommt (Bild 4). Im genannten Beispiel ist die Axialkraft am 4. Lendenwirbel 35% höher, wenn eine lordotische Wirbelsäulenkrümmung vorliegt. Die Belastung liegt dann bereits im Bereich von möglichen Wirbelfrakturen.

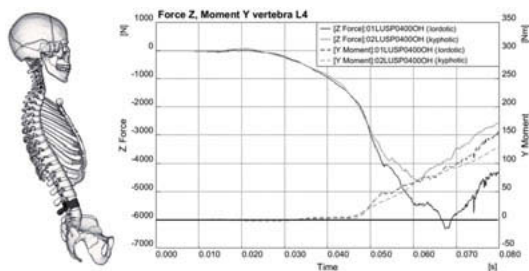


Bild 4: Wirbelsäulenbelastung im Frontalaufprall



#### 4. Ermittlung der Wirbelsäulenkrümmung in unterschiedlichen Sitzpositionen

Ziel der Datenerhebung ist, für die Simulation von FE-Menschmodellen im Frontalaufprall realitätsnahe Wirbelsäulenkrümmungen zu erhalten. Dabei werden 25 unterschiedliche Probanden in jeweils drei definierten Sitzpositionen vermessen werden. Diese Datenbasis soll das Wissen über den korrekten Wirbelsäulenverlauf für möglichst viele Sitzpositionen ermöglichen. Zur Bestimmung des Wirbelsäulenverlaufs in den Sitzpositionen stehen unterschiedliche Messmethoden zur Verfügung. Radiologische Verfahren bieten die Möglichkeit von genauer Bilderzeugung der Wirbelsäule am lebenden Menschen, jedoch wird in dieser Studie auf eine Strahlenbelastung der Probanden verzichtet.

Eine strahlenfreie Ermittlung des Verlaufs ist nur durch Abtasten der Wirbelsäule möglich. Dazu eignet sich z.B. die Spinal Mouse der Firma IDIAG. In [6] wird die Tauglichkeit des Verfahrens dargestellt. In einer Voruntersuchung wird die Nutzbarkeit abschließend überprüft. Mit Hilfe eines 3D-Scans des Rückens eines Probanden mit der Wirbelsäulenlänge des numerischen THUMS v4 wird die erreichte Datenqualität bewertet (Bild 5).



Bild 5: Vergleich der Wirbelsäulenkrümmung in identischer Sitzhaltung

Die Überlagerung des Oberflächenscans und der – mit Hilfe der Spinal Mouse ermittelten Wirbelsäulenkrümmung - positionierten Wirbelsäule des THUMS v4 zeigt eine hohe Übereinstimmung. Eine minimale Überschneidung eines Dornfortsatzes mit der Hülle des 3D-Scans ist zu erkennen, jedoch kann dies vernachlässigt werden.

Die Datenerhebung mit 25 Probanden in zwei Sitzpositionen und einer Liegeposition findet an drei aufeinander folgenden Tagen statt. Damit die Daten konsistent bleiben, werden die Daten ausschließlich von einer einzelnen, geschulten Person erhoben. So ist sichergestellt, dass der Fehler durch Messungenauigkeiten minimal ist [6]. Jede Messung wird durch zwei Wiederholmessungen ergänzt, ohne dass sich der Proband bewegt. Ein Vergleich der Messungen zeigt, dass die Wiederholmessungen um maximal 3% voneinander abweichen.

Ein Standard Fahrzeugsitz findet keine Verwendung, da im Bereich der Wirbelsäule ein schmaler Spalt von 10cm vorhanden sein muss, in welchem die Spinal Mouse geführt werden kann. Zum Einsatz kommt ein möglichst frei einstellbarer Ersatzsitz, der so konstruiert ist, dass sowohl aufrechte als auch entspannte Sitzpositionen, bis hin zu Liegepositionen eingenommen werden können (Bild 6).



Bild 6: frei einstellbarer Ersatzsitz

Neben der reinen Wirbelsäulenvermessung werden anonymisierte, personenbezogene Daten erhoben. Gewicht, Größe, Alter und Konstitution werden ebenso aufgenommen, wie 12 weitere Körpermaße, die im Zusammenhang mit der Wirbelsäulenkrümmung relevant sind.

Die aufrechte Sitzposition orientiert sich an der Standardsitzposition für Fahrzeug Crashtests. Dabei hat die Rückenlehne einen Winkel von  $\alpha_{Lehne} = 23^\circ$  zur Vertikalen  $\alpha_{Sitzfläche} = 14^\circ$  zur Horizontalen. Die Unterschenkelaufgabe ist aus dem Kontaktbereich gedreht, da sie hier keine Verwendung findet. Für die entspannte Sitzposition wird ein Lehnen- und Unterschenkelaufgabenwinkel von  $\alpha_{Lehne} = 60^\circ$  gewählt.

Die Sitzfläche wird auf  $\alpha_{Sitzfläche} = 16^\circ$  zur Horizontalen justiert. Zusätzlich zu den zwei Sitzpositionen wird der Verlauf der Wirbelsäule in einer komplett flach liegenden Position ermittelt. Dafür sind alle Kontaktflächen horizontal eingestellt.

## 5. Auswertung der erhobenen Daten

Insgesamt sind Körpergrößen von  $l_{\min} = 1,64$  m bis  $l_{\max} = 1,91$  m vertreten. Der Durchschnitt entspricht der deutschen Durchschnittskörperlänge und beträgt  $l_{\varnothing\text{Untersuchung}} = 1,80$  m. Für die Auswertung der Daten werden die Ergebnisse in drei Körperlängengruppen aufgeteilt. Mit einer Gruppengröße von acht bzw. neun Personen wird eine Körpergröße von bis zu  $l_{\max1} = 1,78$  m als „klein“ bezeichnet, zwischen  $l_{\min2} = 1,79$  m und  $l_{\max2} = 1,84$  m als „durchschnittlich“ und ab einer Körpergröße von  $l_{\min3} = 1,85$  m als „groß“.

Bild 7 zeigt den Mittelwert der drei Messungen für jeden segmentalen Winkel von T1 bis zum Sakrum für die drei Personengruppen in aufrechter Sitzposition. Auffällig ist hier, dass der Lendenwirbelbereich der Gruppe „klein“ kyphotisch verläuft und nicht lordotisch wie bei größeren Personen.

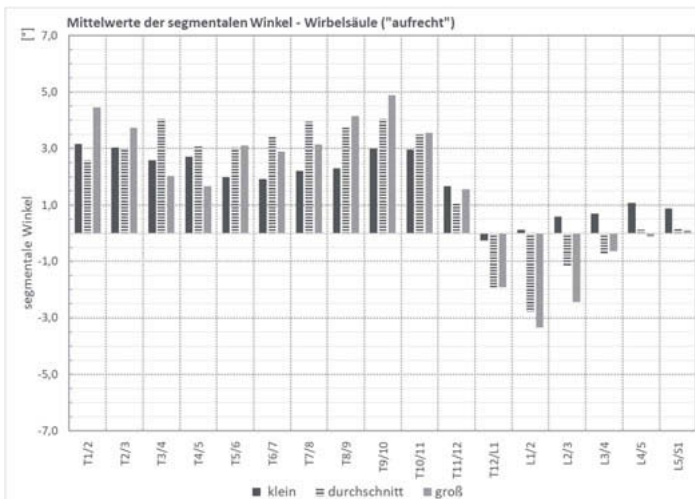


Bild 7: Segmentale Winkel aufrecht sitzend

Die Thoraxwirbelsäule hingegen weist weniger Flexibilität auf, was durch das verankerte Rip-pengerüst zu erklären ist [11]. Die segmentalen Winkel verändern sich nur in einem kleinen Bereich zueinander. Und bleiben auch über die unterschiedlichen Sitzpositionen nahezu konstant.

Bild 8 zeigt die Mittelwerte der segmentalen Winkel in entspannter Sitzposition. Zu erkennen ist, dass die Positionsänderung des Oberkörpers im Bereich der Lendenwirbelsäule geschieht. Auch hier ist der Verlauf der Thoraxwirbelsäule wenig flexibel. In der Gruppe der kleinen Personen ist nun im unteren Lendenwirbelbereich (L4 bis Sakrum) eine lordotische Haltung zu erkennen. Die Gruppe der großen Personen hat nun einen fast geraden Lendenwirbelbereich.

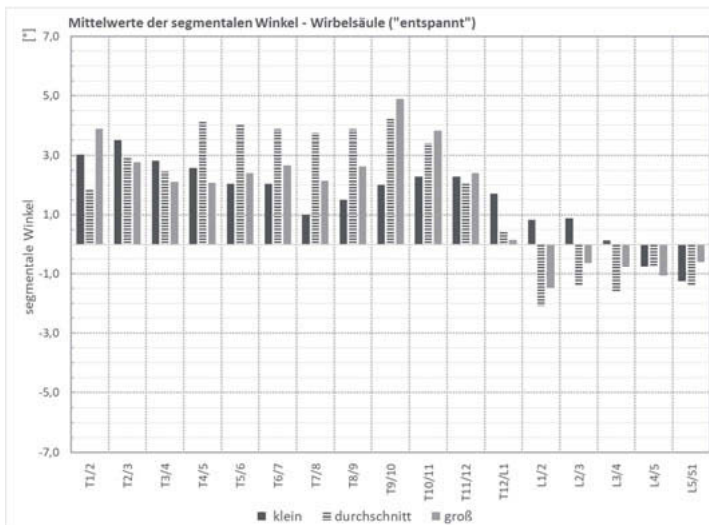


Bild 8: Segmentale Winkel entspannt sitzend

Bild 9 zeigt den Wirbelsäulenverlauf aller Probanden in flach liegender Position. Hier führt der stark veränderte Beckenwinkel bei allen Testsubjekten zu einer stark lordotisch ausgeprägten Lendenwirbelsäule. Besonders die Oberschenkellage führt zu einem weit nach vorn gekippten Becken und somit zu einer starken Extension des Lendenwirbelsäulenbereichs.

Das zeigt, dass für eine genaue Bewertung der Wirbelsäulenbelastung eine „korrekte“ Positionierung des Menschmodells samt einzelner Wirbelkörperstellungen zueinander notwendig ist.

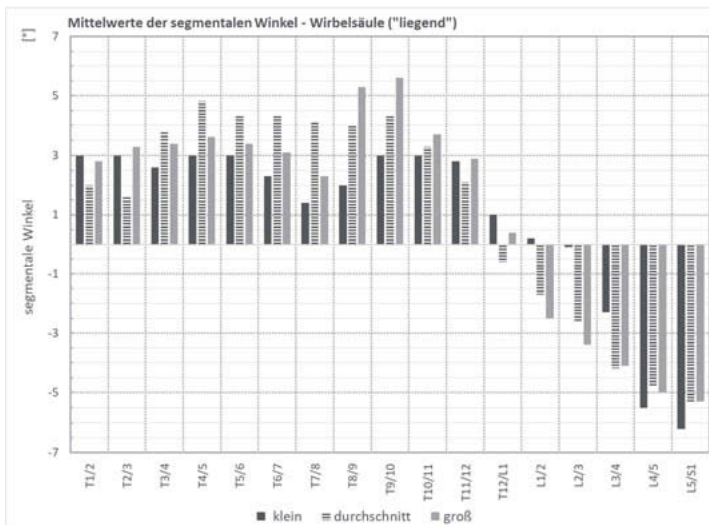


Bild 9: Segmentale Winkel flach liegend

## 6. Auswirkung von fehlerhaften Wirbelkörperstellungen im Frontcrash

Die Positionierung des FE-Menschmodells, ohne Beachtung des richtigen Wirbelsäulenverlaufs führt zu veränderten Wirbelsäulenbelastungen. Dies kann entweder die Notwendigkeit von Maßnahmen bezüglich des Insassenschutzes nicht erfassen oder einen unnötig erhöhten Aufwand zur Reduktion der Belastungswerte bedeuten.

Der Vergleich einer mit den Daten der Spinal Mouse artikulierten Wirbelsäulenkrümmung und einer reinen Oberkörperpositionierung, ohne Kontrolle der Stellung der einzelnen Wirbelkörper zueinander, gibt Aufschluss darüber, inwieweit die Lendenwirbelsäulenbelastungen von beiden Positionierungsmethoden abweichen.

Der betrachtete Lastfall ist ein generischer Frontalaufprall mit generischem Fahrzeugsitz und Rückhaltesystem nach Stand der Technik. Submarining wird in jedem Fall verhindert, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicher zu stellen.

An dieser Stelle wird exemplarisch ein gemessener Wirbelsäulenverlauf eines Probanden, mit der des THUMS v4 entsprechenden Wirbelsäulenlänge, mit einer nicht kontrollierten Wirbelsäulenkrümmung verglichen (Bild 10). Die hellere Kontur entspricht dabei der Probandenver-

messung in entsprechender Position. Die dunklere Kontur folgt aus der reinen Oberkörperpositionierung des THUMS v4 ohne spezielle Einstellung der einzelnen Wirbelkörper zueinander in herkömmlicher Positionierung.

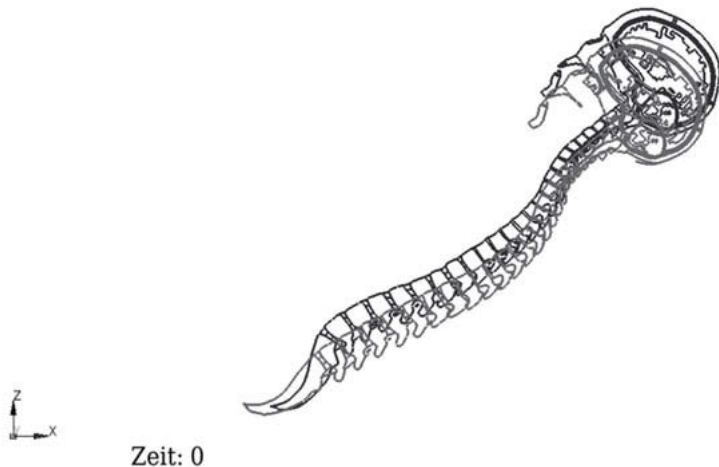


Bild 10: Vergleich der Wirbelsäulenkrümmung

In Bild 11 ist deutlich zu erkennen, dass die Lendenwirbelbelastung in realistischer Positionierung der Wirbelkörper zueinander gut 30% niedriger ist. Die lordotische Lendenwirbelkrümmung in herkömmlicher Positionierung führt zu einer Kinematik, die sich auch in der Biegebelastung widerspiegelt (Bild 12). Der Vorzeichenwechsel des Moments der unteren Lendenwirbel in herkömmlicher Positionierung zeigt die entgegengesetzte Bewegung der Lendenwirbelsäule. In der nach Probandendaten positionierten Wirbelsäule ist stets ein positives Moment auf geringerem Niveau zu beobachten und knickt nicht so stark aus wie die herkömmlich positionierte Wirbelsäule.

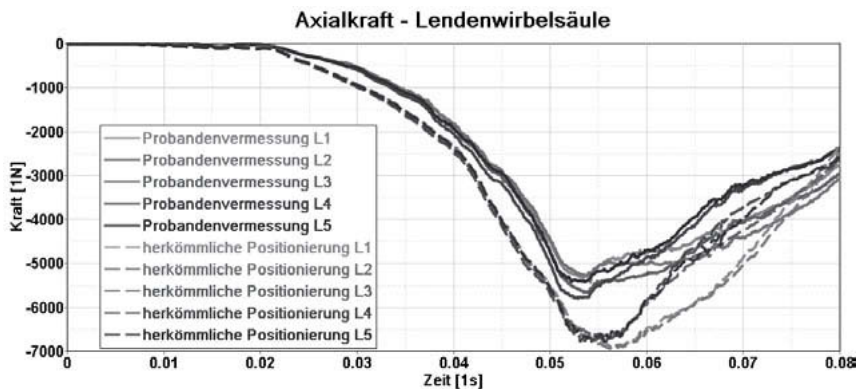


Bild 11: Lendenwirbelbelastung – Kraft

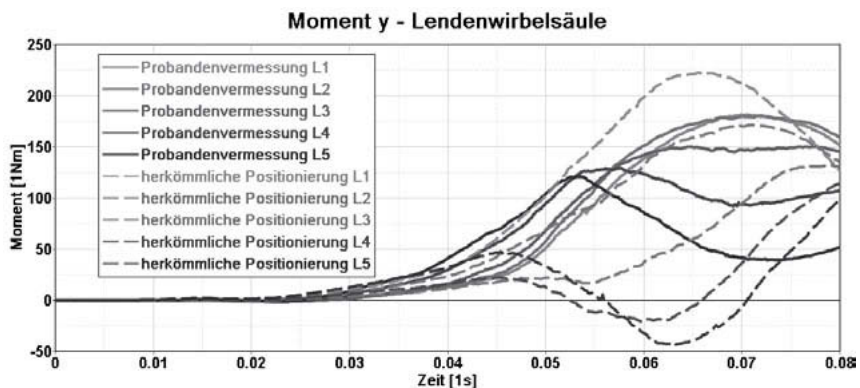


Bild 12: Lendenwirbelbelastung - Moment

Insgesamt werden in den für diese Studie gerechneten Simulationen mit identischen Randbedingungen mit einem korrekten Wirbelsäulenverlauf geringere Belastungen erreicht. Nach herkömmlicher Positionierung ohne genaue Einstellung der Wirbelkörper zueinander, werden die in Kapitel 2 beschriebenen, kritischen Werte überschritten.



## 7. Fazit und Ausblick

Numerische Menschmodelle bieten für den Insassenschutz die Möglichkeit die Sicherheit von mitfahrenden Personen in automatisierten Fahrzeugen zu überprüfen und zu steigern. Dabei sind vor allem nicht herkömmliche Sitz- und Liegepositionen zentrale Entwicklungsfelder.

Ereignet sich ein Frontalunfall während sich der Insasse in einer entspannten, zurückgeneigten Sitzposition befindet, entstehen andere Lastpfade im Vergleich zur aufrechten Sitzposition. Die Kräfte werden primär in axialer Richtung in die Wirbelsäule eingeleitet. Besonders belastet ist dabei der Lendenwirbelbereich. Die hier wirkenden Kräfte und Momente übersteigen zum Teil deutlich die Belastungsfähigkeit und es kann zu Frakturen der Wirbelkörper kommen.

Diese Studie hat gezeigt, dass im numerischen Positionierungs- und Einsitzprozess schon geringe Abweichungen der einzelnen Wirbelkörperstellungen zueinander zu erhöhten Belastungswerten führen können. Die reale Wirbelsäulenkrümmung für die einzelnen Sitz- und Liegepositionen ist mit der initialen Geometrie der Menschmodelle nicht zu erreichen. Erst die Übertragung der natürlichen Haltung im Sitz auf das numerische Menschmodell führt zu bewertbaren Ergebnissen und zu sinnvollen Maßnahmen im Insassenschutz.

In dieser Studie wurde die strahlenfreie Vermessung der Wirbelsäule am lebenden Menschen in verschiedene Sitz- und Liegepositionen bewertet. Die daraus gewonnenen Daten ermöglichen eine biomechanisch korrekte Positionierung des Menschmodells, wodurch gezielte Maßnahmen zur Erhöhung des Insassenschutzes getroffen werden können.

Da die Zahl der Probanden zu diesem Zeitpunkt zu gering ist, um eine statistische Bewertung durchzuführen, wird die Datenbank fortlaufend erweitert, um eine repräsentative Stichprobe zu erhalten. Mit dieser Grundlage können immer neue und vor allem auch individuelle Sitzpositionen eingestellt und bewertet werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Biomechanics of Human Thoracolumbar Spinal Column Trauma from Vertical Impact Loading. Yoganandan, Narayan, et al. s.l. : Association for the Advancement of Automotive Medicine, 2013, S. 155-166.
- [2] EuroNCAP. Assessment Protocol – Adult Occupant Protection. 2015.
- [3] Pipping, T., Verletzungen der Wirbelsäule bei nicht tödlichen Rettungsausstiegen mit dem Schleudersitz, Flug- und Reisemedizin 2015, 20-25.
- [4] Schmitt, Kai-Uwe, et al. Trauma-Biomechanik. Zürich: Springer Vieweg, 2014. Bd. 2. Auflage.
- [5] 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] A new skin-surface device for measuring the curvature and global and segmental ranges of motion of the spine: reliability of measurements and comparison with data reviewed from the literature. Mannion, Anne F., et al. Zürich, Switzerland: Springer Verlag, 2003.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [10] Reed, Matthew P. Matthew P. Reed, Ph.D. Update: 2018-10. [Online] The University of Michigan, 2019. [Zitat vom: 15. 03 2019.] <http://mreed.umtri.umich.edu/mreed/>.
- [11] S. Schulz, Messung von Form und Beweglichkeit der Wirbelsäule: Validierung der "Rückenmaus" durch Vergleich mit Röntgen-Funktionsaufnahmen, München: Medizinische Fakultät der Ludwig-Maximilian-Universität München, 1999.

## Analysis of motorway accidents involving cars with regard to the safety potential of automated driving functions

Dr.-Ing. **Matthias Kühn, Jenö Bende**,  
German Insurers Accident Research, Berlin

### Abstract

In the coming years systems will become available that will be able to drive in automated mode for certain periods of time in a certain domain (e.g. motorway). This is referred to as conditional automation (Level 3) and high automation (Level 4). What we can say today is that vehicles with different levels of automation will be sharing the roads with today's assist-driven vehicles in the foreseeable future.

The German Insurers Accident Research has carried out a comprehensive study on motorway accidents involving cars. The aim of the study was to determine the safety potential of driver assistance and comfort systems (DACS) of today's modern cars and, based on these benefits, to assess the additionally achievable safety potential of future automated driving functions.

The own accident database (referred to as the UDB) was used for the study. The UDB contains a representative cross-section of all third-party vehicle claim files of the insurers involving personal injury and at least € 15,000 total claim value. The analyzed pool of motorway accidents involving a car contains only accidents which occurred between 2007 and 2013. From this pool, the safety potential was determined from the view of the car that was main responsible for the accident.

The study reveals a big positive safety benefit for DACS and a smaller additional benefit for automated driving functions. Related to all motorway accidents involving a car, for instance, a safety potential of 21% avoidable accidents could be determined for today's DACS. For these systems, it can already be anticipated that the frequency of rear-end accidents will decrease. Compared to DACS, the additional benefit of Level 3 function was found to be only 5%. With a Level 4 system which requires no driver action at all during the automated ride, another 18% of all motorway accidents involving a car were considered as avoidable.

But next to the positive numbers the study also shows that a Level 3 automated driving function will not be capable of handling all critical traffic situations properly in the near future. Lane-change situations will still be a particular challenge for these systems. Also, it can be stated that the driver is the most critical part up to Level 4 automated driving. Starting with Level 4 this uncertainty will be nearly eliminated. A significant change in the accident situation can be expected only from systems with a very high level of automation (Level 4+) which exclude the driver from the driving task completely.

The approach used in the study is based on limited knowledge available today on automated driving and its overall impact on traffic. Negative effects have to be expected, e.g. take over requests, mixed traffic. These effects decrease the achievable safety potential of these systems but they could not be quantified within this study.

## 1. Introduction

Automated driving is regarded as the future of mobility. It is expected to make traffic flow more efficiently and reduce the number of road accident victims as well as emissions and traffic jams. This will be more of a multi-dimensional, gradual transition than a rapid change. The new technology will be available in both cars and commercial vehicles. Currently, these vehicles offer either Level 2 (partial) or, in the near future, Level 3 (conditional) driving automation, which is typically active only on motorways [1]. As the development of the technology continues, vehicles with higher levels of automation that are also suitable for use in other situations, not just on motorways, will gradually become available. The situation is somewhat different with parking functions. Here, development may proceed more quickly toward highly automated functions. What we can say today is that vehicles with different levels of automation will be sharing the roads with manually driven vehicles in the foreseeable future. This development will affect both cars and commercial vehicles.

## 2. German Insurers Accident Database

The accident database of the German Insurers Accident Research (referred to as the UDB) is a database that was set up for accident research purposes. The data collected is conditioned for interdisciplinary purposes for the fields of vehicle safety, transport infrastructure and traffic behavior. The contents of the claim files from the insurers form the basis of the UDB. Only third-party vehicle claims involving personal injury and at least € 15,000 damage costs have been taken into account for the GDV accident database. Cases involving only damage to property and less serious accidents involving personal injury (damage costs < € 15,000) are not included in the UDB.

The data sample used in this analysis consists of a total of 3,029 accidents that occurred between the years 2007 and 2013 and involved at least one passenger car. A total of 4,845 cars excluding vans were involved in these accidents. Motorway accidents make up 11% (n=346 relevant cases with n=709 involved cars) of these accidents. All types of traffic involvement were taken into account as the collision parties for the car (cars, trucks, buses, motorcycles, bicycles and pedestrians) as well as single car accidents. Single car accidents are, however, underrepresented, as cases in which there is no injury or damage to a third party are not brought to the attention of GDV.

## 3. Motorway accidents involving cars in the UDB

The n=346 motorway accidents in the UDB were broken down in:

- accidents where a car was responsible for the crash (which make up 25% of all involved cars)
- accidents where at least one car was involved but not responsible for the crash (which make up 75% of all involved cars).

Out of these 346 accidents, a total of 146 cases where the car was responsible for the crash and 244 cases where the car was not responsible for the crash have been analyzed. The fact that more than one car may be involved in an accident led to multiple counting, i.e. the same case can be counted more than once.

### Motorway accidents where the car was the main responsible

Motorway accidents can be described in different ways. The most common method is by using the parameters "Type of accident" [2] and "Kind of accident" [3]. In this study, a combina-

tion of both parameters was used first for a rough classification of the UDB accidents in scenarios and, in addition, a case-by-case analysis was performed in order to break them down in sub-scenarios. The type of first conflict between the case-car and another vehicle was the decisive factor in this matter.

Two major scenarios were found to be predominating and these account for a total of 88% of all  $n=164$  motorway accidents caused by a car. These are:

- "rear-end accidents" (51%) and
- "lane-change accidents" (37%).

There is also a small group of "other" accidents (13%) which can't be put in patterns. These are conflicts with crossing animals, for instance, or rear-end collisions where the case-car was hit from behind after a lane-change. Since the vehicle coming from behind was very fast and/or far away at time of lane-change of the case-car, these accidents were not assorted to the group of lane-change accidents.

Rear-end accidents are characterized by the fact that the case-car is involved in one or multiple collisions after a conflict with a moving or stationary vehicle in front of it in the same lane. In most of the cases the driver of the case-car oversaw the vehicle ahead or failed reacting properly when approaching it.

Lane-change accidents are characterized by the fact that the case-car is involved in one or multiple collisions after having left either intentionally (lane-change in order to avoid a rear-end collision with the vehicle ahead) or unintentionally (e.g. due to driver distraction, fatigue) its own driving lane.

A closer look at the sub-scenarios shows that:

- Unintentional lane-changes of the case-car represent the most frequent sub-scenario and account for one third of all motorway accidents caused by a car.
- Rear-end conflicts with a stationary vehicle, as typical for congestion related situations, are the second most frequent sub-scenario and make up 31% of all motorway accidents caused by a car.

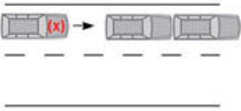
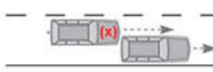
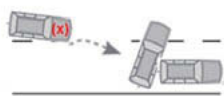
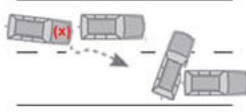

Motorway accidents that were caused by a car (n=164)			
Accident scenarios from the view of the car that was responsible for the accident (x)		n=164	100%
<b>Rear-end</b>		83	51
	Conflict between the case-car and a stationary vehicle in front in the same lane	51	31
	Conflict between the case-car and a vehicle moving ahead in the same lane	32	20
<b>Lane change</b>		60	37
	Conflict between case-car and another vehicle in the same or another lane caused by an <u>unintentional</u> lane change of the case-car	54	33
	Conflict between case-car and another vehicle caused by an <u>intentional</u> lane change of the case-car due to a vehicle in the same lane	6	4
<b>Others</b>		21	13
	Other conflicts (e.g. lane change of the case-car due to another lane changing vehicle or case-car being hit by a vehicle from the adjacent lane)	21	14

Fig. 1: Scenarios and sub-scenarios for motorway accidents that were caused by a car

### Motorway accidents where the car was involved but not responsible

Accidents where a car was involved but not responsible for the crash form the second main pool of accidents. This pool contains a total of 244 case-cars and it makes up the larger proportion within all motorway accidents involving a car in the UDB (n=346). A short overview of the main and sub-scenarios (Fig. 2) reveals a similar picture to that observed for accidents where a car was responsible for the accident. Rear-end-collisions have the highest share, accounting for 51% of the cases. These are followed by lane-change accidents with a share of 41%.

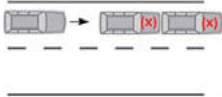
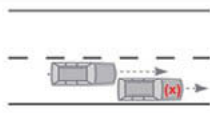
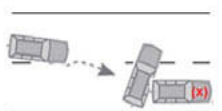
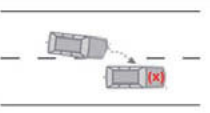
Motorway accidents that were not caused by a car (n=244)		
Accident scenarios from the view of the cars that were involved but not responsible for the accident (x)	n=244	100%
Rear-end		
	Another vehicle hits the rear-end of the case-car which itself is standing in the traffic in the same lane	79 32
	Another vehicle hits the rear-end of the case-car which itself is moving ahead in the same lane	46 19
Lane change		
	Another vehicle collides after a lane-change with the case-car -various types of collision are possible in this sub-scenario	99 41
Others		
	Other types of conflict - e.g. case-car is hit laterally by a vehicle using the adjacent lane	20 8

Fig. 2: Scenarios and sub-scenarios for motorway accidents that were not caused by a car

4. Categorizing and distinguishing between modern assistance and automated functions

The discussion around automated driving requires a clear understanding of the attributes and capabilities of the functions involved. Driving can be subdivided into navigation, vehicle control and stabilization tasks [4]. According to this model, the navigation level is about route planning, the vehicle control level involves the driver comparing the goal with the current situation (i.e. dynamic driving), and the stabilization level is about controlling deviations in a closed loop system.

Assistance and automation functions operate on the vehicle control level. There are three different modes of action here [5]: informative and warning functions, continuously automat-



ing functions and temporarily intervening systems (see table 1). This approach has the advantage that a distinction can be drawn between advanced driver assistance systems and automated driving functions. Even among advanced driver assistance systems, there are differences that are clearly based on their mode of action. Mode of action B describes the levels of automation under discussion (see table 2). Level 1 covers only advanced driver assistance systems that handle longitudinal and lateral control. These are the proximity control system and the lane-keeping assist system. The lane-departure warning system, on the other hand, comes under mode of action A/2.

Table 1: Assistance and automation functions on the vehicle control level [4]

<b>Mode of action A</b> <b>Informative and warning functions</b>	<b>Mode of action B</b> <b>Function offering continuous automation</b>	<b>Mode of action C</b> <b>Systems that intervene temporarily in accident-prone situations</b>
Take effect exclusively and "indirectly" through the driver: 1. Status information, e.g. traffic-sign recognition 2. Abstract warning e.g. lane-departure warning system 3. Concrete warning e.g. - Blind-spot detection system or - Collision warning system	Have a direct effect on vehicle control, can always be overridden Definition according to SAE J3016 [1] or VDA/BSAsT [6]	Preventive machine intervention with a negative situation forecast, e.g. - Emergency brake assist system - Emergency steering assist system

Table 2: Levels of automation in accordance with SAE J3016 and VDA/BAST [1,6]

Nomenclature	Driving tasks of the driver by level of automation
Full automation level 5	The system takes full control of driving on all road types and in all speed ranges and environmental conditions.
High automation level 4	The system takes over full lateral and longitudinal control in a defined application.
Conditional automation level 3	The system takes over lateral and longitudinal control for a certain period in specific situations.
Partial automation level 2	The system takes over lateral and longitudinal control (for a certain period and/or in specific situations).
Driver assistance level 1	The driver has constant lateral or longitudinal control. The other driving task is handled by the system within certain limits (e.g. adaptive cruise control (ACC) system, lane-keeping assist system).
No automation level 0	The driver drives constantly (for the whole journey) with both longitudinal control (acceleration and breaking) and lateral control (steering).

## 5. Method description

An overview of the analysis method and some specifications related to the automated driving systems will be given in the following.

For each motorway accident case in the UDB, the car that caused the accident was defined as the case-car. In a case-by-case analysis, the safety potential was estimated for driver assistance and comfort systems (DACS) and two levels of automated driving. The cases were analyzed using the "What would happen if..." method. The prerequisite for this is the assumption that none of the analyzed case-cars involved was using an automated function or any DACS at that time. This approach considers the course of the accident as it happened in reality and contrasts it with the course of the accident as it would have been with the case-car driving in automated mode or with DACS. This makes it possible to determine the influence an automated ride would have had on the course of the accident. The original driver behavior was taken into consideration, as far as it was possible. For each case it was as-

sumed that during the automated ride the driver of the case-car would have behaved in the same way as he did before the original accident.

The challenging part was to define the automated driving functions and implement them in the analyses. An attempt was made to use the knowledge on the system definitions gained from the previous chapter. However, this could not be done in that detail as described in Table 1 and Table 2. When speaking of retrospective accident analysis, a clear distinction between DACS and automation systems is almost impossible. It could not always be determined which system would have intervened first in case of an accident: DACS or the automated system. The "What would happen if..." method uses the assumption that the case-car was driving in automated mode right before the accident, but does not consider earlier traffic events that could have been influenced by the automated ride.

With this limitations and being aware of the fact that we were not exactly in line with the definitions in Table 2, three degrees of systems were defined and their boundary conditions were set. It was assumed that every case-car (and no other vehicle involved) was equipped with following driver assistance and comfort systems (DACS):

- Adaptive cruise control (ACC),
- Emergency braking assist,
- Lane keeping assist and
- Blind spot detection system.

In simple terms, these four DACS are pieces of a Level 1 and in combination a Level 2 automated driving mode. Additional two more levels were then defined by successively adding more attributes and capabilities [7,8]. These levels were Level 3 and Level 4. Table 3 gives a short description of the systems with their boundary conditions.

It has to be underlined that with this method no differentiation could be made between DACS, Level 1 and Level 2. These differences lie mostly in the Human-Machine-Interface – with the full responsibility of the driver - and not in technical details of the systems. These human based differences can also not be addressed with the tool of a retrospective accident analysis. In the following parts of this paper, the term DACS will therefore be used for this group of systems.

It was possible to distinguish between these DACS, Level 3 and Level 4. The differences in the functionalities can be basically described by the situations that can be handled by the systems (see table 3). But the most crucial difference between DACS and Level 3 was that, for DACS, the driver behavior "overwrote" the system functionality in certain situations. This was not done for a Level 3 system because, according to the definitions, the driver was not monitoring during the automated ride. Following aspects were essential when declaring no safety potential to the systems:

- System reaches its technical boundaries (see Table 3)
- System is not activated or manually switched off by the driver
- Unforeseen environmental or car related events (aquaplaning, tire blow, technical failure of the car).

The analyses did also not consider following aspects that could lead to negative effects for road safety but which are not quantified yet:

- Take-over request to the driver [9]
- Negative effects initiated by the automated ride that could lead to other accidents (e.g. fatigue) [10]
- Different driver behavior due to mixed traffic.

Table 3: Boundary conditions for the three defined levels of automation in the UDB analysis

Description of the main system properties	DACS	Level 3	Level 4
	Driver can override or switch off the system		
	maintains longitudinal and lateral drive, but no lane change	System maintains longitudinal and lateral drive (incl. lane change and overtaking maneuvers)	
		operates up to 130 kph (not considered in this analysis)	
Typical situations on motorway derived from accident analysis	System can handle these situations		
Construction sites	no	no	yes
Joining or leaving the motorway	no	no	yes
Steering mistake by driver	no	no	yes
Fatigue of the driver	no	yes	yes
Alcohol, severe physical issues of the driver	no	no	yes
Technical failure of the car	no	no	no
Extreme weather condition (strong rain)	no	no	no
Case car hit by another vehicle from behind or from the side	no	no	no

## 6. Safety potential for selected levels of automation

The safety benefits were calculated for each of the systems separately and were then put in relation to the different accident pools (see Table 4).

A modern car equipped with DACS could achieve a safety potential of 21% on motorways. This underlines the important part of driver assistance systems for road safety. As already mentioned before, with this method, this equals the safety benefit of a Level 1 and Level 2 system. That means that no additional safety benefits can be expected for Level 1 and Level 2 but negative effects might lead to less benefit at this point (see Fig. 3).

Related to all motorway accidents involving a car, an additional safety potential of +5% could be achieved by a Level 3 system. This “ad on” is small and can be explained by the fact that a Level 3 system still has to rely on the driver as a back-up when the technical boundaries of the system are reached (see also Table 3). And it has to be put in contrast to possible negative effects caused by a Level 3 system.

A nearly maximum safety potential of additional +18% can be achieved by a high automation level (Level 4), which requires no driver monitoring or driver intervention at all during the autonomous ride. Even here, possible negative effects (mixed traffic) must be considered. According to the analyses, with a Level 4 system, more than half of all motorway accidents caused by a car would still remain unavoidable, for instance.

If these benefits are put in relation to the larger accident pools, their amount will decrease. Related to all accidents involving a car in the UDB, for instance, the achievable safety potential for a Level 3 system is 0.6% and even with a Level 4 maximum 2.1% more car accidents could be avoided.

Table 4: Safety benefits for analyzed levels of automated driving functions in relation to the different accident pools

Systems			Safety benefits [%] in terms of avoidable accidents as an “ad-on” to the achievable benefits by DACS			
			Motorway accidents involving a car (n=346)	Motorway accidents caused by a car (n=164)	All accidents involving a car (n=3,029)	All accidents caused by a car (1,834)
today	DACS		21%	45%	2.0%	4.0%
tomorrow	Level 3	additional	+5%	+11%	+0.6%	+1.0%
	Level 4		+18%	+38%	+2.1%	+3.4%

For those accidents that were caused by a car on motorways, Table 5 gives a differentiated view of the achievable safety benefits for the two main accident scenarios. DACS could avoid 80% of all rear-end accidents in the case material but only 10% of the lane-change accidents. This is not surprising because it reflects what DACS in modern cars can already achieve. Today's DACS already overcome most rear-end conflict situations. But most lane-change situations are still critical for them [11].

In comparison to DACS, the additional benefit of a Level 3 system can be derived from better skills in the form of dealing with lane-change situations. In the analyzed case material, a Level 3 system could avoid only few more rear-end accidents (factor 1.1) but nearly three times more lane-change accidents than DACS (Table 5). For a Level 4 system there is almost no difference between the shares of the two scenarios. Due to the exclusion of the driver from monitoring/intervening during the automated ride, a Level 4 system will be able to overcome all types of conflicts in longitudinal traffic properly, i.e. a lane-change will be also no problem anymore for self-caused accidents.

Table 5: Achievable safety benefits for selected automation levels in the UDB broken down by the main accident scenarios

<b>Motorway accidents that were caused by a car (n=164)</b>					
Accident scenarios	n	%	avoidable accidents [%]		
			DACS	Level 3	Level 4
	164	100	35	49	91
<b>Rear-end</b>	83	51	80	87	98
<b>Lane change</b>	60	37	10	27	97

## 7. Discussion - Accidents and automated driving

One major outcome of the analyses is that there still will be accidents caused by the car during a Level 3 automated ride in the future, regardless the achievable safety benefits of the system. The main reason is that an automated ride with a Level 3 system will still need the driver in terms of intervening in the event of critical situations.

The fundamental problem in connection with constant monitoring coupled with intervention in the event of critical situations is based on a human characteristic investigated by psychologists over 100 years ago [12]. The resulting Yerkes-Dodson law describes the general relationship between a person's ability to perform well and their state of physiological and mental arousal. When a person has a low level of arousal, their performance remains at a minimum level. As the person becomes more aroused, their performance increases up to a maximum level. If arousal increases beyond that, performance starts to drop again until it reaches a similar minimum level to the level at low arousal (Fig. 3). Put simply, this means that people perform demanding tasks best with a moderate level of arousal. Driving a car is such a task. Monotonous tasks, like driving down a perfectly straight road with no traffic, can result in a low level of performance or failure. Monitoring a Level 2 system is one such task. Equally, if a driver is overtaxed, the result will be poor performance and even failure. Suddenly being requested to take over control from a Level 3 system would be an example of this.

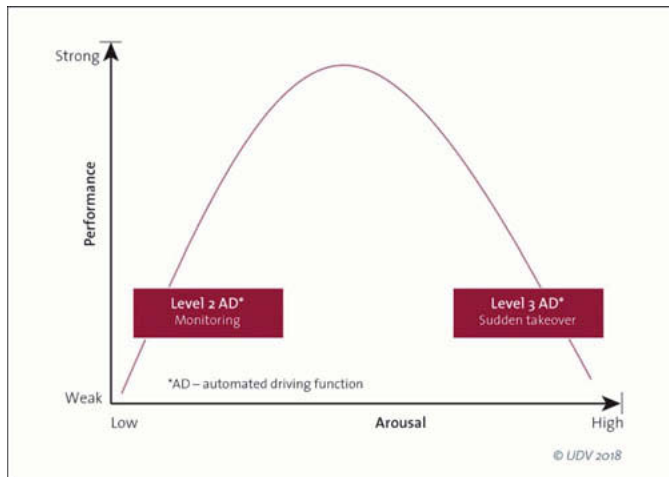


Fig. 3: Simplified representation of the Yerkes-Dodson law in connection with automated driving [12]

## 8. Conclusions

The analyses revealed that 11% of all accidents involving a car occur on motorways. For accidents that were caused by a car, safety benefits were determined based on two levels of automated driving. The most substantial benefit in terms of 21% avoidable accidents can be expected from modern assistance and comfort systems (DACS) if these consist of an emergency breaking assist, a lane-change assist, a blind spot detection system and an adaptive cruise control.

In comparison to modern cars equipped with DACS, an additional benefit of +5% could be expected for a Level 3 system in terms of avoidable accidents on motorways. Compared to the benefits of DACS, this level of automation might have a higher benefit because it will be able to avoid more lane-change accidents. Nevertheless it has to be considered that there could be negative effects on road safety caused by a Level 3 system. Up to now, these effects have not been quantified yet. But studies indicate that they should not be underestimated and that these negative effects might reduce the additional positive benefits. In total, Level 3 systems might have no additional positive effects at all.



It can be predicted that cars driving in a Level 3 automated mode will still cause accidents on motorways in the near future. And they will also be even more often involved in accidents without their own fault. The most critical part for a Level 3 in the future will still be the driver. The majority of those accidents that can not be avoided by a Level 3 system will be lane-change accidents.

Only a Level 4 system will provide a high benefit in terms of additional 18% avoidable accidents compared to a Level 3 system. This is because a Level 4 system will be able to handle almost all traffic situations properly but most importantly, the critical part "driver" will be nearly eliminated during the automated ride. Nonetheless, even with a Level 4 system, a large proportion of motorway accidents involving a car will still remain unavoidable. In this context, possible negative effects of mixed traffic are not considered here.

From the view of the German Insurers, highly automated vehicles (Level 4) could bring great benefits in terms of road safety if they functioned flawlessly under all conditions within their intended scope. Until such time as these systems come onto the market, drivers of manually controlled vehicles should benefit in terms of road safety from continual improvements in driver assistance systems.

## 9. References

- [1] SAE International: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. SAE Standard J 3016, revised version of September 2016.
- [2] Federal Statistical Office (2018): Road traffic accident statistics. Wiesbaden.
- [3] GDV: Accident type catalogue - A guide to determine the accident type. Köln, 1998.
- [4] Donges, E.: "Driver Behavior Models" in the Handbook of Driver Assistance Systems. Published by: Winner, Hakuli, Lotz, Singer, 3rd Edition. Springer Fachmedien, Wiesbaden 2015. D., Bohle, W., Maier, R., Enke, M., Pohle, M., Zimmermann, F., Ortlepp, J. and M. Schreiber. 2015.

- [5] Gasser, T.M., Frey, A. Th., Seeck, A., Auerswald, R.: "Comprehensive Definitions for Automated Driving and DACS". 25th ESV Conference, Detroit, June 5 to 9, 2017.
- [6] Verband der Deutschen Automobilindustrie VDA: Von Automatisierung von Fahrerassistenzsystemen zum Automatisiertem Fahren, VDA Magazin, Berlin 2015.
- [7] Daimler: "Drive Pilot – An automated driving system for the highway", 2019.  
<https://www.daimler.com/innovation/case/autonomous/drive-pilot.html>.
- [8] Wood at al.: "Safety first for automated driving", SaFAD White paper, July 2019.
- [9] UDV: Takeover times in highly automated driving. Compact accident research No. 57, Berlin 2017.
- [10] UDV: Tiredness and level 3 - automated driving. Compact accident research No. 70, Berlin 2017.
- [11] EuroNCAP: Test results for automated driving functions, October 19<sup>th</sup>, 2018.  
<http://www.safetywissen.com/object/A11/A11.3nz736986eofodoyctc191168e2vkq63675523116/safetywissen?prev=%2Fnews%2FSAFETYNEWS%2F>
- [12] Yerkes, R.M. & Dodson, J.D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. Journal of Comparative Neurology and Psychology, 18, 459-482.

## Aktuelle Studie zur Verwendung von Kinderschutzsystemen

Dr.-Ing. **Gerd Müller**, Technische Universität Berlin;  
Prof. Dr. **Wolfgang Fastenmeier**, Mensch Verkehr Umwelt,  
Institut für Angewandte Psychologie;  
Dr.-Ing. **Matthias Kühn**, Unfallforschung der Versicherer, Berlin

### Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurden wichtige Fortschritte beim Schutz von Kindern in Pkw erreicht. Kinderschutzsysteme (KSS) sind einfacher zu bedienen und werden häufiger eingesetzt, die Anforderungen an solche Systeme sind gestiegen. Neben der bisher gültigen europäischen Zulassungsnorm ECE-R 44 wurde mit der ECE-R 129 eine weitere Vorschrift etabliert, die insbesondere das ISOFIX-System standardisiert und seine Nutzungszahl erhöhen soll. Trotz dieser positiven Entwicklungen haben zahlreiche Feldstudien zur Nutzung von KSS in den letzten Jahren immer wieder gezeigt, dass der hohen Nutzungsquote auf der einen Seite eine hohe Zahl an Fehlbedienungen (sog. Misuse) von KSS auf der anderen Seite gegenübersteht. Um die Effekte der oben beschriebenen Entwicklungen im Bereich der Kindersicherheit zu untersuchen, wurde im Auftrag des Gesamtverbands der Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) eine umfassende Feldstudie durchgeführt, die die Sicherungssituation von Kindern im Pkw beleuchtet und dabei besonders das Thema Fehlbedienung in den Vordergrund stellt.

Die Feldstudie wurde in Berlin und München sowie in der ländlichen Umgebung dieser beiden Städte durchgeführt. Mit 1.076 Datensätze ist diese Studie die mit Abstand größte, die die Thematik der Kindersicherheit im Pkw systematisch erfasst. Aufgrund der großen Datenmenge und -tiefe lassen sich zahlreiche detaillierte Analysen durchführen.

In 1.046 Fällen wurden die Kinder in einem KSS gesichert, davon 30 % in einem ISOFIX-System. Die Misusequote betrug 47 % und liegt damit zum ersten Mal seit Durchführung solcher Studien unter 60 %. In diesem Paper werden zahlreiche Detailergebnisse zur Fehlbenutzung von Kindersitzen im Pkw sowie deren Ursache vorgestellt. Insbesondere auf Randbedingungen, die eine Fehlbenutzung wahrscheinlicher machen, wird eingegangen. Abschließend werden Empfehlungen zur Verbesserung der Kindersicherheit im Pkw formuliert. Diese richten sich an Hersteller von KSS und Pkw, an Behörden, an Gremien der Verkehrssicherheit, an Verbraucherschutzorganisationen und an Forschungseinrichtungen.

## 1. Einleitung

In einer mobilen Welt, in der die Bewältigung vieler Strecken mit dem eigenen Pkw selbstverständlich ist, gehört die Mitnahme von Kindern im Pkw genauso selbstverständlich dazu. Die Schutzeinrichtungen eines Fahrzeugs, die dafür sorgen, dass die Insassen im Fall eines Unfalls bestmöglich geschützt sind, sind jedoch für erwachsene Insassen optimiert, Kinder können davon nur bedingt profitieren. Daher schreibt der Gesetzgeber vor, dass Kinder in geeigneten Rückhalteeinrichtungen zu befördern sind.

Die Schutzwirkung dieser Kinderschutzsysteme (KSS) hat sich seit dem Beginn ihrer Benutzungspflicht erheblich verbessert. Auch wenn es mittlerweile eine nahezu unübersehbare Anzahl von verschiedenen Modellen in allen Preisklassen gibt, kann allgemein gesagt werden, dass auch der einfachste und billigste Sitz ein hinreichend großes Schutzniveau für seinen Insassen bietet. Diese Aussage ist allerdings nur für den Fall wahr, dass das KSS vollständig richtig benutzt wird. Frühere Studien haben gezeigt, dass einerseits die Fehlbenutzung von Kindersitzen (Misuse) diese Schutzwirkung erheblich reduzieren oder ganz aufheben kann und dass andererseits diese Fehlbenutzung ein weit verbreitetes und damit grundsätzliches Problem im Bereich der Kindersicherheit im Pkw darstellt [1-5].

Daher erscheint es notwendig, die Benutzung von KSS regelmäßig in Feldstudien zu untersuchen und dabei der korrekten Benutzung besondere Aufmerksamkeit zukommen zu lassen. Seit der letzten größeren Studie, die in Deutschland und anderen Teilen Europas durchgeführt wurde [5], haben sich grundsätzliche Randbedingungen geändert: Mit der ECE-R129 wurde eine neue Gesetzgebung zur Nutzung von Kindersitzen eingeführt, in der ISOFIX als standardisiertes Befestigungssystem von Kindersitzen einen wichtigen Stellwert erhalten hat.

Im Rahmen der hier vorgestellten Studie wurden daher zwei wesentliche Aspekte in den Fokus gestellt. Zum einen ging es darum, ein aktuelles Bild des Nutzungsverhalten von KSS zu gewinnen, zum anderen sollte untersucht werden, inwiefern die ergriffenen Maßnahmen der letzten Jahre, die die Sicherheit von Kindern im Pkw erhöhen sollten, erfolgreich waren.

Hinsichtlich ihres Umfangs hat diese Studie dabei einen neuen Standard gesetzt. Mit über 1.000 erfassten Fällen ist sie die umfassendste dieser Art, die bisher in Deutschland durchgeführt wurde. Diese Datenbasis erlaubt eine detaillierte Analyse verschiedenster Aspekte des Nutzungsverhalten von Kindersitzen und der damit verbundenen Umstände.

## 2. Beschreibung der Feldstudie

Dieses Forschungsprojekt untersuchte die Häufigkeit und Schwere der Fehlbenutzung in der Realität. Zusätzlich wurden Kurzinterviews mit den Fahrern der Autos geführt. Abhängig von

der Bereitschaft der befragten Person wurde auch ein eingehendes Telefoninterview durchgeführt.

## **Forschungsmethoden**

Um möglichst viel über alle interessanten Aspekte des Misuse' zu erfahren, wurden Daten zu Häufigkeit, Schwere usw. der Fehlbenutzung sowie zu den zugrundeliegenden Kenntnissen, Einstellungen und Fähigkeiten der Nutzer erhoben. Es wurden zwei Forschungsinstrumente entwickelt, um Formen der Fehlbenutzung, mögliche Motive und relevante Kontextbedingungen auf dem Gebiet zu erfassen. Beide Instrumente - ein Beobachtungsbogen und ein Fragebogen für die anschließende Befragung - basieren auf den Hypothesen, die im Zuge der Systematisierung der Ursachen von Misuse in früheren Studien entwickelt wurden.

## **Beobachtungsbogen**

Die Beobachtung, die an verschiedenen Orten (z. B. Supermarkt, Freizeiteinrichtungen, Kindergarten, Schule) durchgeführt wurden, konzentrierten sich auf die Fehlbenutzung. Der zusätzlich eingesetzte Befragungsbogen dokumentierte die Witterungsverhältnisse und den Standort der Befragung und umfasste insgesamt vier Abschnitte: Angaben zum Fahrzeug und Insassen, Angaben zur befragten Person, Angaben zum Kind, zum Kindersitz und zur Fehlbenutzung sowie schließlich Fragen zum festgestellten Misuse an den Fahrer.

## **Arten der Fehlbenutzung**

Jede Abweichung von der bestimmungsgemäßen Verwendung eines Kinderrückhaltesystems, die das angebotene Schutzniveau mindern könnte, wird hier als Fehlbenutzung oder falsche Verwendung interpretiert. Das in den vorherigen Projekten (weiter)entwickelte Codebook zur Beschreibung der denkbaren Arten der Fehlbenutzung wurde auch für dieses Forschungsprojekt verwendet, um den festgestellten Misuse aufzuzeichnen. Die Schwere des Misuse (geringfügig, mäßig, schwerwiegend) wurde vor Ort lediglich für ausgewählte Formen der Fehlbenutzung bewertet. alle anderen wurden nachträglich entsprechend des Codebooks bewertet.

Das Codebook besteht aus drei Abschnitten. Die möglichen Fehlerarten für Sitze der Gruppe 0/0 + sind im ersten Abschnitt aufgeführt, die Fehlerarten für Sitze der Gruppe 1 im zweiten Abschnitt und die Fehlerarten für Sitze der Gruppe 2/3 im dritten Abschnitt. Dies gilt auch für die nach ECE-R 129 zugelassenen Sitzmodelle.

## Der Fragebogen

Die anschließende Befragung, nachdem eine Fehlbenutzung von mindestens einem KSS im Fahrzeug festgestellt worden war, sollte die Kontextbedingungen, unter denen Fehlbenutzung auftritt und möglicherweise wahrscheinlicher macht, sowie handlungsbezogene Wissensэлеmente erfassen. Der dafür eingesetzte Fragebogen umfasste Fragen zum Kauf und zur Montage des Kindersitzes sowie zur Sicherung des Kindes im Kindersitz.

Die Beobachtungs- und Erhebungsinstrumente wurden im Vorfeld der Feldbefragung Vorversuchen unterzogen, um sie anhand der Kriterien Konsistenz, Verständlichkeit und Akzeptanz zu überprüfen. Basierend auf den Erfahrungen aus früheren Studien wurden die Beobachtungs- und Erhebungskomponenten getrennt. Aufgrund der Zeit, die die Probanden in früheren Studien für die Durchführung der Umfrage benötigten (ca. 30 Minuten), gab es erhebliche Probleme, sie zur Annahme zu bewegen, und dies ließ Zweifel aufkommen, ob die Umfrage abgeschlossen werden konnte. Infolgedessen wurde den Probanden sehr bald danach (d. h. zwei bis drei Tage später) eine anschließende telefonische Befragung als Alternative zu einer Befragung vor Ort vorgeschlagen.

## 3. Durchführung der Feldstudie

Die Feldstudie wurde nach dem erfolgreichen Abschluss der Vorversuche Ende Juni 2016 gestartet und im Juni 2017 abgeschlossen. Die Daten wurden über diesen Zeitraum gleichmäßig erhoben (Bild 1).

Die Studie wurde an ausgewählten Standorten im Großraum Berlin und München durchgeführt. Bild 2 zeigt eine Übersicht der Befragungsorte. Diese lagen sowohl im städtischen Gebiet als auch an Orten in ländlichen Bereichen. Darüber hinaus wurden auch weiter entfernte Städte (z. B. Leipzig, Potsdam, Augsburg und Rosenheim) mit einbezogen. Durch die Auswahl jeweils unterschiedlicher Standorte wurde sichergestellt, dass unterschiedliche Anfahrtszwecke in der Studie berücksichtigt wurden (Einkaufen, Kindergarten- und Schulfahrten, Freizeit).

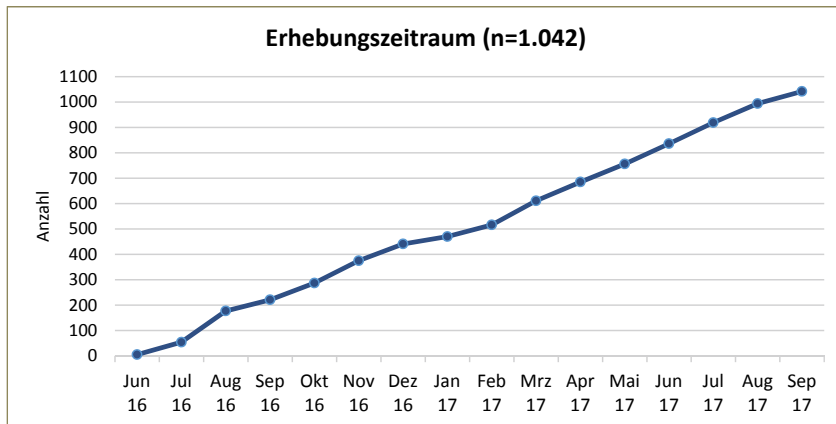


Bild 1: Erhebungszeitraum

Das Ausgangskriterium für die Auswahl der Probanden war, dass die Befragten zu einem bestimmten Zeitpunkt an diesen Orten anhielten und mit Kindern bis zu 12 Jahren unterwegs waren. Ziel war es, eine Zufallsstichprobe zu ziehen und alle Arten von Kinderrückhaltesystemen in die Studie mit einzubeziehen. Die Fahrer wurden in der Regel von den Beobachtern angesprochen, die ihnen dann erklärten, worum es in der Studie ging. Wenn sich die Fahrer zur Teilnahme bereit erklärten, sammelte einer der Beobachter die allgemeinen Informationen, die das Beobachtungsblatt vorschreibt. Gleichzeitig überprüfte der zweite Beobachter, wie gut die Kinder im Kinderrückhaltesystem gesichert waren und wie gut der Sitz im Fahrzeug gesichert war. Sie führten dann entweder die Umfrage vor Ort für alle Kinder im Fahrzeug durch oder vereinbarten für die nächsten Tage einen telefonischen Termin für die weitere Befragung. Für die Durchführung der Beobachtung / Befragung vor Ort waren durchschnittlich 15 bis 20 Minuten pro Fahrzeug erforderlich. Dies variierte je nach Anzahl der im Fahrzeug gesicherten Kinder.

Im Vergleich zu früheren Studien gab es in dieser Felderhebung eine signifikant größere Anzahl von erfassten Fällen (Bild 3). Der große Datensatz von 1.042 Fällen ermöglicht auch eine detaillierte Analyse für bestimmte Fragestellungen, sodass belastbare Ergebnisse erzielt werden können.

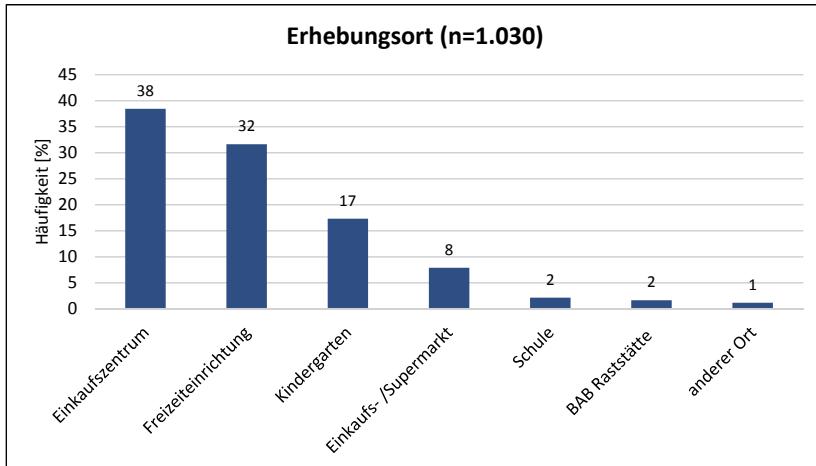


Bild 2: Erhebungsorte der Befragung

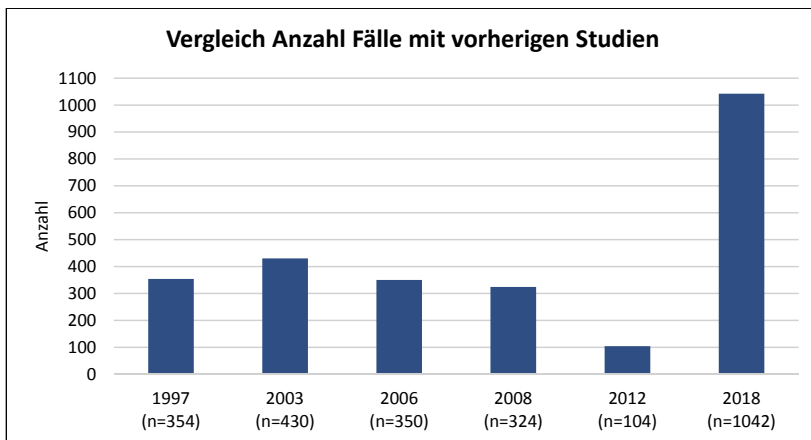


Bild 3: Vergleich der Fallanzahl mit vorherigen Studien [1-5]

#### 4. Ergebnisse der Feldstudie

##### Beschreibung der Stichprobe

Insgesamt wurden 1.076 Fälle von Kindern im Pkw erfasst, davon waren 1.042 im Kindersitz gesichert, 34 weitere Kinder wurden ungesichert befördert. Am häufigsten erfasst wurden Klasse 2/3-Sitze (n=472), gefolgt von Klasse 1-Sitzen (n=372) und als Klasse 0/0+-Sitzen



(n=198). Diese Verteilung ergibt sich aus der Tatsache, dass 2/3-Sitze etwa ab einem Kindesalter von zweieinhalb bis drei Jahren bis zum Ende des elften Lebensjahrs genutzt werden, während die kleineren Klassen nur maximal ein Jahr bis anderthalb Jahre genutzt werden. In fast zwei Drittel der untersuchten Fahrzeuge befanden sich zwei oder drei Personen. In den untersuchten Fahrzeugen befanden sich ein bis vier Kinder unter 12 Jahren, die alle auf einem Kindersitz gesichert waren, Kinder ohne Kindersitz wurden im Weiteren nicht betrachtet. In über 80 % der Fahrzeuge befand sich nur ein Kind im Fahrzeug. Von den 1.042 Kindern waren 47,3 % weiblich und 52,7 % männlich. Die Kinder waren zwischen einem Monat und 12 Jahre alt. Bild 4 zeigt die Altersverteilung der Kinder.

Wie erwähnt, wurden in der Regel die Fahrer der Fahrzeuge interviewt; davon waren 58 % der Interviewpartner Mütter der Kinder, 33,7 % die Väter, 5,4 % Großeltern und 2,9 % eine andere Verwandte oder ein Freund (siehe Bild 5).

Kinderrückhaltesysteme der Gruppen 2/3 und 1 waren mit 45,3 % bzw. 35,7 % am häufigsten vertreten; Sitze der Gruppe 0/0 + machten 19 % der Gesamtheit aus. Rund 90 % der verwendeten Kinderrückhaltesysteme entsprachen der Norm ECE-R 44.04 und 7,9 % der Norm ECE-R 44.03. Lediglich 0,3 % entfielen auf die veraltete Norm ECE-R 44.02 und 1,4 % auf die neue Norm ECE-R 129. Die meisten Kinderrückhaltesysteme (80 %) wurden mit einem automatischen Dreipunktgurt befestigt. In 20 % der Fälle wurde ein ISOFIX-System eingesetzt. In nur vier Fällen wurde ein integriertes Kinderrückhaltesystem eingesetzt.

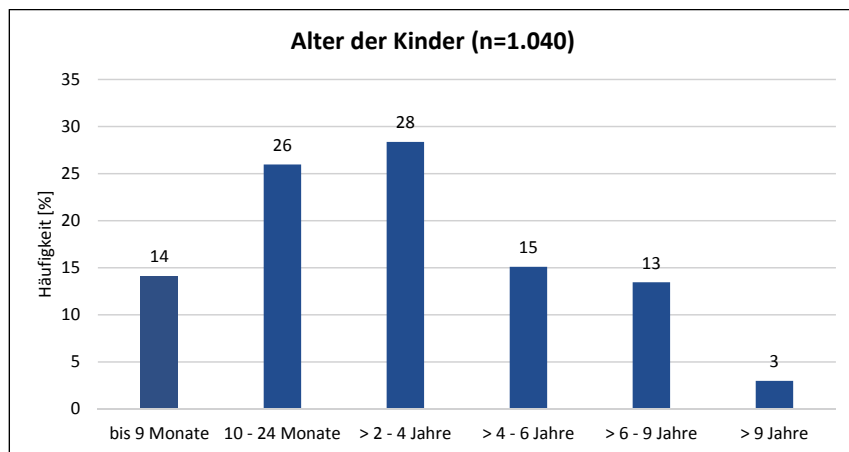


Bild 4: Altersverteilung der Kinder unter 12 Jahren

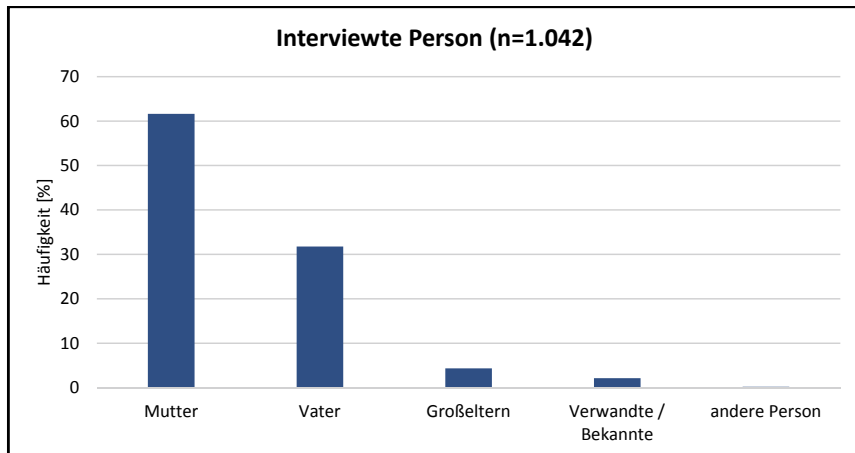


Bild 5: Verhältnis der interviewten Person zum Kind

### Ergebnisse der Feldbefragung

Von den insgesamt 1.042 untersuchten Kindern waren 52,4 % korrekt und 47,6 % fehlerhaft gesichert. Damit liegt die Misusequote im Vergleich zu bisherigen Studien erstmals unter 50 % und ist damit im Vergleich zu vorherigen Studien gesunken (Bild 6).

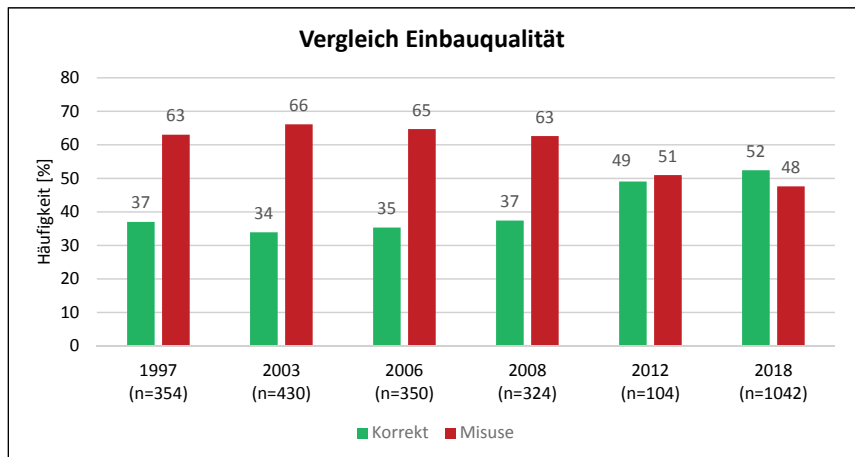


Bild 6: Vergleich der Misusequote mit vorherigen Studien [1-5]

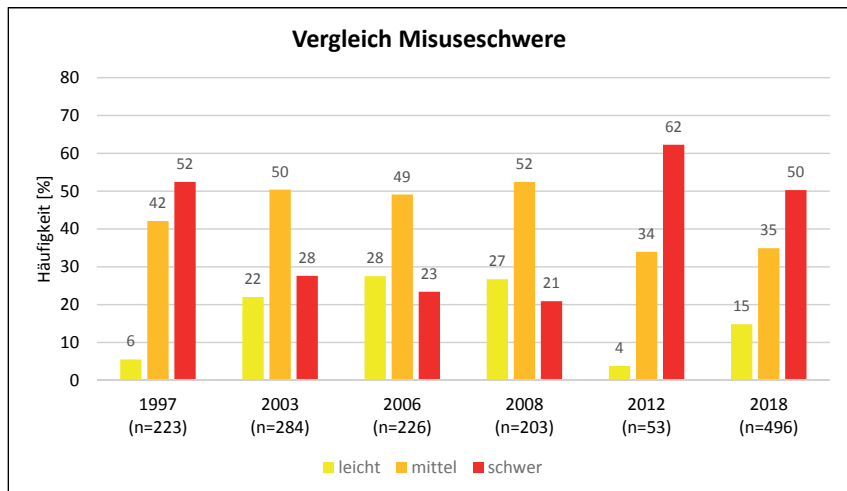


Bild 7: Vergleich der Misuseschwere mit früheren Studien [1-5]

Die Hälfte aller beobachteten Misusefälle wurde als schwerwiegend eingestuft, 35 % als mäßig und 15 % als geringfügig. Im Vergleich zu früheren Studien ist die Misusequote insgesamt deutlich geringer, die Schwere der festgestellten Fehlbenutzung jedoch höher (Bild 7). Durch die fortschreitende Entwicklung moderner Kinderrückhaltesysteme können offensichtlich einige weit verbreitete und häufige Formen des Misuse recht einfach vermieden werden. Tritt dennoch eine Form von falscher Nutzung des KSS auf, ist diese jedoch vergleichsweise schwerwiegend.

Wenn die Misuserate auf die verschiedenen Gruppen von Kinderrückhaltesystemen aufgeteilt wird, variiert sie stark. Fehlbenutzung tritt in den Gruppen 0/0 + und 1 signifikant häufiger auf als in der Gruppe 2/3 (Bild 8) (Qui-Quadrat,  $p = 0,004$ ). Der Hauptgrund dafür ist, dass es wesentlich einfacher ist, ein Kind in einem Sitz der Gruppe 2/3 zu sichern, da in diesem Fall das Kind und der Kindersitz gemeinsam mittels des fahrzeugseitigen Sicherheitsgurts gesichert werden. In den anderen beiden Gruppen hat der Kindersitz häufig ein eigenes Gurtsystem zum Sichern des Kindes im Sitz, und der Sitz wird separat im Fahrzeug installiert. Daraus ergibt sich ein zusätzliches Fehlbenutzungspotential.

Im Folgenden werden verschiedene Faktoren untersucht, die zum Misuse beitragen können. Beispielsweise erhöht schlechtes Wetter mit Regen die Misuserate erheblich (Bild 9) (Qui-Quadrat,  $p < 0,001$ ). Offensichtlich sichern Eltern ihr Kind bei solchen Witterungsbedingungen nur schnell und unzureichend, sodass die Sicherungsqualität erheblich nachlässt.

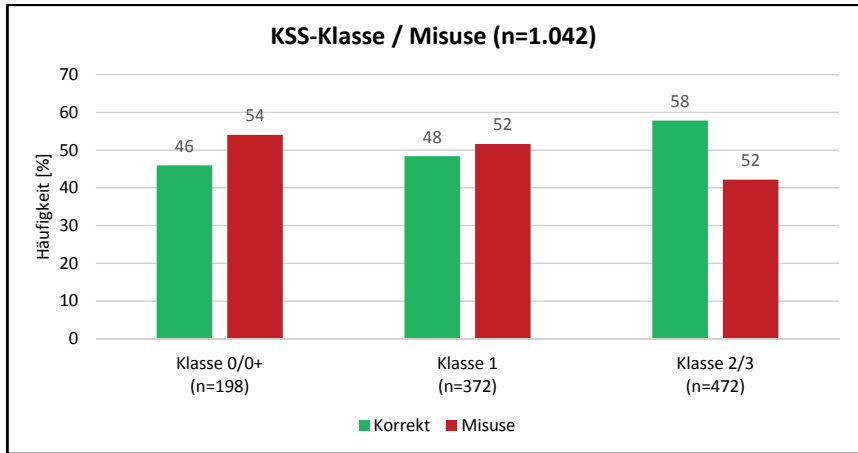


Bild 8: Misusehäufigkeit für einzelne KSS-Klassen

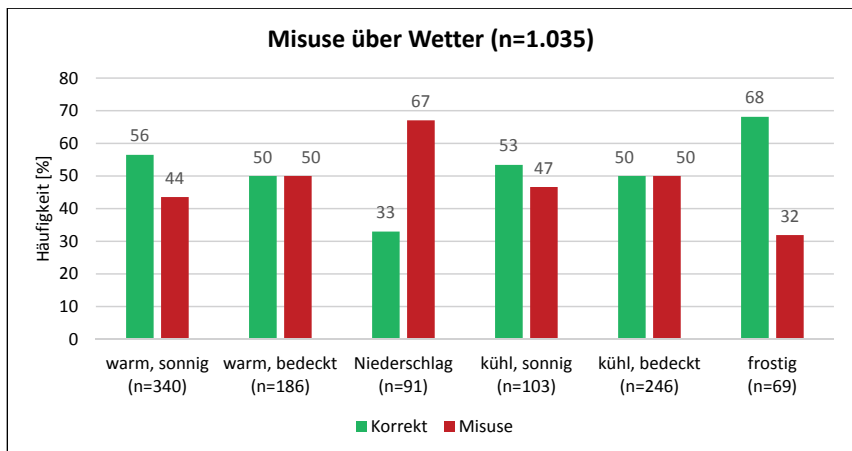


Bild 9: Misuse in Abhängigkeit vom Wetter

Auch die Fahrdauer beeinflusste die Fehlnutzungsquote erheblich. Wie in früheren Studien festgestellt, wurden bei kurzen Fahrten von bis zu 10 Minuten signifikant mehr Fehler gemacht als bei längeren Fahrten (Bild 10) (Qui-Quadrat,  $p = 0,013$ ). Offensichtlich herrscht nach wie vor die weit verbreitete Annahme, dass die ordnungsgemäße Sicherung eines Kindes für kurze Reisen weniger wichtig ist.

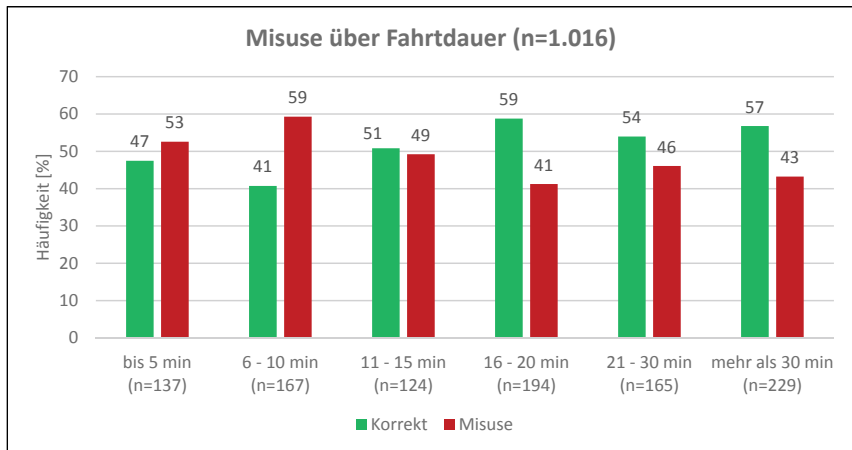


Bild 10: Misuse in Abhängigkeit von der Fahrdauer

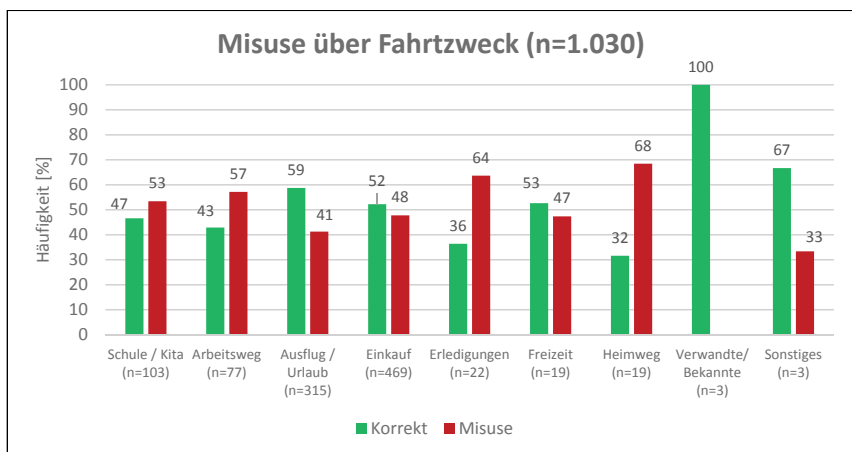


Bild 11: Misuse in Abhängigkeit vom Fahrtzweck

Als ebenfalls signifikant konnte der Zusammenhang zwischen Fahrtzweck und Misusehäufigkeit nachgewiesen werden. Fahrten, die tendenziell eher mit großer Hektik einhergehen und durch Zeitknappheit gekennzeichnet sind, führen zu schlechterer Sicherung (Bild 11) (Chi-Quadrat,  $p=0,016$ ). Das fällt insbesondere für Fahrten zur Schule bzw. zum Kindergarten auf, genauso wie für Fahrten im Zusammenhang mit Erledigungen oder auf der Heimfahrt. Bei

Fahrten in den Urlaub oder Ausflügen sinkt die Misusehäufigkeit deutlich. Die Zahl der KSS, die mittels ISOFIX im Fahrzeug gesichert sind, ist im Vergleich zu früheren Studien deutlich gestiegen. Dieser Trend hat ganz unmittelbare Auswirkung auf die Häufigkeit von Misuse insgesamt (Bild 12). Die Nutzung von ISOFIX geht hochsignifikant mit weniger Misuse einher als bei der Sicherung des Kindersitzes mittels Dreipunktgurt (Qui-Quadrat,  $p=0,000$ ). Hier zeigt sich direkt der positive Nutzen eines technischen Standards, der in den letzten Jahren in Fahrzeugen und bei KSS vermehrt vorzufinden ist.

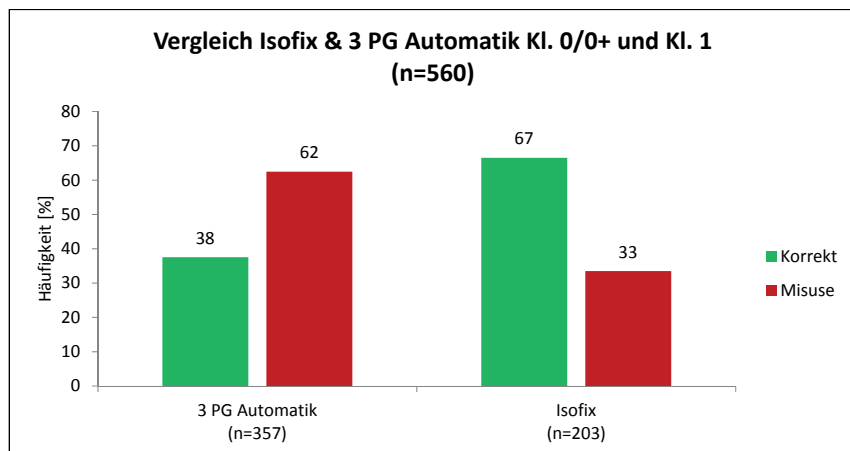


Bild 12: Misusequote mit und ohne ISOFIX für Gruppe 0/0+ und Gruppe 1

Ein hoch signifikanter Zusammenhang wurde auch zwischen der Misusehäufigkeit und der Staatsbürgerschaft des Befragten (im Allgemeinen der Person, die das Kind sichert) festgestellt (Bild 13). Die Fehlbenutzungsquote war bei Nicht-Deutschen signifikant höher (Qui-Quadrat,  $p = 0.000$ ). Besonders stark in dieser Gruppe vertreten sind Menschen aus Südost-europa, der Türkei und arabischen Ländern. Die mehrfach durchgeführten Interviews zeigten, dass der beschriebene Effekt insbesondere kulturelle Ursachen hat. Umso notwendiger ist es, weiterhin Wege zu entwickeln und umzusetzen, um Menschen dieser anderen Nationalitäten anzusprechen und von der Bedeutung einer angemessenen Kindersicherung in Fahrzeugen zu überzeugen.

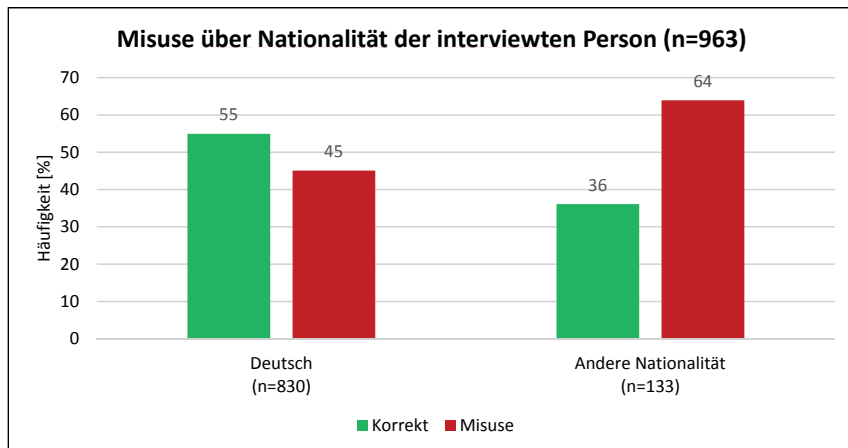


Bild 13: Misuse in Abhängigkeit von der Nationalität der Befragten

### Einbaufehler

Einbaufehler sind Fehler, die beim Einbau des Kindersitzes in das Fahrzeug auftreten. Diese Fehler unterscheiden sich grundlegend von der Sicherung des Kindes im Sitz.

Einbaufehler bei Sitzen der Gruppe 0/0+ werden von Fehlern im Zusammenhang mit dem Sicherheitsgurt des Fahrzeugs dominiert. Dies sind insbesondere ein lockerer Sicherheitsgurt, Fehler bei der korrekten Verwendung der Führungen für den Sicherheitsgurt und ein Verwechseln von Beckengurt und Schultergurt (Tabelle 1). Alle drei Fehler werden je nach Ausmaß als schwerwiegender Misuse eingestuft. Das Vertauschen von Schulter- und Beckengurt tritt vor allem bei Sitzen der Klasse 0/0+ auf und führt im Wesentlichen dazu, dass das Kind und der Kindersitz de facto nicht im Auto gesichert sind. Die drei genannten Arten von Misuse haben zwei wichtige Faktoren gemeinsam. Es besteht ein erhebliches Verletzungsrisiko für die Kinder und sie können wirksam vermieden werden, wenn ISOFIX verwendet wird.

Das Versäumnis, den Beifahrerairbag zu deaktivieren, wenn auf dem Beifahrersitz ein Kindersitz eingebaut ist, gilt als besonders schwerwiegender Fehler bei Sitzen der Gruppe 0/0+. Obwohl im Innenraum des Fahrzeugs zahlreiche Warnhinweise zu finden sind und dieser Punkt im deutschen Bußgeldkatalog (Bkat) eine gesonderte Straftat darstellt, wurde der Airbag in fast 15 % der Fälle, in denen ein Kindersitz eingebaut war, nicht deaktiviert. Dies ist umso bemerkenswerter, als die Deaktivierung eines Airbags in modernen Fahrzeugen in der Regel sehr einfach ist. Unfälle, bei denen der Kindersitz von einem ausgelösten Airbag getroffen wird, können zu erheblichen Verletzungen des Kindes führen.

Tabelle 1: Fünf häufigsten Installationsfehler bei Gruppe 0/0+-Sitzen (n=145)

Installationsfehler Kl. 0/0+	Häufigkeit [%]
Gurtlose im Fahrzeuggurt	24,83
Führungshilfe nicht eingelegt	19,31
Becken- und Schultergurt vertauscht	16,55
Tragegriffposition nicht korrekt	9,66
Fahrzeuggurt verdreht	7,59
Sonstige Fehler	22,07

Auch das Vertauschen von Schulter- und Beckengurt ist mit 16,6 % der Fälle sehr häufig. Dies geschieht, wenn der Beckengurt hinter dem Kindersitz eingezogen wird und der Schultergurt vorne über das Kind verläuft. Wenn dieser Fehler auftritt und eine Frontalkollision vorliegt, wird der Kindersitz mit dem darin befindlichen Kind ungehindert nach vorne geschleudert und stößt - je nach Einbauort - gegen das Armaturenbrett oder die Rückenlehne des Vordersitzes. Die damit verbundene Verzögerungskraft ist entsprechend hoch und belastet das Kind stark.

Ein sehr ähnliches Bild ergibt sich für Anpassungsfehler bei Sitzen der Gruppe 1. Auch in dieser Gruppe treten Probleme vor allem dann auf, wenn Menschen den Sicherheitsgurt falsch anlegen (Tabelle 2). Das häufigste Problem ist Lose im Fahrzeuggurt, welche bei fast der Hälfte aller untersuchten Sitze der Gruppe 1 festgestellt wurde. Die Gurtlose wird je nach Ausmaß mit unterschiedlichen Schweregraden eingestuft. In den allermeisten Fällen war sie schwerwiegend (63 % im Vergleich zu 26 % bei mäßiger Gurtlose und 11 % bei geringer Gurtlose). Dies verringert den Schutz eines Kinderrückhaltesystems erheblich und kann zu schweren Verletzungen des Kindes führen.

Tabelle 2: Fünf häufigsten Installationsfehler bei Gruppe 1 Sitzen (n=225)

Installationsfehler Kl. 1+	Häufigkeit [%]
Gurtlose im Fahrzeuggurt	49,33
Fahrzeuggurt verdreht	12,89
Führungshilfe nicht eingelegt	10,22
Gurtklemme nicht / falsch verwendet	4,44
Isofix ohne Antirotationseinrichtung	4,00
Sonstige Fehler	19,11

Die genannten und die anderen drei in Tabelle 2 aufgeführten Fehler werden durch ISOFIX ebenfalls zuverlässig verhindert. Es ist allerdings bemerkenswert, dass der fünfthäufigste Fehler direkt mit dem Einbau von ISOFIX-Sitzen der Gruppe 1 zusammenhängt. Für 4 % aller



Sitze der Gruppe 1 wurde die Anti-Rotations-Einrichtung (in der Regel der TopTether / oberer Sicherungsgurt) nicht verwendet. Dieser Fehler wird im Codebuch als schwerwiegend eingestuft. Dies zeigt einmal mehr, dass trotz der einfachen Verwendung von ISOFIX die Verwendung von Antirotationsfunktionen für die Nutzer Probleme bereitet. Hier scheint es noch Verbesserungspotenzial zu geben.

Bei Sitzen der Gruppe 2/3 zeichnete sich für Einbaufehler ein weniger klares Bild (Tabelle 3). Es wurden viele verschiedene Fehler beobachtet, von denen keiner besonders gehäuft auftrat. Generell ist jedoch der Einbau dieser Sitze deutlich einfacher, da der Sitz und Kind gemeinsam mit dem Fahrzeuggurt im Fahrzeug gesichert werden.

Tabelle 3: Sechs häufigsten Installationsfehler bei Gruppe 2/3 Sitzen (n=35)

Installationsfehler Kl. 2/3+	Häufigkeit [%]
Decke (o.Ä.) unter KSS	11,43
Eigene Konstruktion	11,43
Interaktionsproblem mit Kopfstütze (vom Fahrzeug)	11,43
Unzulässige Einbauposition	5,71
KSS beschädigt	5,71
Isofix gurtschlossseitig nicht eingehakt	5,71
Sonstige Fehler	48,57

### Sicherungsfehler

Das Kind wird im Kindersitz entweder mit dem eigenen Gurtsystem des Kinderrückhaltesystems, einem Fangkörper, der zum Kinderrückhaltesystem gehört oder mit dem Sicherheitsgurt des Fahrzeugs, der sowohl das Kinderrückhaltesystem als auch das Kind sichert, gesichert. In diesem Zusammenhang festgestellte Fehlbenutzung wird als Sicherungsfehler bezeichnet und im Folgenden beschrieben.

Bei Kinderrückhaltesystemen der Gruppe 0/0+ ist die Gurtlose im integrierten Gurtsystem des Sitzes bei weitem das häufigste Problem. Dieser Fehler machte über 90 % aller Fehler bei der Sicherung von Babys in Sitzen der Gruppe 0/0+ aus. Abhängig vom Ausmaß dieses Fehlers variieren die Auswirkungen im Falle eines Unfalls. Wenn der Gurt so locker ist, dass sich der Schultergurt über die Schultern verlagern und das Baby unter den Gurt rutschen kann, ist das Baby im schlimmsten Fall nicht gesichert und kann ungehindert aus dem Kinderrückhaltesystem geschleudert werden. Andere Fehler waren vergleichsweise selten zu beobachten.

Ein lockerer Sicherheitsgurt war auch das häufigste Problem bei Sitzen der Gruppe 1, auf die 90 % aller Fehler bei der Sicherung des Kindes entfielen. Auch hier ist dieser Fehler besonders

gravierend, wenn der Schultergurt neben den Schultern des Kindes verläuft und somit den Oberkörper nicht zurückhält. Der Oberkörper fällt nach vorn und das Kind wird nur durch den unteren Teil des Gurtsystems verzögert. Die Kräfte, denen der Bauchbereich ausgesetzt ist, sind dann umso größer, was zu sehr schweren Verletzungen führen kann.

Gurtlose im Beckengurt war auch der häufigste Fehler beim Sichern von Kindern auf Sitzen der Gruppe 2/3 (Tabelle 4). Außerdem wurde eine große Anzahl von Fehlern im Gurtverlauf des Fahrzeuggurts beobachtet. Einige festgestellte Fehler sind als geringfügig im Codebuch gekennzeichnet, z. B. wenn die Kopfstütze des Kinderrückhaltesystems zu hoch eingestellt ist. Zum schweren Misuse gehört beispielsweise, den Schultergurt unter die Schulter des Kindes zu führen, wodurch er den Oberkörper des Kindes nicht mehr zurückhält. Wie für Sitze der Gruppe 1 beschrieben, kann dies auch zu schweren Bauchverletzungen führen.

Tabelle 4: Sicherungsfehler in Klasse 2/3 nach Häufigkeit absteigend

Sicherungsfehler Kl. 2/3+	Häufigkeit [%]
Gurtlose des Beckengurtes	44,79
Fahrzeuggurt verdreht	11,46
Gurtlose des Schultergurtes	9,38
Führungshilfe Beckengurt gurtschlossseitig nicht eingelegt	9,38
Führungshilfe Schultergurt gurtankerseitig nicht eingelegt	8,59
Führungshilfe Beckengurt gurtankerseitig nicht eingelegt	4,69
Schultergurt unter dem Arm geklemmt	2,86
Gurtverlauf mit Halskontakt	2,08
Kopfstütze (KSS) zu hoch eingestellt	1,82
Führungshilfe Schultergurt gurtschlossseitig eingelegt	1,56

## 5. Ergebnisse der Befragung

Nach den Vor-Ort-Beobachtungen wurden diejenigen befragt, die die Kinder gesichert haben. Über 80 % der Befragten bejahten die Frage: „Glauben Sie, dass alles ordnungsgemäß gesichert ist?“. Auffällig ist jedoch, dass über 70 % derjenigen, bei denen Fehler festgestellt wurden, auch davon überzeugt waren, dass sie bei der Sicherung alles richtiggemacht haben (Bild 14).

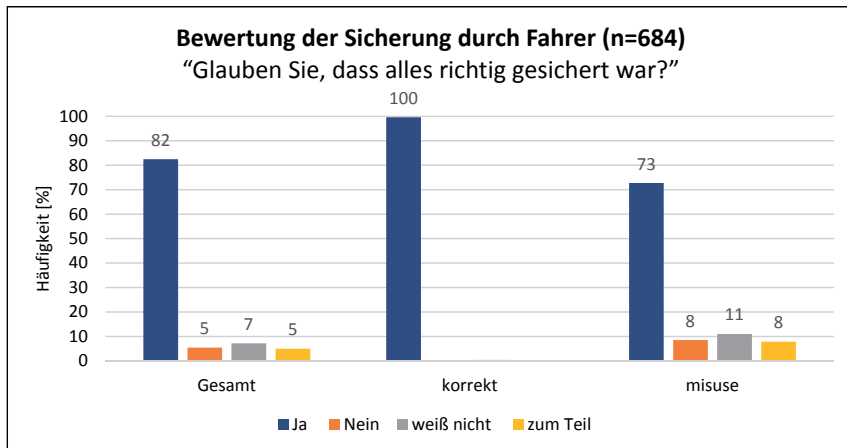


Bild 14: Bewertung der Sicherung durch den Fahrer

Wenn die Beobachter einen Fehlgebrauch feststellten hatten, wurden die Probanden gebeten, zu beurteilen, inwieweit dies die Sicherheit beeinträchtigen würde: 26 % glaubten, dass die Sicherheit nicht beeinträchtigt wird, 13 % glaubten an eine leichte Verringerung, und 9 % an eine erhebliche Beeinträchtigung. 37 % konnten keine Bewertung abgeben und gaben an, dass sie es nicht wüssten. Wie aus Bild 15 hervorgeht, war ein erheblicher Teil der Befragten der Meinung, dass ein Fehlgebrauch der Kindersitze keinerlei negative Auswirkungen haben würde: In dieser Teilgruppe waren bei 18 % der Befragten schwerer, bei 30 % mittlerer und bei 40 % bei geringer Misuse festgestellt worden. Nur wenige Nutzer dieser Teilgruppe bewerteten die damit verbundenen Risiken also realistisch.

Auf die Frage nach den Ursachen des festgestellten Misuse<sup>1</sup> antworteten die Befragten am häufigsten, dass es sich um eine unbewusste Fahrlässigkeit handele (Tabelle 5). Weitere quantitativ bedeutsame Ursachen waren Wissenslücken über den korrekten Einsatz der Kinderrückhaltesysteme, die kurze Fahrtdauer, der Wunsch, den Komfort des Kindes zu verbessern, ein bekleidungsbedingter Misuse (Gurtlose durch dicke Bekleidung) und der Umstand, dass sich das Kind selbst sichert. Punkte wie technische Probleme, aufwändige Montage etc. spielten eine vergleichsweise untergeordnete Rolle.

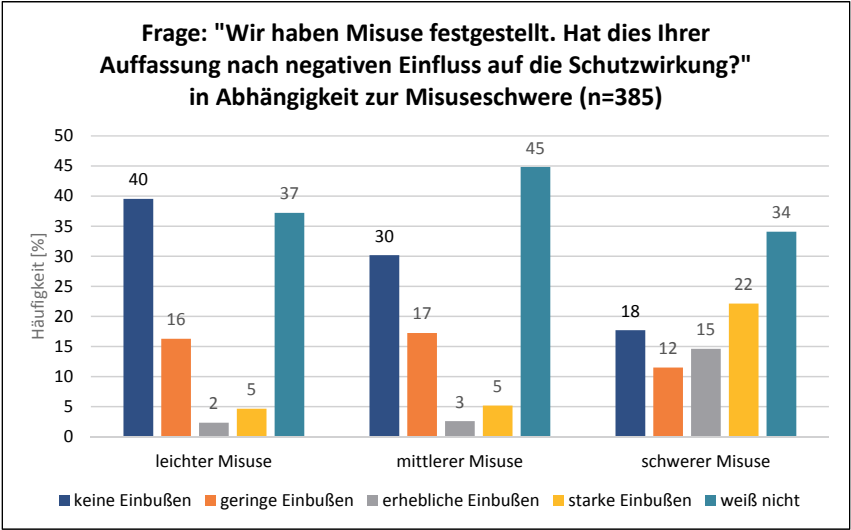


Bild 15: Antwort auf die Frage welchen Einfluss auf die Schutzwirkung der festgestellte Misuse hat

Tabelle 5: Ursachen für Misuse (Mehrfachantworten waren möglich) (n=321)

Ursachen für Misuse	Häufigkeit [%]
unbewusste Nachlässigkeit	32,85
Unkenntnis	10,09
kurze Strecke	9,08
mangelnde / fehlerhafte Information	6,20
Kind sichert sich selbst	6,70
Komfortverbesserung fürs Kind	5,91
Kurze Strecke	5,48
Zeitdruck	5,33
Bewusste Nachlässigkeit	4,32
technisch bedingt	3,46
Kleidungsbedingt (dick/dünn)	3,17
Widerstand des Kindes	3,17
umständliches Einbauen/Sichern	2,74
Zweit-/Fremdauto, Fahrzeugwechsel	2,16
Mehrere Kinder	1,44
Sitzwechsel der Kinder	0,29
Sonstige Gründe	4,32

## 6. Handlungsempfehlungen

Basierend auf den empirischen Ergebnissen der oben erwähnten früheren Studien wurden in der Vergangenheit systematische Empfehlungen und Anforderungen an diejenigen gegeben, die für die Sicherheit von Kindern in Autos eine Schlüsselverantwortung tragen. Einige dieser Empfehlungen wurden im Laufe der Jahre umgesetzt und haben zweifellos zur Verringerung der in dieser Studie festgestellten Fehlbedienungsrate beigetragen. Dennoch wurden eine Reihe von Empfehlungen die dazu beitragen, Misuse zu vermindern, nicht oder noch nicht umgesetzt.

### Empfehlungen an Hersteller von Kindersitzen und Fahrzeugen

Wie die aktuelle Studie zeigt, reduzieren ISOFIX-Verankerungen das Fehlnutzungspotenzial beim Einbau von Kinderrückhaltesystemen erheblich. Die Verwendung von ISOFIX muss daher weiterhin gefördert werden.

Ab einem bestimmten Alter beschäftigen sich Kinder aktiv mit ihrem Kindersitz, möchten ihn (komfortabler) einstellen oder einfach nur herausfinden, wie alles funktioniert. Eingriffe von Kindern sind daher eine erhebliche Quelle für Fehler. Um zu verhindern, dass Kinder das Gurtschloss öffnen, sollte dieses mit einem Mechanismus ausgestattet sein, der als Kindersicherung fungiert. Es wäre beispielsweise denkbar, einen Sensor zu integrieren, der solche Fehler erkennt und den Fahrer über das Öffnen des Schlosses benachrichtigt.

Probleme mit Gurten - insbesondere Gurtlose - sind die häufigsten Ursachen für Misuse. Systeme zur Verhinderung der Lose im Sicherheitsgurt im KSS sollten daher verbessert werden.

Die nächsten beiden Empfehlungen basieren nicht auf den empirisch gewonnenen Daten dieser Feldstudie; Sie stammen aus systematischen Beobachtungen und Erfahrungen der Interviewer vor Ort. Sie sollten daher hier nicht unerwähnt bleiben.

Die Befragten berichteten ziemlich häufig, dass sie Anleitungsvideos zum Anbringen ihres Kinderrückhaltesystems und zum Befestigen ihres Kindes am Sitz gesehen und diese als sehr hilfreich empfunden hatten. Andere Menschen äußerten den Wunsch nach solchen Videos für ihr Kindersitzmodell. Es wird daher empfohlen, verständliche und leicht zugängliche Anleitungsvideos zur Verwendung des Kinderrückhaltesystems für alle Kindersitzmodelle bereitzustellen.

### Empfehlungen für Forschung und Verbraucherschutzorganisationen

Menschen mit Migrationshintergrund standen nicht im Mittelpunkt dieser Studie, aber systematische Beobachtungen im Rahmen der Feldforschung zeigten, dass ausländische Eltern (insbesondere südost- und südeuropäische) weiterhin als besonders problematische Gruppe

zu betrachten sind, wenn es darum geht, Kinder in Kindersitzen richtig zu sichern. Dies gilt nicht nur in Bezug auf den Fehlgebrauch, sondern auch in Bezug auf die Nichteinhaltung der obligatorischen Verpflichtung, Kinder unter 12 Jahren in Kindersitzen zu sichern. Bei ausländischen Nutzern sind besondere Aspekte zu berücksichtigen, beispielsweise deren soziokulturelle Heterogenität und Sprachbarrieren. Darüber hinaus müssen die anerkannten Autoritäten in diesen Gemeinschaften (z. B. Kulturzentren, Religionsgemeinschaften, fremdsprachige Medien) einbezogen werden, um Kampagnen zu legitimieren und gleichzeitig muss ihre Hilfe herangezogen werden, um geeignete Personen zu ermitteln, die zur Verbreitung dieser Informationen beitragen können.

Informations- und Sensibilisierungskampagnen müssen sowohl allgemeine als auch systemspezifische Informationen zur richtigen Sicherung von Kindern in Fahrzeugen enthalten. Informationen über die Gefahr verschiedener Formen des Misuse<sup>1</sup> und deren detaillierte Darstellung sollten die gleiche Priorität erhalten.

#### Quellen:

- [1] Langwieder, K.; Stadler, P.; Hummel, Th.; Fastenmeier, W.; Finkbeiner, F.: "Verbesserung des Schutzes von Kindern in Pkw", BAST-Bericht, Heft M37, Bergisch Gladbach, 1997
- [2] Hummel, Th.; Finkbeiner, F.; Roselt, Th.: "Kinder im Auto. Studie zur Verwendung von Kinderschutzsystemen und Verbesserungspotentiale durch ISOFIX", Berlin: Verkehrstechnisches Institut der Deutschen Versicherer, 2003
- [3] Fastenmeier, W.; Lehnig, U.: "Fehlerhafte Nutzung von Kinderschutzsystemen in Pkw", BAST-Bericht, Heft M178, Bergisch Gladbach, 2006
- [4] Hummel, Th.; Finkbeiner, F.; Kühn, M.: "Misuse of Child Restraint Systems – A 2008 Observation Study in Germany", 6th International Conference Protection of Children in Cars, 4-5 December 2008, Munich, Germany
- [5] CASPER project: Child Advanced Safety Project for European Roads, D3.1.2: Report on effect of misuse and related items, 2012

# Unfälle schwerer Lkw mit Fußgängern und mit Radfahrern

## Accidents between heavy trucks and pedestrians and bicyclists

Dr.-Ing. **Axel Malczyk**, Dipl. Ing. **Jenö Bende**,  
Unfallforschung der Versicherer, Berlin

### Zusammenfassung

Obwohl Kollisionen mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern nur einen kleinen Teil der Unfälle von schweren Lkw ausmachen, so verursachen sie doch besonders schwere Verletzungen. In Deutschland machten im Jahr 2015 Zusammenstöße mit Radfahrern und Fußgängern einen Anteil von 9% beziehungsweise 4% unter allen Unfällen mit Personenschaden zwischen einem Lkw über 12 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht und einem anderen Verkehrsteilnehmer aus. Allerdings waren 26% der Getöteten in diesen Unfällen ungeschützte Verkehrsteilnehmer. Während Unfälle zwischen Lkw und Radfahrern, besonders in Rechts-Abbiege-Situationen, in Europa seit einiger Zeit Beachtung finden, existieren wenige Erkenntnisse zu Unfällen mit Fußgängern.

Die vorliegende Studie beschreibt die Umstände und Verletzungsfolgen schwerer Unfälle zwischen schweren Lkw und Fußgängern im Vergleich zu solchen mit Radfahrern. Die Unfalldatenbank der Versicherer (UDB) lieferte Informationen zu 39 Unfällen mit 43 Fußgängern zwischen schweren Lkw sowie 62 Kollisionen mit jeweils einem Radfahrer.

Die Mehrheit der Fußgänger und Radfahrer verunfallte in geschlossenen Ortschaften und bei Tageslicht. Während sich die Hälfte der Unfälle mit Beteiligung von Fußgängern auf einem geraden Fahrbahnabschnitt ereigneten (49%), geschah die Mehrheit der Unfälle mit Radfahrern an Knotenpunkten (77%). Der Anteil von Frauen lag für beide Gruppen von Verunglückten bei 58%. Fußgänger waren im Mittel 57,8 Jahre alt (Median: 61 Jahre) und damit etwa sechs Jahre älter als Radfahrer mit 51,6 Jahren (Median: 52,5 Jahre).

Die Kollisionsszenarien für Fußgänger und Radfahrer unterschieden sich erheblich. In der Mehrzahl der Fälle, in denen ein Fußgänger erfasst wurde, bewegte sich der Lkw geradeaus. Oftmals stand der Lkw anfänglich und kollidierte mit der Person, die in unmittelbarer Nähe des Fahrzeugs lief oder stand, erst beim Anfahren. Unfälle zwischen schweren Lkw und Radfahrern waren dem gegenüber vorrangig durch Abbiegemanöver charakterisiert, zumeist als der Lkw an einer Einmündung oder Kreuzung mit einem Radfahrer zusammenstieß, der

rechts neben dem Lkw fuhr und geradeaus weiterfahren wollte. 40% der Fußgänger und 52% der Radfahrer wurden überrollt. Trotz unterschiedlicher Kollisionsszenarien von Unfällen mit Fußgängern und Radfahrern mit Lkw waren die Verletzungsmuster und –schweren sehr ähnlich. MAIS3+ Fälle hatten einen Anteil von etwa zwei Drittel in beiden Gruppen.

Lkw-Fahrerassistenzsysteme weisen ein großes Potenzial auf, Unfälle mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern zu vermeiden oder die Folgen zu mindern. Während es für die Vermeidung von Unfällen mit Radfahrern besonders wichtig ist, die rechte Seite des Fahrzeugs zu überwachen, muss sich die Fußgängererkennung besonders auf den Bereich vor der Fahrzeugfront konzentrieren.

## Abstract

Although crashes with vulnerable road users account for a small proportion of all heavy truck accidents they cause particularly severe injuries. In Germany, collisions with bicyclists and pedestrians accounted for only 9% and 4%, respectively, of all injury crashes between a truck over 12,000 kg gross vehicle weight and another road user in 2015. However, vulnerable road users represented 26% of fatalities in these kinds of crashes. While collisions between trucks and bicyclists, particularly in right-turn situations, have recently gained attention in Europe, little research has been dedicated to crashes involving pedestrians.

This study describes the circumstances and injury outcomes of severe crashes between heavy trucks and pedestrians in comparison to those involving bicyclists. The German Insurers Accident Database (UDB) provided data on accidents involving heavy trucks: 39 crashes with 43 pedestrians, altogether, and 62 crashes with one bicyclist, each.

The majority of crashes occurred in built-up areas and during daylight, both for pedestrians and bicyclists. While most accidents involving pedestrians took place on a stretch of road (49%) the majority of accidents involving bicyclists occurred at junctions (77%). Females accounted for 58%, each, of the casualties among both groups of VRU's. Pedestrians averaged 57.8 years of age (median: 61 yrs.), and were approximately six years older than bicyclists with an average of 51.6 years (median: 52.5 yrs.).

The collision situations for pedestrians and for bicyclist differed considerably. The truck was going straight in the large majority of cases where a pedestrian was struck. Often, the truck was initially stationary and then moved off and collided with the person walking or standing near the vehicle. Crashes between a heavy truck and a bicyclist, on the other hand, were clearly dominated by turning manoeuvres, mostly when the truck made a right-turn at a junction and hit a bicyclist who was travelling alongside on the right of the truck and intending to go straight. 40% of pedestrians and 52% of bicyclists were run over. Despite different colli-



sion scenarios among pedestrians and bicyclists in crashes with trucks, their injury patterns and severities were very similar. MAIS3+ cases accounted for approximately two thirds among all casualties in both groups.

Truck driver assistance systems hold a large potential to avoid or mitigate crashes with both VRU groups. While monitoring the right side of the vehicle is necessary to avoid crashes with bicyclists, pedestrian detection needs to focus on the area in front of the truck.

## 1. Einleitung

Ungeschützte Verkehrsteilnehmer stellen seit langer Zeit einen Schwerpunkt der Unfallforschung dar. Allerdings wurden Fußgängerunfälle vorrangig in Bezug auf Kollisionen mit Pkw untersucht. Unfälle mit Radfahrern haben vor dem Hintergrund einer steigenden Popularität des Radverkehrs und der Stagnation, in einigen Ländern sogar eines Anstiegs der Zahl von Verunglückten, zunehmend Interesse gefunden. In Deutschland war die Zahl getöteter Radfahrer 2017 etwa so hoch wie 2010, während die Anzahl aller getöteten Verkehrsteilnehmer um 13% zurückging [1]. Wenngleich es relativ selten zu Unfällen zwischen schweren Nutzfahrzeugen und Radfahrern kommt, so haben sie zuletzt doch starke Beachtung sowohl in der Öffentlichkeit als auch in der Forschung gefunden, weil sie oft besonders schwere oder sogar tödliche Folgen für den ungeschützten Verkehrsteilnehmer haben, obwohl diese Kollisionen typischer Weise bei geringen Geschwindigkeiten stattfinden. Mehrere Studien haben in diesem Zusammenhang die Ursachen und insbesondere die Bedeutung des „Toten Winkels“ von Lkw, Sattel- und Gliederzügen untersucht [2, 3]. Konflikte zwischen rechtsabbiegenden Lkw und Radfahrern, die auf deren rechter Seite geradeaus fahren, stellen dabei eine besonders gefährliche Situation dar wegen des hohen Risikos, dass der Radfahrer nach einem ersten Anstoß stürzt und von einem oder mehreren Rädern des Lkw überrollt wird [2, 4]. Daher wurden bereits die Potenziale technischer Maßnahmen, um die direkte wie auch die indirekte Sicht aus dem Lkw-Fahrerhaus zu verbessern, diskutiert, ebenso wie elektronische Abbiegeassistenten für Lkw-Fahrer, um diese bei Anwesenheit von ungeschützten Verkehrsteilnehmern in der unmittelbaren Umgebung des Fahrzeugs zu warnen [4, 5].

Zu Unfällen zwischen schweren Lkw und Fußgängern existieren hingegen sehr wenige Untersuchungen. Jüngere Ergebnisse aus Belgien und Deutschland [3, 6], lassen vermuten, dass diese Unfallereignisse zwar seltener sind als solche zwischen schweren Lkw und Radfahrern, für Fußgänger aber ein vergleichbar hohes Risiko für schwere oder tödliche Verletzungen bergen. Eine Analyse des Rhône Road Trauma Registry in Frankreich [7] ergab hingegen eine höhere Zahl von Unfällen von Lkw mit Fußgängern als mit Radfahrern.

Mit der vorliegenden Studie sollen auf Grundlage von In-Depth-Daten der deutschen Kraftfahrt-Haftpflichtversicherer die Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen Lkw-Unfällen mit Fußgängern und Radfahrern näher beleuchtet werden. Während Kollisionen zwischen schweren Lkw und Radfahrern und deren Unfallfolgen bereits Gegenstand einer früheren Forschungsarbeit waren [4], wird diese unter Beibehaltung der Methodik nun um eine Datenanalyse in Bezug auf Fußgänger ergänzt. Dies ermöglicht, zumindest für Deutschland, einen Vergleich der Ergebnisse für beide Arten von Unfällen mit schweren Lkw.

## 2. Methode

Informationen zu Unfällen und Verletzungen lieferte die Unfalldatenbank der Versicherer (UDB). Die Datenbank enthält stichprobenartig erfasste Daten aus Schadenakten der deutschen Kraftfahrt-Haftpflichtversicherer. Für die vorliegende Studie wurden Personenschadenunfälle mit einem anfänglich geschätzten Schadenaufwand von mindestens 30.000 Euro eingeschlossen. Diese Summe schließt sowohl Anteile aus Personen- als auch Sachschaden ein, unabhängig davon, ob der Lkw-Fahrer oder der ungeschützte Verkehrsteilnehmer die Hauptschuld am Unfall trugen. Weil Unfälle mit Beteiligung von Fußgängern und Radfahrern eher Personen- als Sachschaden nach sich ziehen, tendieren die untersuchten Unfälle eher zu solchen mit schweren Verletzungsfolgen.

Schwere Lkw wurden definiert als Fahrzeuge für den Gütertransport mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) von mindestens 11.900 kg sowie deren Anhänger. Gemäß EU-Richtlinie 2007/46/EC [8] gehören Güterkraftfahrzeuge über 12 t zGG zur Typklasse N3 beziehungsweise N3G im Falle geländegängiger Fahrzeuge. Diese umfasst somit die allermeisten Sattelzugmaschinen, Lkw für den Fernverkehr als Solo-Lkw oder in Kombination mit einem Deichselanhänger sowie schwere Fahrzeuge für den Baustelleneinsatz oder in der Entsorgungswirtschaft. Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht knapp unter 12.000 kg, oftmals mit 11.990 kg zGG zugelassen, sind im regionalen Verteilerverkehr verbreitet. Formal gehören sie der EU-Typklasse N2 beziehungsweise N2G an, wurden aber für die Studie ebenfalls einbezogen. Busse, landwirtschaftliche Kraftfahrzeuge und Spezialfahrzeuge wie Autokräne wurden nicht berücksichtigt.

Nutzer von Fahrrädern wurden als „Radfahrer“ kategorisiert, wenn sie sich zum Unfallzeitpunkt auf ihrem Fahrrad befanden. Elektrofahrräder und Dreiräder, deren Konstruktion auf einem konventionellen Fahrrad basiert, wurden ebenfalls berücksichtigt, wenngleich ihre Zahl gering war.

Zur Kategorie der „Fußgänger“ wurden auch Personen gezählt, die ihr Fahrrad zum Zeitpunkt des Unfalls schoben. Dies entspricht der Definition, wie sie die Polizei für die amtliche

Verkehrsunfallanzeige anwendet. Die Kategorie „Fußgänger“ beinhaltete auch Fußgänger mit Spiel- und Sportgeräten sowie Personen, die sich zum Zeitpunkt des Unfalls auf oder neben der Fahrbahn aufhielten, darunter auch Verkehrsteilnehmer, die ihr Kraftfahrzeug gerade verlassen hatten oder im Begriff waren, dieses zu besteigen. Weiterhin wurden Straßenarbeiter und ähnliche Personen als Fußgänger betrachtet, wohingegen diese in der amtlichen Verkehrsunfallstatistik als eigene Kategorie von Verkehrsteilnehmern geführt werden. Zwei Personen, die in suizidaler Absicht vor einen Lkw liefen und schwer verletzt wurden, wurden ebenfalls in die Analyse einbezogen.

Ungeschützte Verkehrsteilnehmer, die beim Unfall nicht infolge des physischen Kontakts mit einem schweren Lkw verletzt wurden, wurden von der Auswertung ausgeschlossen.

Die Dokumentation zu den Unfallereignissen umfasste in der Regel die polizeiliche Verkehrsunfallanzeige, Zeugenaussagen, Krankenhausentlassungsberichte und mitunter Unfallrekonstruktionen durch Sachverständige und Obduktionsberichte. Mehrere Variable dienten der Charakterisierung der Unfallstelle und des Unfallhergangs wie auch der vorkollisionären Phase.

Die Verletzungsschwere wurde einerseits gemäß der Definition in der amtlichen Statistik eingestuft (getötet, schwer verletzt, leicht verletzt), andererseits nach dem AIS 2005, Update 2008 [9] vorgenommen, wenn die Verletzungsdokumentation hinreichend detailliert war. Ferner wurden die Gesamtverletzungsschwere MAIS (Maximum AIS) und die größte Verletzungsschwere AIS für die folgenden Körperregionen bestimmt: Kopf/Gesicht (einschließlich Schädel und Gehirn), Thorax, obere Extremitäten (einschließlich Schulter und Hand), Abdomen, untere Extremitäten (einschließlich knöchernes Becken und Fuß) und Wirbelsäule (Hals-, Brust- und Lendenwirbelsäule). Im Sinne einer besseren Übersichtlichkeit wurden die Verletzungsschweren nach AIS in drei Kategorien unterteilt: AIS0-1 für keine oder leichte Verletzungen, AIS2 für mäßige und AIS3+ für schwere, nicht lebensbedrohende bis hin zu maximalen Verletzungen.

Überrollvorgänge können im Hinblick auf den Verletzungsmechanismus bei ungeschützten Verkehrsteilnehmern von besonderer Bedeutung sein. Für die vorliegende Studie wurde „Überrollen“ daher als ein Vorgang definiert, bei dem ein oder mehrere Räder des Fahrzeugs über einen Körperteil des Verunglückten rollen oder diesen zumindest zwischen dem Rad und der Fahrbahn einklemmen. Fälle, bei denen der ungeschützte Verkehrsteilnehmer zwar unter das Fahrzeug geriet und möglicherweise mit dessen Unterseite, aber nicht den Rädern in Kontakt kam, wurden nicht dazu gezählt.

Die Analyse erfolgte meistens auf Personenebene, das heißt für jeden verletzten Fußgänger oder Radfahrer und seine Unfallumstände. Von Unfallereignissen, bei denen zwei

ungeschützte Verkehrsteilnehmer gleichzeitig verunglückten, gehen Daten zur Infrastruktur, den Umgebungsbedingungen und zum Lkw folglich zweimal in die Zählung ein. In Abhängigkeit von der Detailtiefe und Belastbarkeit der Daten mussten vereinzelt Fälle von bestimmten Auswertungen ausgenommen werden. Die angegebenen prozentualen Anteile beziehen sich daher auf die Gesamtheit der jeweils gültigen Datensätze.

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

Die Unfalldatenbank der Versicherer lieferte 39 Unfallereignisse zwischen schweren Lkw (ab 11.900 kg zGG) und Fußgängern sowie 62 Unfallereignisse zwischen schweren Lkw und Radfahrern, die sich zwischen 2007 und 2012 in Deutschland ereigneten. Die Mehrzahl, insgesamt 63 Fälle, stammte aufgrund einer größeren Stichprobe aus dem Jahr 2012. In vier Unfällen wurden jeweils zwei Fußgänger gleichzeitig durch einen Lkw verletzt, so dass die betreffenden Unfallumstände folglich auch zweimal in der Auszählung erscheinen. Das Material umfasst somit 43 Fußgänger und 62 Radfahrer mit den Umständen ihres Unfalls.

#### 3.1 Infrastruktur und Umgebungsbedingungen

Die große Mehrheit von Unfallereignissen ereignete sich für beide Gruppen von ungeschützten Verkehrsteilnehmern innerorts (Fußgänger:  $n=35$ ; 81%; Radfahrer:  $n=57$ ; 92%) (n.s.). Von den sieben Unfällen mit Fußgängern außerorts ereigneten sich drei auf Autobahnen, wobei insgesamt vier Fußgänger verunglückten. Während Unfälle mit Fußgängern in fast der Hälfte der Fälle ( $n=21$ ; 49%) auf einem unverzweigten Straßenabschnitt stattfanden, lagen die meisten Unfallstellen mit Beteiligung von Radfahrern an oder in unmittelbarer Nähe von Knotenpunkten wie Kreuzungen oder Einmündungen ( $n=48$ ; 77%). Dieser Unterschied in der Charakteristik der Unfallörtlichkeit bei Fußgängern und Radfahrern war statistisch signifikant ( $p < 0,01$ ). Mit lediglich elf Fällen (26%) erfolgte darüber hinaus bei Beteiligung von Fußgängern die Verkehrsregelung an Knotenpunkten signifikant seltener durch Lichtsignalanlagen als bei Beteiligung von Radfahrern ( $n=33$ ; 53%) ( $p < 0,01$ ).

Die Unfälle ereigneten sich zum allergrößten Teil an den Wochentagen von Montag bis Freitag. Lediglich drei Unfälle mit Fußgängern und einer mit einem Radfahrer geschahen am Wochenende. Die Unfallzeiten lagen fast ausschließlich in den Vormittagsstunden von 6.00 bis 12.00 Uhr und in den Nachmittags- und frühen Abendstunden von 12.00 bis 18.00 Uhr

(Fußgänger:  $n=39$ ; 91%; Radfahrer:  $n=58$ ; 94%) (n.s.). Dementsprechend herrschte bei den meisten Kollisionen Tageslicht (Fußgänger:  $n=38$ ; 88%; Radfahrer:  $n=51$ ; 82%) (n.s.). Zwar war die Fahrbahn selten nass oder feucht, als der Unfall geschah; dennoch waren solche Fahrbahnverhältnisse bei Unfällen mit Fußgängern signifikant häufiger vorhanden ( $n=10$ ; 23%) als bei Unfällen mit Radfahrern ( $n=5$ ; 8%) ( $p < 0.05$ ).

### 3.2 Charakteristik der Lkw, Demografie der Lkw-Fahrer, Fußgänger und Radfahrer

Die allgemeine Bauart ließ sich für alle schweren Lkw ermitteln, die mit Fußgängern und Radfahrern kollidierten. Für Fußgänger waren die Unfallgegner in 18 Fällen (42%) Sattelzüge, vier (9%) waren Lkw mit Deichselanhängern und 21 (49%) waren Solo-Lkw. Lkw, die mit Radfahrern zusammenstießen, waren in 25 Fällen (40%) Sattelzüge, 15 (24%) waren Lkw mit Deichselanhängern und 22 (35%) waren Solo-Lkw. Der höhere Anteil von Solo-Lkw in Unfällen mit Fußgängern unterschied sich nicht signifikant von dem in Unfällen mit Radfahrern (n.s.). Während es nur einmal zu einem Unfall zwischen einem Müllsammelfahrzeug und einem Radfahrer kam, wurden fünf Fußgänger von solchen Entsorgungsfahrzeugen erfasst. In einem Fall betraf dies zwei Fußgänger gleichzeitig, so dass dieser Lkw zweimal in der Zählung erscheint.

Mit Ausnahme von sieben Fahrzeugen konnte für alle übrigen Lkw das Alter zum Zeitpunkt des Unfalls bestimmt werden. Dieses reichte von 20 Jahre alten bis zu praktisch fabrikneuen Fahrzeugen. Lkw, die mit Fußgängern kollidierten, waren im Durchschnitt 5,2 Jahre alt (Median: 4 Jahre), solche, die mit Radfahrern zusammenstießen, waren im Mittel 5,5 Jahre alt (Median: 5 Jahre) (n.s.).

Bis auf eine Fahrerin waren alle Lkw-Fahrer männlich. Bei Unfällen mit Fußgängern waren die Lkw-Fahrer zwischen 22 und 65 Jahre alt (Durchschnitt: 45,4 Jahre.; Median: 46 Jahre) und bei Unfällen mit Radfahrern zwischen 21 und 69 Jahre alt (Durchschnitt: 44,6 Jahre.; Median: 45,5 Jahre) (n.s.). Für vier Lkw-Fahrer lag keine Altersangabe vor.

Unter den verunglückten ungeschützten Verkehrsteilnehmern machten Frauen einen Anteil von 58% in beiden Gruppen aus: 25 von den 43 Fußgängern und 36 von den 62 Radfahrern waren weiblich (Bild 1). Die Fußgänger waren durchschnittlich 57,8 Jahre alt (Median: 61 Jahre) und damit etwa sechs Jahre älter als die Radfahrer mit durchschnittlich 51,6 Jahren (Median: 52,5 Jahre). Trotz geringer Ähnlichkeit der Altersverteilung mit einer Normalverteilung wurde ein t-Test durchgeführt, der keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich des Alters zwischen den beiden Gruppen ergab (n.s.).

Unter den Fußgängern waren die weiblichen Unfallopfer ungefähr fünf Jahre älter als die männlichen (weiblich: Durchschnitt 60,0 Jahre, Median 67 Jahre; männlich: Durchschnitt 54,7 Jahre, Median 56 Jahre), wohingegen weibliche Radfahrer vier Jahre jünger als die männlichen waren (weiblich: Durchschnitt 49,7 Jahre, Median 50,5 Jahre; männlich: Durchschnitt 54,2 Jahre, Median 56 Jahre). In beiden Gruppen waren die Unterschiede zwischen den Anteilswerten der Geschlechter allerdings nicht signifikant (n.s.). Erwähnenswert scheint, dass fünf der verunglückten Fußgänger im Alter zwischen 54 und 74 Jahren ein Fahrrad neben sich führten, als sie vom Lkw erfasst wurden.

Alkoholeinwirkung wurde bei keinem der Lkw-Fahrer und nur bei zwei Fußgängern und zwei Radfahrern festgestellt.

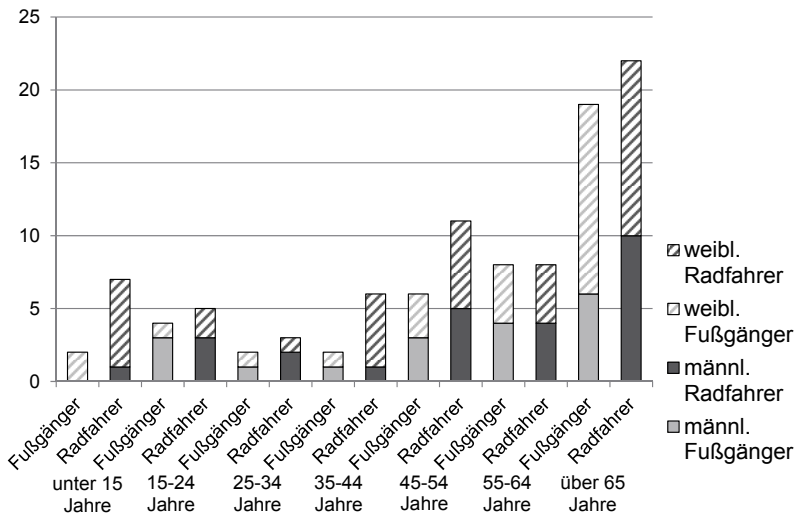


Bild 1: Altersverteilung und Geschlecht von verunglückten Fußgängern und Radfahrern

### 3.3 Kollisionsszenarien

Die Situationen, unter denen schwere Lkw mit Fußgängern und mit Radfahrern zusammenstießen, unterschieden sich erheblich voneinander. Im Hinblick auf die Bewegung des Lkws und die Bewegung oder Position des ungeschützten Verkehrsteilnehmers unmittelbar vor der Kollision lassen sich die Szenarien in Form der in Tabelle 1 (Unfälle mit Fußgängern) und Tabelle 2 (Unfälle mit Radfahrern) gezeigten Matrizen darstellen.

Bei der großen Mehrheit der 43 verunglückten Fußgänger fuhr der Lkw geradeaus (Tabelle 1). Oftmals näherte sich der Fußgänger dabei von rechts ( $n=10$ ; 23%), meist, um die Fahrbahn vor dem Lkw zu überqueren. In fünf Fällen (12%) bewegte sich der Fußgänger hingegen in gleicher Richtung wie der Lkw. Neben einer Fahrzeugbewegung bei normaler Fahrgeschwindigkeit werden zu „fährt geradeaus“ auch Situationen gezählt, in denen der Lkw anfänglich stand, zum Beispiel, weil dieser an einer roten Ampel warten musste. Als der Lkw dann anfuhr, kollidierte er mit dem Fußgänger, der unmittelbar vor dessen Front stand oder langsam lief. In dieser Situation wurde der Fußgänger vom Lkw-Fahrer beim Anfahrvorgang offenbar übersehen, obwohl die Fahrzeuge in der Regel auch über einen entsprechenden Spiegel zur Beobachtung des Bereichs vor der Lkw-Front verfügten. Die fünf als „in entgegengesetzter Richtung laufend“ bezeichneten Fälle (12%) beinhalteten auch Personen, die sich in der Fahrlinie des Lkws aufhielten, der sich kontinuierlich vorwärts bewegte. Bei insgesamt elf Unfällen streifte der Lkw den Fußgänger, entweder, weil der Fahrer ein Ausweichmanöver einleitete, um einem querenden Fußgänger auszuweichen, oder weil das Fahrzeug zu dicht an einer Person vorbeifuhr, die am Straßenrand oder in einer Einfahrt stand. Selten kam es bei Beteiligung von Fußgängern zu Unfällen, die durch abbiegende Lkw verursacht wurden. Bei zwei Unfällen traf der Lkw beim Rückwärts-Fahren einen Fußgänger, der sich hinter dem Fahrzeug befand.

Unfälle zwischen schweren Lkw und Radfahrern wurden hingegen mit insgesamt 37 Fällen (59%) deutlich durch Abbiegevorgänge bestimmt (Tabelle 2), zumeist, wenn ein Lkw an einem Knotenpunkt oder einer Grundstückseinfahrt nach rechts abbog und dabei einen Radfahrer erfasste, der in gleicher Richtung rechts neben dem Fahrzeug geradeaus fuhr. Situationen, in denen der Lkw geradeaus fuhr, waren vergleichsweise selten und umfassten entweder Kollisionen, bei denen der Radfahrer kreuzte oder der Lkw den Radfahrer während eines Überholmanövers seitlich streifte. Lediglich einmal kam es zum Zusammenstoß zwischen einem rückwärts rangierenden Lkw und einem sich von hinten nähernden Radfahrer. Zwei Radfahrer prallten bei Dunkelheit gegen das Heck von Fahrzeugen, die am Fahrbahnrand abgestellt waren.

Als Folge der Kollision wurden 17 Fußgänger (40%) mit mindestens einem Rad des Lkw oder seines Anhängers am Körper überrollt, in fünf Fällen mit tödlichem Ausgang. Dementsprechend wurden 26 Fußgänger (60%) vom Lkw angestoßen, aber im Sinne der obigen Definition nicht überrollt; vier von ihnen starben. Allerdings wurden mehrere Fußgänger von der Lkw-Front umgestoßen und gerieten unter das Fahrzeug, ohne jedoch von dessen Rädern erfasst zu werden. Radfahrer wurden in 33 Unfallereignissen (52%) überrollt, neunmal davon tödlich. Von den übrigen 29 Radfahrern (48%), die nicht überrollt wurden, starben zwei. Der geringere Anteil von Überrollung unter Fußgängern war im Vergleich zu Radfahrern statistisch nicht signifikant (n.s.).

Tabelle 1: Häufigkeit von Unfallszenarien zwischen schweren Lkw und Fußgängern

<b>Bewegung des Lkw</b>	<b>Bewegung des Fußgängers / Interaktion mit dem Lkw</b>						
	läuft in gleicher Richtung	läuft in entgegengesetzter Richtung	kommt von links	kommt von rechts	von linker Seite des Lkw gestreift	von rechter Seite des Lkw gestreift	läuft/steht hinter dem Lkw
fährt geradeaus	5 (12%)	5 (12%)	5 (12%)	10 (23%)	2 (5%)	7 (16%)	-
biegt nach links ab	-	1 (2%)	-	-	-	2 (5%)	-
biegt nach rechts ab	4 (9%)	-	-	-	-	-	-
fährt rückwärts	-	-	-	-	-	-	2 (5%)

Tabelle 2: Häufigkeit von Unfallszenarien zwischen schweren Lkw und Radfahrern

<b>Bewegung des Lkw</b>	<b>Bewegung des Radfahrers / Interaktion mit dem Lkw</b>						
	fährt in gleicher Richtung	fährt in entgegengesetzter Richtung	kommt von links	kommt von rechts	von linker Seite des Lkw gestreift	von rechter Seite des Lkw gestreift	fährt/steht hinter dem Lkw
fährt geradeaus	1 (2%)	-	-	5 (8%)	2 (3%)	5 (8%)	-
biegt nach links ab	2 (3%)	4 (6%)	1 (2%)	1 (2%)	-	-	-
biegt nach rechts ab	35 (56%)	-	1 (2%)	1 (2%)	-	1 (2%)	-
fährt rückwärts	1 (2%)	-	-	-	-	-	-
steht still	2 (3%)	-	-	-	-	-	-



### 3.4 Verletzungsmuster und –schwere von Fußgängern und Radfahrern

Entsprechend der Fallauswahlkriterien wurden alle ungeschützten Verkehrsteilnehmer verletzt, oftmals schwer. Neun der insgesamt 43 Fußgänger wurden getötet (21%) und 34 (79%) im Sinne der amtlichen Definition schwer verletzt. Von den 62 Radfahrern wurden elf tödlich (18%), 47 (76%) schwer verletzt und vier (6%) leicht verletzt. Bei fünf Fußgängern und vier Radfahrern lag zwar keine Dokumentation des vollständigen Verletzungsmusters vor, aber mit Ausnahme von drei Fußgängern konnte die Verletzungsschwere der am stärksten betroffenen Körperregion abgeschätzt und daraus der MAIS abgeleitet werden. Die Bilder 2 bis 8 zeigen die Häufigkeit der Verletzungsschweregrade nach MAIS und für die jeweiligen Körperregionen nach AIS für Fußgänger und Radfahrer.

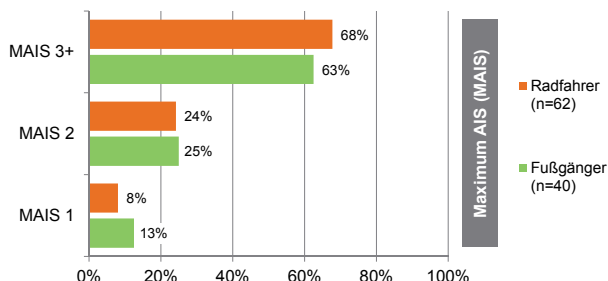


Bild 2: Verteilung von MAIS1, MAIS2 und MAIS3+ bei Fußgängern und Radfahrern

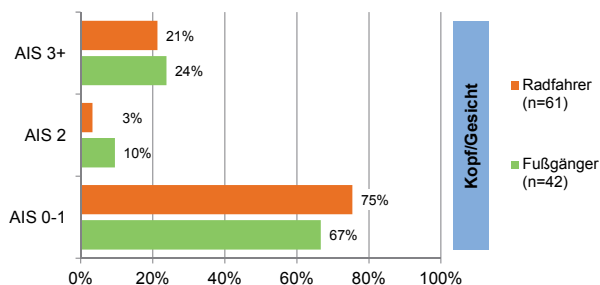


Bild 3: Verteilung von AIS0-1, AIS2 und AIS3+ an Kopf und Gesicht bei Fußgängern und Radfahrern

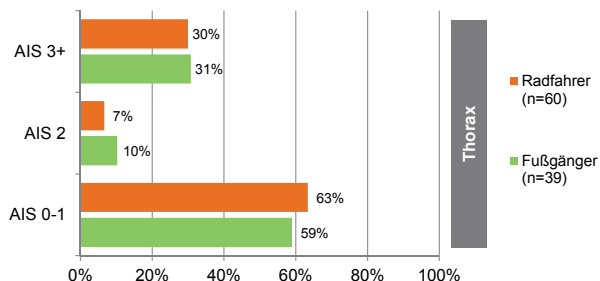


Bild 4: Verteilung von AIS0-1, AIS2 und AIS3+ am Thorax bei Fußgängern und Radfahrern

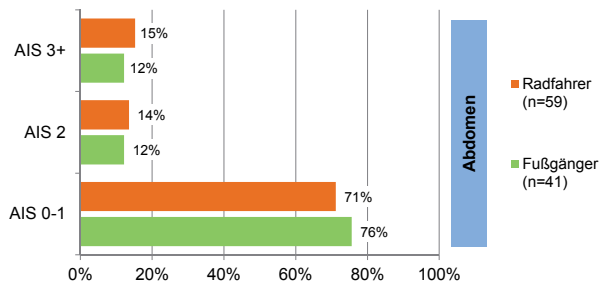


Bild 5: Verteilung von AIS0-1, AIS2 und AIS3+ am Abdomen bei Fußgängern und Radfahrern

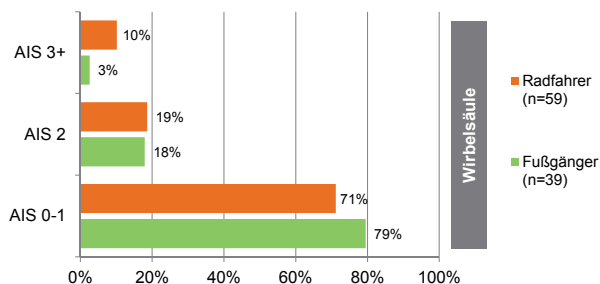


Bild 6: Verteilung von AIS0-1, AIS2 und AIS3+ an der Wirbelsäule bei Fußgängern und Radfahrern

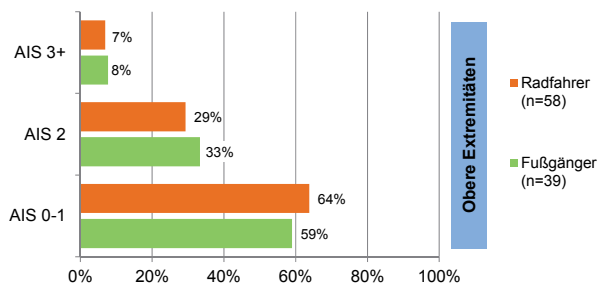


Bild 7: Verteilung von AIS0-1, AIS2 und AIS3+ an oberen Extremitäten bei Fußgängern und Radfahrern

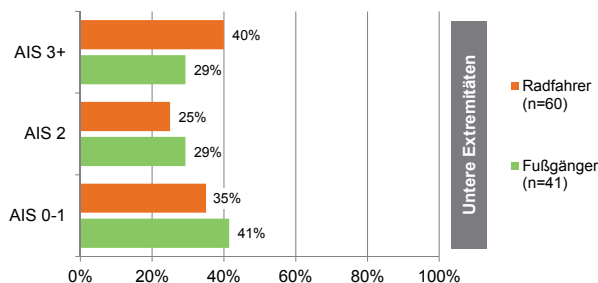


Bild 8: Verteilung von AIS0-1, AIS2 und AIS3+ an unteren Extremitäten bei Fußgängern und Radfahrern

MAIS3+ Fälle, einschließlich solcher mit Todesfolge, machten jeweils etwa zwei Drittel unter allen verunglückten Fußgängern und Radfahrern aus (n=25; 63% bzw. n=42; 68%), während jeweils fünf Personen (13% bzw. 8%) eine Gesamtverletzungsschwere von nur MAIS1 aufwiesen (Bild 2). Der höchste Anteil schwerer bis maximaler Verletzungen (AIS3+) fand sich bei Fußgängern in der Thoraxregion (31% unter 39 Fußgängern mit entsprechender Verletzungsdokumentation) (Bild 4) und für Radfahrer an den unteren Extremitäten, einschließlich des Beckens (40% unter 60 Radfahrern mit entsprechender Verletzungsdokumentation) (Bild 8). Nichtsdestoweniger waren Verletzungen des Thorax und der unteren Extremitäten in beiden Gruppen häufig. AIS3+ Verletzungen des Beckens und der Beine umfassten Oberschenkel- und Beckenfrakturen und offene Unterschenkel- und Beckenfrakturen. Oftmals lagen auch AIS2 klassifizierte Weichteilverletzungen bis in tiefe Haut- und Muskelschichten, zum Beispiel in Form von Décollement, vor; entweder als einzige Verletzung der Beine oder in Ver-

bindung mit Frakturen. Diese Art von Verletzung ist zumeist auf einen Überrollmechanismus in der betreffenden Körperregion zurückzuführen. AIS3+ Verletzungen des Thorax bestanden vorrangig aus Rippenserienfrakturen und Lungenverletzungen. AIS3+ Verletzungen des Abdominalbereichs entstanden ebenfalls zumeist im Zusammenhang mit Überrollung. Schwere bis maximale Verletzungen (AIS3+) an Kopf und Gesicht fanden sich bei 24% der Fußgänger und 21% der Radfahrer mit bekannten Verletzungsmustern (Bild 3). Während bei drei Radfahrern AIS6 Kopfverletzungen in Form von kompletter Schädelzertrümmerung oder Stammhirnverletzung vorlag, wurde dieser Verletzungsmechanismus bei Fußgängern nicht vorgefunden. Dennoch erlitten fünf von ihnen AIS4 und AIS5 Schädel-Hirn-Traumata infolge eines starken Anpralls an der Front des Lkw. Allgemein zeigten Fußgänger und Radfahrer sehr ähnliche Verletzungsmuster und –schweren bei Kollisionen mit schweren Lkw.

#### 4. Diskussion

Die vorliegende Studie vergleicht Umstände und Folgen von Unfällen zwischen schweren Lkw, definiert als solche mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mindestens 11,9 Tonnen, mit Fußgängern einerseits und mit Radfahrern andererseits. Die dafür herangezogenen Daten und die Erhebungsmethode weisen sowohl Stärken als auch Limitationen auf.

Während frühere Forschungsarbeiten Unfälle zwischen ungeschützten Verkehrsteilnehmern und schweren Nutzfahrzeugen im Allgemeinen adressierten, liegt der Schwerpunkt hier auf Lkw der EU-Typklasse N3. Dies schränkt zwar die verfügbare Fallzahl ein, macht die Ergebnisse für die betreffende Fahrzeugkategorie gleichzeitig aber auch aussagekräftiger. Die vergleichsweise hoch bemessene Untergrenze des Schadenaufwandes, bei dem Fälle in die Auswertung eingeschlossen wurden, verschiebt das Kollektiv hin zu Unfällen mit eher schwerwiegenden Folgen. Dies kann daraus geschlossen werden, dass das Fallmaterial mit Ausnahme von vier Verletzten, die nur ambulant behandelt wurden, ansonsten aus schwer oder tödlich verletzten Fußgängern und Radfahrern bestand. Durch Einschluss von Straßenarbeitern und anderen Personengruppen, die kein Fahrzeug benutzten, in die Gruppe der verunglückten Fußgänger wird der Begriff des „Fußgängers“ weiter gefasst als in der amtlichen Statistik. Daraus resultiert ein etwas höheres Verhältnis zwischen der Anzahl verunglückter Fußgänger und der Anzahl verunglückter Radfahrer (Quote 1:1,4). Die typischen Unfall- und Verletzungsmechanismen von Fußgängern bei Kollisionen mit Lkw gelten aber auch für diese Personengruppe. Panwinker, der für 2015 in einer Sonderauswertung der amtlichen Statistik die Unfallzahlen von schweren Lkw in Deutschland bestimmte [6], gibt 318 verunglückte Fußgänger und 739 verunglückte Radfahrer an, also ein Verhältnis von 1:2,3, jedoch jeweils 49 Getötete in beiden Gruppen. De Ceunynck et al. [3] zitieren die bel-

gische Unfallstatistik, wonach von den Getöteten in Unfällen mit schweren Lkw 8% Fußgänger und 16% Radfahrer sind. Daten aus der französischen Rhône-Region [7] zeigen hingegen ein umgekehrtes Verhältnis mit 73% Fußgängern und 27% Radfahrern bei Unfällen mit Lkw. Während die Stichprobe der vorliegenden Studie die Anteile verunglückter Fußgänger und Radfahrer bei Unfällen mit schweren Lkw in Deutschland offenbar recht gut wiedergibt, können diese Verhältnisse in anderen Ländern erheblich davon abweichen. Gründe dafür könnten unter anderem in der regionalen Häufigkeit der Fahrradnutzung liegen.

Trotz der begrenzten verfügbaren Fallzahl verunglückter Fußgänger und Radfahrer unterstreichen die Ergebnisse die Erkenntnisse aus früheren Untersuchungen, dass Unfälle mit Beteiligung von schweren Lkw oft besonders schwere Folgen haben. Eine Überrollung von zumindest einem Körperteil lag bei 40% der Fußgänger und 52% der Radfahrer vor. In einer Analyse der Renault Trucks-Datenbank zu ungeschützten Verkehrsteilnehmern, welche nur Todesfälle beinhaltet, berichten Beillas et al. [7] von einer noch höheren Quote von Überrollung mit 75% bei getöteten Fußgängern und 79% bei getöteten Radfahrern.

Allen Studien zu Unfällen zwischen schweren Lkw und ungeschützten Verkehrsteilnehmern ist gemein, dass Ältere unter den Unfallopfern zahlenmäßig dominieren. Mit wachsendem Anteil von Senioren in der Bevölkerung westlicher Staaten nimmt deren Bedeutung unter Verunglückten im Straßenverkehr noch zu. In Deutschland waren im Jahr 2017 50,7% der getöteten Fußgänger und 58,6% der getöteten Radfahrer im gesamten Straßenverkehr Personen im Alter von mindestens 65 Jahren [1]. In der vorliegenden Studie repräsentiert diese Altersgruppe 44% unter den Fußgängern und 35% unter den Radfahrern. De Ceunynck et al. [3] weisen in ihrer Analyse von Tote-Winkel-Unfällen mit Lkw-Beteiligung in Antwerpen ebenfalls auf einen hohen Anteil von Senioren hin: 80% der Fußgänger und 37% der Radfahrer waren 60 Jahre oder älter. Beillas et al. [7] berichten von einem Anteil von 50% ungeschützter Verkehrsteilnehmer über 61 Jahre unter Getöteten bei Unfällen mit Lkw. Zwar mag auch die zunehmende Vulnerabilität älterer Menschen eine Rolle spielen, wesentlicher scheint jedoch deren langsamere Reaktion bei einem unerwarteten Konflikt mit einem Lkw zu sein. Die Autoren hatten in einer früheren Studie zu derartigen Unfällen [4] die These aufgestellt, dass viele ältere Radfahrer die Absicht eines Lkw abzubiegen falsch interpretieren beziehungsweise zu spät als solche erkennen. In mehreren Fällen mit älteren Fußgängern im vorliegenden Material und den geschilderten Unfallhergängen kann vermutet werden, dass sich diese des Risikos, vom Lkw-Fahrer nicht wahrgenommen zu werden, nicht bewusst waren, als sie am stehenden Lkw vorbeigingen, oft unmittelbar vor dessen Front. Damit ist nicht gesagt, dass die Fußgänger zwangsläufig Schuld am Zustandekommen des Unfalls hatten. In

mehreren Fällen nutzte der Lkw-Fahrer offensichtlich nicht alle zur Verfügung stehenden Außenspiegel oder beobachtete das Umfeld nicht sorgfältig genug, als er das stehende Fahrzeug in Bewegung setzte.

## 5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Frühere Studien kamen zum Schluss, dass Fahrerassistenzsysteme, insbesondere elektronische Abbiege-Assistenz, ein theoretisches Potenzial haben, um Unfälle zwischen schweren Nutzfahrzeugen und Radfahrern zu vermeiden oder zumindest deren Folgen zu mindern [4, 5]. Fußgänger könnten bei Konflikten mit Lkw vermutlich in ähnlicher Weise von Fahrerassistenzsystemen profitieren. Allerdings müssen solche Systeme dann auf die typischen Unfallumstände mit Fußgängern ausgelegt sein. Anders als die Überwachung des Raumes rechts neben dem Fahrzeug, wie es für Abbiege-Assistenten zur Vermeidung von Unfällen mit Radfahrern erforderlich ist, müssen Systeme zum Schutz von Fußgängern besonderes Augenmerk auf den Bereich vor dem Lkw legen. Weil viele dieser Unfälle geschehen, wenn sich der Lkw langsam bewegt oder aus dem Stillstand anfährt, sollte die Detektion ungeschützter Verkehrsteilnehmer im unmittelbaren Bereich vor der Lkw-Front mit bereits heute verfügbarer Sensortechnologie machbar sein. Mindestens ein Lkw-Hersteller bietet mittlerweile nicht nur einen Abbiege-Assistenten für seine Fahrzeuge an, sondern hat auch sein Auffahr-Warnsystem erweitert, um bei niedrigen Geschwindigkeiten Fußgänger vor dem Lkw zu erkennen [10]. Ein beträchtlicher Anteil von Unfällen im ausgewerteten Material wurde augenscheinlich dadurch verursacht, dass entweder der ungeschützte Verkehrsteilnehmer die bevorstehende gefährliche Situation fehlinterpretierte oder der Lkw-Fahrer seiner Sorgfaltspflicht nicht ausreichend nachkam. Schulungen und Sicherheitskampagnen, die die Aufmerksamkeit auf diese Problematik lenken, sollten daher auf die betreffenden Personengruppen zugeschnitten werden.

## 6. Literatur

- [1] Statistisches Bundesamt: Unfallentwicklung auf deutschen Straßen 2017 – Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 12. Juli 2018 in Berlin. Pressekonferenz des Statistischen Bundesamtes. 12.07.2018
- [2] Thomas, P. et al.: Fatal Urban Cyclist Collisions with Lorries: An In-Depth Study of Causation Factors and Countermeasures Using a System-based Approach. Konferenzbeiträge zur 24th ESV Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Göteborg, Schweden: 08.-11. Juni 2015
- [3] De Ceunynck, T. et al.: Blind Spot Crashes between Vulnerable Road Users and Heavy Goods Vehicles in Belgium. Konferenzbeiträge zur 7th International Cycling Safety Conference ICSC 2018. Barcelona, Spanien: 10.-11. Oktober 2018
- [4] Malczyk, A. und Bende, J.: Crashes between Heavy Vehicles and Bicyclists: Characteristics, Injury Patterns and Potentials for Driver Assistance Systems" Konferenzbeiträge zur 2017 IRCOBI Conference (International Research Council on Biomechanics of Injury). Antwerpen, Belgien: 13.-15. September 2017
- [5] Kalaiyarasan, A. et al.: Assessment of Improved Direct and Indirect Vision Measures for Heavy Goods Vehicles on Cyclist Casualties. Konferenzbeiträge zur 7th International Cycling Safety Conference ICSC 2018. Barcelona, Spanien: 10.-11. Oktober 2018
- [6] Panwinkler, T.: Unfallgeschehen schwerer Güterkraftfahrzeuge. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft M 277. Bergisch Gladbach: 2018
- [7] Beillas, P. et al.: Accidents between Pedestrians and Industrial Vehicles: From Injury Patterns to Dummy and Truck Prototypes. Konferenzbeiträge zur 22th ESV Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Washington D.C.: 13.-16. Juni 2011
- [8] European Commission: Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council of 5 September 2007 – establishing a framework for the approval of motor vehicles and their trailers, and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles. Official Journal of the European Union. 2007, Internet: [<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007L0046&from=EN>], Abrufdatum: 31. Mai 2017
- [9] 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

- [10] Daimler Global Media Site: Mercedes-Benz Lkw: Sicherheit: Neue Assistenzsysteme: Notbremsassistent Active Brake: Assist 4 mit Fußgängererkennung und Abbiege-Assistent. Internet: [<http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Mercedes-Benz-Lkw-Sicherheit-Neue-Assistenzsysteme-Notbremsassistent-Active-Brake-Assist-4-mit-Fussgaengererkennung-und-Abbiege-Assistent.xhtml?oid=12367326>], Abrufdatum: 28. Mai 2017



# Event Data Recorder (EDR) for accidents with automated vehicles

## The accident analysis of the future

Dipl.-Ing. (FH) **Klaus Böhm**, **Daniel Paula**, M. Eng.,  
Prof. Dr. **Lothar Wech**, Prof. Dr. **Hans-Georg Schweiger**,  
Technische Hochschule Ingolstadt

### Zusammenfassung

Die Automatisierung von Fahrzeugen ist ein wesentliches Element zur signifikanten Reduzierung der Anzahl von Verletzten und Toten im europäischen Straßenverkehr. Trotz des Eingriffs von aktiven Sicherheitssystemen in die Fahrdynamik des Fahrzeugs können nicht alle Unfälle physikalisch vermieden werden. Im Rahmen der Unfallanalyse müssen insbesondere Fragen zum Unfallhergang und zur Vermeidbarkeit forensisch geklärt werden. Speziell die Differenzierung der Fahrzeugführerverantwortung zwischen Fahrer und System wird immer komplexer und ist derzeit nahezu unmöglich lückenlos rekonstruierbar. Auch die klassischen Unfallschritte sind zunehmend nicht mehr am Unfallort vorzufinden. Allerdings zeichnen Fahrzeugsysteme herstellereabhängig bereits eine große Bandbreite an Fahrzeugdaten (digitale Spuren) auf, die für unabhängigen Unfallanalytiker jedoch nur sehr eingeschränkt zugänglich und verwendbar sind. Der Event Data Recorder (EDR), der event-basiert Unfalldaten speichert, fußt auf technisch veralteten Konzepten, wodurch kaum automatisierte Systeme und deren Besonderheiten berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist der EDR speziell in Europa frühestens ab 2022 gesetzlich vorgeschrieben. Wenn nicht deutlich leistungsfähigere EDR-Konzepte gesetzlich zeitnah umgesetzt werden, resultieren toleranzbehaftete, zum Teil nicht eindeutige oder sogar falsche Gerichtsgutachten, die folglich zu falschen Urteilen führen können. Zudem führt dies zu finanziell und zeitlich unkalkulierbaren Endlos-Gerichtsverfahren, da vermehrt nicht standardisierte Daten in den Prozess eingeführt werden, die sich potentiell widersprechen können und schwer zu interpretieren und validieren sind. Um Rechtssicherheit und Datenschutz für alle zu gewährleisten, muss die Datenbasis für die Unfallanalyse der Zukunft standardisiert werden, wobei den Systemvideos und dazugehörigen Objektdaten ein besonderes Potential zur Unfallaufklärung zugesprochen werden kann.

## Abstract

Vehicle automation is an essential instrument for significantly reducing the number of injuries and fatalities in European road traffic. Despite the intervention of active safety systems in the vehicle's driving dynamics, not all accidents can be physically avoided. In the context of accident analysis, questions regarding the cause and avoidability of the accident must be clarified forensically. In particular, the differentiation of driving responsibility between driver and system is becoming increasingly complex and it is currently impossible to reconstruct without any gaps. Traditional accident traces are also disappearing from the accident scene. However, vehicle systems already record a wide range of vehicle data, depending on the manufacturer. But these data are only accessible and usable to a very limited extent by independent accident analysts. The Event Data Recorder (EDR), which stores event-based accident data, is based on technically outdated concepts, such that automated systems and their special characteristics are hardly considered. In addition, according to European law, the EDR is a vehicle requirement earliest in 2022. If more potent EDR concepts are not implemented promptly by law, the result will be tolerance-based, sometimes ambiguous or even incorrect court reports, which can consequently lead to incorrect judgments. In addition, this leads to financially and temporally incalculable endless court proceedings, since increasingly non-standardized data are introduced into the lawsuit, which can potentially contradict themselves and are difficult to interpret and validate. In order to guarantee legal certainty and data privacy for all, the data base for the accident analysis of the future must be standardized, whereby the system videos and associated object data can be attributed a high priority for accident clarification.

## 1. Stand der Technik zur Verkehrsunfallaufklärung mit Hilfe von Fahrzeugdaten

In Deutschland wurde nach § 63a StVG in 2017 ein "Datenspeichersystem für automatisiertes Fahren" (engl. **Data Storage System for Automated Driving (DSSAD)**) für Fahrzeuge mit einem Automatisierungsgrad  $\geq$  SAE Level 3 gesetzlich vorgeschrieben [1]. Der DSSAD dokumentiert, ob das System oder der Fahrer das Fahrzeug kontrolliert hat, um mögliche Haftungsfragen klären zu können [1]. Die UNECE plant die Einführung eines Standards zum DSSAD im Jahr 2020 [2].

## DAF- Datenspeicher für automatisierte Fahrzeuge

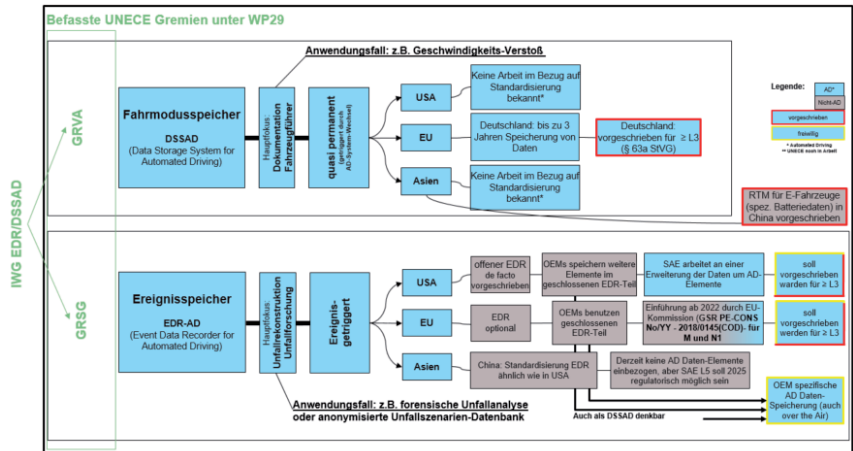


Bild 1: Übersicht zu internationalen Regelungen bzgl. EDR und DSSAD. Quelle: [2, 3]

NHTSA hat seit 2006 mit der Regulierung "49 CFR Part 563" einheitliche Anforderungen an die Genauigkeit, Erfassung, Speicherung, Verwendbarkeit und Abrufbarkeit von fahrzeugseitigen Crash-Ereignisdaten in Fahrzeugen mit Ereignisdatenschreibern (EDRs) festgelegt [4]. Diese EDR-Funktionalität wird im Allgemeinen im Airbag-Steuergerät implementiert [5].

Die Regulierung "49 CFR Part 563" ist lediglich für die Fahrzeugkategorien M1 und N1 zutreffend [4, 6]. Diese Tatsache bedeutet, dass schwere LKW, Busse, Motorräder, land- und forstwirtschaftliche Fahrzeuge, Anhänger oder Sonderfahrzeuge nicht mit einem EDR ausgestattet sein müssen. Der US-EDR erfasst die in "49 CFR Part 563.7" aufgeführten Fahrzeugdaten, die für Unfalluntersuchungen und die Bewertung von Rückhaltesystemen nützlich sind [4]. Die Regulierung verlangt auch, dass ein Unfallanalytiker die Daten eines EDR ohne Unterstützung des Fahrzeugherstellers mit einem "handelsüblichen Werkzeug/Gerät" auslesen müssen kann [4]. Nachdem die Regulierung des US-EDRs seit 2006 in Kraft ist, berücksichtigt diese keine Datenpunkte, die speziell für die Aufklärung von Unfällen unter Beteiligung von automatisierten bzw. elektrifizierten Fahrzeugen wichtig sind. Darüber hinaus werden viele Unfälle, speziell mit Fußgängern und Fahrradfahrern, nicht als signifikante Ereignisse für die Aktivierung der Datenspeicherung erkannt, da die Trigger-Kriterien unzureichend sind [7, 8].

Die Europäische Kommission hat beschlossen, ab 2022 einen gesetzlich vorgeschriebenen EDR für neue Fahrzeugtypen einzuführen [9]. Auch China wird ab Januar 2021 einen EDR gesetzlich vorschreiben [10]. Die genaue Ausgestaltung wird in einer eigens dafür gegründeten informellen Arbeitsgruppe (IWG EDR/DSSAD) erarbeitet und ist noch nicht vollständig abgeschlossen [3]. Speziell seitens Hersteller bzw. der Zulieferindustrie wird ein EDR ähnlich dem US-Standard favorisiert. Dieser Eindruck ließ sich bei den bisherigen Sitzungen bzw. Telekonferenzen der IWG EDR/DSSAD gewinnen, denen die Autoren beiwohnten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die derzeitigen und geplanten DSSAD- und EDR-Lösungen nicht ausreichend sind und wohl auch nicht ausreichend sein werden, um Verkehrsunfälle mit automatisierten und vernetzten Fahrzeugen vollständig aufklären zu können [8].

Parallel zu diesen Entwicklungen ist zu konstatieren, dass zahlreiche Hersteller dazu übergehen, nicht standardisierte Daten über einen Unfallhergang selbständig aufzuzeichnen [11–13]. Erfahrungswerte aus der täglichen Berufspraxis des Hauptautors als Unfallanalytiker zeigen, dass der Umfang und die Triggerung der Daten in diesem Zusammenhang meist sehr intransparent ist. Des Weiteren ist festzuhalten, dass in der Regel die Hersteller darüber entscheiden, welche Daten – beispielsweise im Rahmen einer Gerichtsverhandlung – einem unabhängigen Experten zugänglich gemacht werden.

Auf dem Gebiet der Elektromobilität geht China darüber hinaus einen Sonderweg. Dort ist verpflichtend vorgeschrieben, dass sämtliche Daten der Traktionsbatterie, inklusive zugehörige Umgebungsvariablen, im Rahmen eines Real Time Monitorings (RTM) in Echtzeit von Bussystemen des Fahrzeugs auf eine Übertragungseinheit übersetzt werden, die dann, mit entsprechender Pufferung, an Regierungsserver die Klardaten sendet [14].

## **2. Dringlichkeit eines leistungsfähigen EDR-Konzepts**

Ausgehend von diesem Status quo ist, aus Sicht eines unabhängigen Unfallanalytikers, schon jetzt bei modernen Fahrzeugen und in Zukunft noch verstärkt bei Fahrzeugen mit einem höheren Automatisierungsgrad die im Folgenden dargestellte Problematik zu beobachten. Um den Sachverhalt plakativ darstellen zu können, wird ein beispielhaftes Unfallszenario beleuchtet:

Nehmen wir an, ein modernes Fahrzeug mit Fußgänger- und Fahrradfahrererkennung ist in einen Unfall mit einem Pedelec-Fahrer involviert. Dieser kreuzt, nach vorheriger Parallelfahrt,

unvermittelt und ohne Handzeichen die Fahrspur des PKWs unmittelbar bevor dieser auf gleicher Höhe ist. Der Pedelec-Fahrer wird streifend vom PKW getroffen und auf Grund des Kopfkontaktes des Pedelec-Fahrers mit der rechten A-Säule verstirbt dieser noch an der Unfallstelle.

Rein objektiv war dieser Unfall physikalisch nicht vermeidbar, da der Pedelec-Fahrer so unvermittelt die Fahrspur des PKWs kreuzte, dass Abwehrreaktionen auch mit modernster Technik nicht möglich waren. Aufgrund der großen Massendifferenzen und der streifenden Kollision zeichnet der mit einer EDR-Funktionalität ausgestattete PKW keine Daten in der Airbag-ECU auf. Die integrierten Assistenzsysteme im Fahrzeug haben jedoch den Unfall registriert und in den nur herstellerseitig zugänglichen Datenspeicher abgelegt. Neben detaillierten fahrdynamischen Daten, sowie Daten über Funktionszustand und Wirkweise der einzelnen Assistenzsysteme sind auch Videodaten inklusive der durch Sensorfusion erzeugten Objektdaten der Fahrzeugumgebung beim Unfall abgelegt. Diese Daten könnten die technische Unvermeidbarkeit des Unfalls durch den Fahrer des PKW, bzw. durch die verbauten Assistenzsysteme zweifelsfrei nachweisen.

Da die Fahrzeugendlagen noch vor Eintreffen der Polizei oder eines Sachverständigen aufgrund der Verkehrslage geändert wurden, führt eine nachträgliche, klassische Unfallanalyse ohne diese Zusatzdaten zu sehr großen Toleranzen. Dies hat zur Folge, dass bei einer Betrachtung zu Gunsten des Pedelec-Fahrers der Unfall für den PKW Fahrer oder auch für die verbauten Assistenzsysteme vermeidbar gewesen wäre.

Im Rahmen eines Zivilverfahrens streben die Hinterbliebenen des Pedelec-Fahrers ein Gerichtsverfahren gegen den Fahrer an. In der Betriebsanleitung des Fahrzeuges wird eindeutig darauf hingewiesen, dass Fahrzeugdaten, über den EDR hinaus, im Rahmen eines Unfalls gespeichert werden. Mit Berufung auf die Datenschutzgrundverordnung verlangt der Fahrer vom Hersteller die Herausgabe dieser Daten. Da das unfallbeteiligte Fahrzeug über Over-The-Air-Dienste verfügt, wurden die unfallrelevanten Daten bereits kurz nach dem Unfall an den Hersteller automatisiert weitergeleitet und dieser war in der Lage, die Daten zu interpretieren. Außerdem ist mit diesen Daten nachzuweisen, dass der Unfall für den Fahrer unvermeidbar war. Wenn auch der Unfall für das System unvermeidbar war, so ist plausibel nachvollziehbar, dass die Daten in diesem Fall auch dem Gericht zur Verfügung gestellt werden.

Gesetzt den Fall, dass jedoch der Hersteller bei der Analyse des Unfalls zu dem Schluss kommt, dass Fehlfunktionen im Bereich der verbauten, aktiven Assistenzsysteme vorlagen

und diese eventuell unfallursächlich oder mitursächlich waren, so ist fragwürdig, ob der vollständige Datensatz an entsprechende Gerichte übermittelt wird. Der Hersteller wird im Zweifelsfall, aufgrund der fehlenden Standardisierung dieser Daten, darauf abstellen, dass bestimmte Datenelemente bei dieser konkreten Unfallsituation und dem konkreten Fahrzeug nicht gespeichert wurden.

Des Weiteren wären Konstellationen möglich, in denen die deutlich umfangreicheren Daten, wie sie in den herstellerproprietären Systemen aufgezeichnet wurden, eventuell aufgezeichneten EDR-Daten widersprechen. Ein offensichtliches Beispiel wäre dazu, dass im Rahmen der Spezifikation des US-EDR lediglich die angezeigte Geschwindigkeit aufgezeichnet wird, welche beispielsweise bei einer Vollbremsung mit ABS-Regeleingriff durchaus um 10% von der tatsächlichen Schwerpunktgeschwindigkeit des Fahrzeuges abweichen kann [15].

Diese Situation wird aus Sicht der Autoren zu der grotesken Situation führen, dass – je nach Hartnäckigkeit und Wissensstand der Verfolgungsbehörden, bzw. der involvierten Sachverständigen und je nach Mitwirkungsseifer der Hersteller – Unfälle aufklärbar oder nicht aufklärbar sind, obwohl die gespeicherten Daten tatsächlich in jedem Fall eine sichere Aufklärung zuließen. Die gerichtliche Praxis in Deutschland zeigt heute schon, dass die Hersteller vermehrt von den Gerichten bezüglich dieser Daten angefragt werden. Es ist davon auszugehen, dass diese Verfahrensweise mit steigender Marktdurchdringung von (teil-) automatisierten Fahrzeugen weiter ansteigen wird, mit einem entsprechenden Arbeitsaufwand für die Hersteller.

Zusätzlich kann bereits heute festgestellt werden, dass im vermehrten Maße externe Datenquellen, wie beispielsweise Smartphone-Daten, Daten von Dashboard- und Überwachungskameras, sowie Daten von intelligenter Infrastruktur in Gerichtsprozesse eingeführt werden [16]. Dies wird folglich zu einem wahren Datenwust mit sich teilweise widersprechenden Datenquellen führen. Ohne eine standardisierte Datenbasis bedeutet dies langwierige und kostenintensive Gerichtsprozesse, bei denen nicht mit Sicherheit alle Unfälle aufgeklärt werden können und Restzweifel bestehen bleiben dürften [17]. Wenn allerdings, gerade im Hinblick auf das automatisierte Fahren, nach Verkehrsunfällen ein Restzweifel bezüglich der ordnungsgemäßen Funktion des Systems verbleibt, so hat dies Potential, die Akzeptanz bzw. das Vertrauen in diese Technologie zu untergraben. Dadurch erschwert sich deren Vermarktung erheblich [18]. Die Gesellschaft muss auf diesem Weg der Digitalisierung und Vernetzung mitgenommen werden und es ist von vitaler Bedeutung, dass Vertrauen in die Technologie auf-

gebaut werden kann, wobei eine vollständige Unfallaufklärung und der Ausschluss von Systemfehlern von zentraler Bedeutung ist. Die Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen durch das System muss in jedem Fall gegeben sein.

Vor diesem Hintergrund wurde die informelle Arbeitsgruppe AHEAD (Aggregated Homologation proposal for Event data recorder for Automated Driving) gegründet, um eine Standardisierung der notwendigen Datenbasis für einen zukünftigen EDR voran zu treiben [19]. Ziel ist es dabei, so wenige Daten wie nötig aufzuzeichnen, um möglichst alle Unfälle beweissicher und ohne Restzweifel aufklären zu können. Dieser Grundsatz der Datensparsamkeit und des Datenschutzes wurde bei AHEAD höchste Priorität eingeräumt. Der prinzipielle Aufbau der Datenbasis ist auf Bild 2 zu sehen.

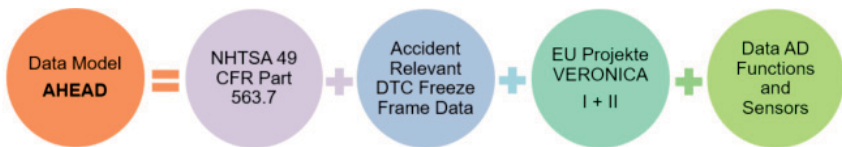


Bild 2: Schematischer Aufbau der Datenliste von AHEAD [20]

Spezieller Fokus wurde bei AHEAD auf Datenelemente gelegt, die sich mit ADAS / HAD / AD, V2X-Kommunikation, Elektromobilität und Cyber Security befassen, da diese in den bisherigen EDR-Konzepten nicht ausreichend berücksichtigt werden. Zusätzlich zu dieser Arbeit wird in der Forschungsgruppe der Autoren an der Technischen Hochschule Ingolstadt systematisch eine wissenschaftliche Lösung für einen zukünftigen EDR auf unabhängiger Basis erarbeitet.

Die grundsätzliche Vorgehensweise ist dabei wie folgt:

Basierend auf dem Expertenwissen der Autoren, in Verbindung mit entsprechenden Datenbanken der DEKRA Automobil GmbH sowie öffentlich zugänglicher Unfalldatenbanken [21] werden systematisch Unfallszenarien erarbeitet, die auch unter Berücksichtigung des US-EDR mit klassischer Unfallanalyse nicht ausreichend aufklärbar sind. Anschließend werden Datenpunkte identifiziert, mit deren Hilfe die Unfallszenarien in Zukunft ohne Verbleib von Restzweifel mit höchstmöglicher Genauigkeit aufklärbar sind. Diese Datenpunkte werden durch die Auswertung realer Unfälle, bei denen entsprechende aktive Sicherheitssysteme eine zentrale Rolle spielen, sowie durch speziell designte Versuche auf den Testgeländen der Technischen

Hochschule Ingolstadt (Indoor-Versuchshalle sowie Outdoor-Versuchsgelände) sowie auf dem Areal des DEKRA Automobil Test Centers (DATC) in Klettwitz validiert.

Die einzelnen Unfallszenarien werden, ähnlich wie bei der Beauftragung eines Sachverständigen durch ein Gericht, unfallanalytisch so vollständig wie möglich bearbeitet, womit die Notwendigkeit der einzelnen Datenpunkte durch ein praxisnahes Verfahren eingeschätzt werden kann. Zusätzlich ist es für eine Unfallrekonstruktion der Zukunft nötig, diese Szenarien auch virtuell mit den entsprechenden Tools abzubilden und damit auch Fragestellungen zur Vermeidbarkeit des Unfalls für den Fahrer, bzw. das System beantworten zu können.

Diese Vorgehensweise soll am Beispiel eines expliziten Datenpunktes, nämlich der Aufzeichnung von Videos der Systemkameras im Folgenden aufgezeigt werden.

### **3. Notwendigkeit der Speicherung von Systemvideos und zugehörigen Objektdaten – ein Video sagt mehr als 1000 Terabyte**

Es zeichnet sich ab, dass die Speicherung von Systemvideos innerhalb eines EDR-Konzepts von vielen Stakeholdern als kritisch angesehen wird. Dabei werden zuallererst datenschutzrechtliche Gründe angeführt, da bei Außenvideos beispielsweise auch unbeteiligte Personen oder Fahrzeuge eventuell mitaufgezeichnet werden könnten. Innenraumvideos werden als noch kritischer angesehen, da hier teilweise von einem Eingriff in die Privatsphäre der Insassen ausgegangen wird [3].

Aus unfallanalytischer Sicht besteht jedoch genau der Vorteil eines eventbasierten Ansatzes darin, dass die Daten nur im Falle eines relevanten Ereignisses (in der Regel eines Unfalls) gespeichert werden. In diesem Fall wären die aufgezeichneten Personen und Fahrzeuge nicht unbeteiligt, sondern Zeugen des Unfalls.

Um aus technischer Sicht die Notwendigkeit der Speicherung zumindest von Außensystemvideos zu illustrieren, soll folgendes Beispiel eines realen Unfalls dienen.

An einer Straßeneinmündung, an der die Verkehrsregelung „Rechts vor Links“ gilt, kommt es zu einem Unfall zwischen einem von rechts kommendem Motorrad und dem aus Sicht des Motorradfahrers von links kommendem PKW-Fahrer.

Bei der klassischen Unfallaufnahme ist die hohe Wurfweite des Motorradaufsassens auffällig. Mit entsprechenden virtuellen Rekonstruktionsmethoden lässt sich damit eine überhöhte Geschwindigkeit des Motorradfahrers nachweisen. Der Unfall fand in einer Tempo-30-Zone statt. Bei seriöser Berechnung ist, trotz sehr genauer dreidimensionaler Unfallaufnahme, auch mit den neuesten Methoden aufgrund der Unsicherheiten bei den Anknüpfungstatsachen sowie



den mathematischen Grenzen der verwendeten Rechenmodelle von Toleranzen in einer Größenordnung von bis zu  $\pm 10$  km/h bei der Kollisionsgeschwindigkeit des Motorradfahrers auszugehen. Dies zeigen ähnlich gelagerte Fälle aus der Berufspraxis des Hauptautors.

Von der vorkollisionären Einlaufphase beider Fahrzeuge fehlen, aufgrund verbauter ABS-Systeme bzw. nicht eingeleiteter Bremsung, jegliche Spuren. Darüber hinaus ist beim unfallbeteiligten PKW kein unabhängig auslesbarer EDR verbaut. Selbst wenn dies der Fall wäre, wäre aufgrund der stark streifenden Kollision nicht zwangsläufig von einer Speicherung des Unfalls im EDR auszugehen, da die Trigger Schwellen nach 49 CFR Part 563 beim gegenständlichen Unfall nicht erreicht wurden. Beim beteiligten PKW werden jedoch umfangreiche Daten, auch gepuffert über ein SD-Kartensystem, proprietär an einen Server des Herstellers geschickt. Dabei ist intransparent für unabhängige Dritte nachvollziehbar, in welchem Umfang Daten permanent bzw. eventbasiert gesendet werden. Im konkreten Fall konnten, über eine entsprechende staatsanwaltschaftliche Anordnung beim Hersteller, sämtliche Systemvideos, die den Unfall dokumentieren, gesichert werden. Ein Standbild aus der Frontkamera ist auf Bild 3 zu sehen.



Bild 3: Standbild aus Systemvideo (Frontkamera) zum unmittelbaren Kollisionszeitpunkt (links) und Sichtverdeckung durch VW Touran in der Annäherung aus Sicht nach vorne gerichtete Flankenkamera (rechts)

Unter Zuhilfenahme dieser Videos ist nun der Unfall und insbesondere die Unfallursache erheblich genauer aufklärbar. Die Videos zeigen, neben der nachvollziehbaren erhöhten Geschwindigkeit des Motorradfahrers, auch die deutliche Sichtverdeckung für den Pkw-Fahrer

durch einen querenden VW Touran. Die genaue Weg-Zeit-mäßige Synchronisation der unfallbeteiligten Fahrzeuge mit dem VW Touran ist ohne das entsprechende Videomaterial nicht möglich.

Der beteiligte Pkw nimmt über seine verbauten Sensorsysteme und deren Sensorfusion seine Umwelt wahr. Mithilfe dieser Sensorfusionsdaten können Objekte erkannt bzw. verfolgt werden. Diese Objektinformationen – also zum Beispiel wann der Pkw das Motorrad erkannte und als Gefahr einstufte – wären von höchstem Interesse für eine weiterführende Unfallanalyse. Damit könnte nämlich ein Reaktionspunkt des Fahrzeuges ermittelt werden und dann, mit entsprechend aufwendiger virtueller Simulation, Vermeidungsszenarien durch das Fahrzeug betrachtet werden. So ließe sich beispielsweise auch nachweisen, dass der Unfall für das System vermeidbar oder unvermeidbar war.

Grundvoraussetzung für eine derartige Vorgehensweise ist jedoch, dass die Objektdaten in Verbindung mit den Systemkameradaten zur Verfügung stehen. Durch diese Verfahrensweise kann nämlich, unter perspektivisch korrekter Einblendung der Objektdaten in die Videodaten, eine Korrelation zwischen dem, was das Fahrzeug gesehen hat, zu dem, was ein Mensch über die Videos sehen würde, hergestellt werden [17].

Dabei könnte beispielsweise nachvollzogen werden, ob die Begrenzung eines Objekts richtig erkannt wurden bzw. könnten in Verbindung mit einer sehr genauen 3D-Unfallstellenvermessung und über die Auswertung der Systemvideos auch Nachrechnungen der vom System detektierten Entfernungen und Geschwindigkeiten durchgeführt werden.

Somit ließen sich auch Hinweise auf fehlerhafte oder fehlerhaft kalibrierte Sensorsysteme leichter detektieren.

Diese Verfahrensweise könnte auch Anwendung finden bei einer Hauptuntersuchung der Zukunft, wenn die Prüfumgebung sehr genau in 3D bekannt ist und Zugriff auf die Objektdaten des Fahrzeuges besteht [22].

Grundsätzlich ist auszuführen, dass für eine derart genaue und aufwändige Unfallrekonstruktion Systemvideos in Verbindung mit korrespondierenden Objektdaten eine zwingende Voraussetzung darstellen. Aus diesem Grund sollten diese Videos auch in einem Eventdatenrekorder der Zukunft gespeichert werden. Zumal Bilder bzw. Videos in der Lage sind, im Rahmen eines Gerichtsverfahrens, den Unfallablauf für einen technischen Laien, wie dies ein Richter

meist ist, viel verständlicher und plastischer darzustellen, als dies andere Aufzeichnungsdaten könnten. Dabei ist jedoch auch darauf hinzuweisen, dass optische Effekte, wie beispielsweise Objektivverzerrungen und andere Besonderheiten der verwendeten System-Kameras zu berücksichtigen sind, um falsche Eindrücke zu vermeiden. Die dafür notwendigen Anpassungen der Videos und Blickwinkel ist nicht trivial und sollte einer ganzheitlichen Unfallanalyse vorbehalten bleiben.

Die Verwendung solcher Videos würde zu deutlich mehr Rechtssicherheit führen, da Unfälle generell erheblich besser aufgeklärt werden könnten bzw. es ließen sich Unfallarten klären, die bis dato überhaupt nicht aufklärbar sind. Beispielsweise wäre beim oben dargestellten Unfall die genaue Sichtverdeckung durch den VW Touran ohne Videos nicht aufklärbar.

Zusätzlich würde sich, wenn diese sehr genau rekonstruierten Unfälle möglichst zeitnah in eine anonymisierte Unfalldatenbank gespeist würden, noch folgender Vorteil für die Entwicklung von automatisierten und vernetzten Fahrzeugen ergeben:

Die Hersteller könnten nicht nur aus den Unfällen mit ihren eigenen Fahrzeugen, sondern aus allen relevanten Unfällen lernen. Beispielsweise ließe sich über diese Methode virtuell sehr schnell nachprüfen, ob ein bestimmtes Unfallszenario, das für das System eines Mitbewerbers schwer zu erkennen war und deshalb zum Unfall geführt hat, auch für das eigene System ein Problem darstellt.

#### **4. Ausblick**

Analog zu der oben ausgeführten Begründung, warum Systemvideos bzw. Umgebungsdaten im EDR der Zukunft gespeichert werden sollten, müsste jeder Datenpunkt bzw. jeder Datenpunkte-Cluster der zusätzlich in der von AHEAD ausgearbeiteten Datenliste enthalten ist, genau verifiziert werden.

Dabei erscheinen reale Unfälle in Verbindung mit zielgerichtet aufgebauten Laborversuchen als am sinnvollsten, um die Notwendigkeit eines Datenpunktes bzw. dessen detaillierte Ausgestaltung bezüglich Genauigkeit und Auflösung zu belegen. Dazu sind im Forschungszentrum CARISMA bereits weiterführende Versuche in Zusammenarbeit mit DEKRA bzw. der FSD GmbH geplant.

In einem Gesamtkonzept für eine Unfallanalyse der Zukunft stellt das vorgestellte EDR-Konzept jedoch nur eine wichtige Säule dar, um in Zukunft besser Unfälle aufklären zu können und die sich daraus ergebenden Lessons Learned zielgerichteter an die entsprechenden Stellen weiterleiten zu können. Bei der derzeitigen forensischen Unfallanalyse ist es häufig so, dass aufgrund des Alleinverwertungsrechts von Staatsanwaltschaften und Gerichten ein erstelltes unfallanalytisches Gutachten meist nur für gerichtsrelevante Fragestellungen herangezogen wird. Schlussfolgerungen, beispielsweise über besonders kritische Unfallszenarien für bestimmte Assistenzsysteme oder aber Probleme bei der Straßeninfrastruktur (z.B. unübersichtliche Verkehrsführung) werden meist nicht durch die Gutachten adressiert bzw. Hersteller oder Straßenverkehrsämter haben keinen Zugriff auf diese Gutachten.

Vor diesem Hintergrund wurde durch die Autoren ein ganzheitlicher Ansatz gewählt, um die Unfallanalyse der Zukunft auf ein neues Niveau zu heben (vgl. Bild 4).

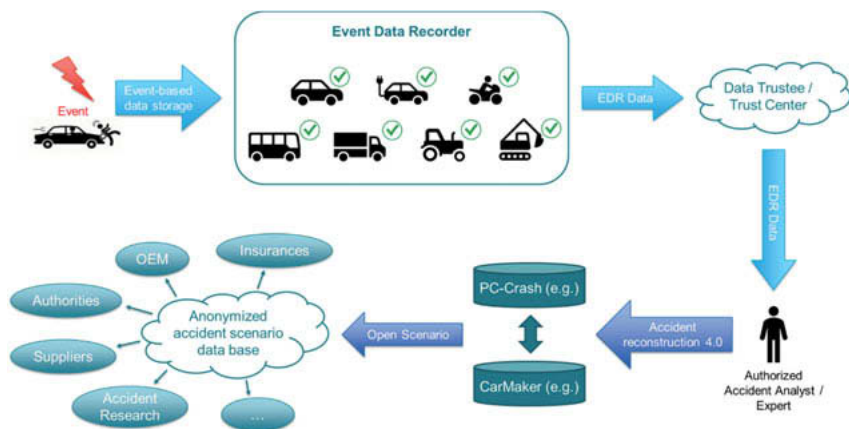


Bild 4: Gesamtkonzept für eine Unfallanalyse der Zukunft

Dabei werden die bei einem Event generierten Daten zunächst im EDR abgelegt und dann, über eine gesicherte Datenverbindung zu einem Datentreuhänder über eine Over-the-Air-Schnittstelle automatisiert nach dem Event versandt. Dies hat den Vorteil, dass beispielsweise bei einem Brand, bei dem der EDR und dessen Daten potentiell vernichtet werden könnten, diese Daten, bei entsprechender Netzabdeckung, durch den Datentreuhänder gesichert werden. Wenn sichergestellt ist, dass die Daten vollumfänglich, integer und authentisch beim Datentreuhänder angekommen sind, könnten sie auch am Fahrzeug physisch gelöscht werden. Dies

hätte den Vorteil bei einer Veräußerung des Fahrzeuges, dass eventuelle Unfalldaten des Verkäufers nicht mehr durch einen Käufer eingesehen werden könnten, was aus datenschutzrechtlichen Gründen wünschenswert wäre. Man könnte sich auch vorstellen, dass bestimmte Daten, wie Traktionsbatteriekenwerte oder Kilometerstand, die wertentscheidend für ein Fahrzeug sind, nicht überschreibbar auf dem Eventdatenrecorder geloggt werden und dann beispielsweise durch einen Käufer oder entsprechenden Sachverständigen eingesehen werden könnten.

Zusätzlich würde sich bei einer Echtzeitzugriffsmöglichkeit des EDR auf Bussysteme des Fahrzeuges anbieten, hoheitliche Prüfungen bei der Hauptuntersuchung oder Abgasuntersuchung über die EDR-Anbindung an das Fahrzeug durchzuführen. Dass dies technisch möglich ist, zeigt das schon in China vorgeschriebene Real Time Monitoring (RTM) bei Elektrofahrzeugen [14]. Dabei ergeben sich vollkommen neue Möglichkeiten für eine Hauptuntersuchung der Zukunft, um die immer komplexer werdenden Sensorsysteme hinsichtlich Fehlfunktionen und korrekter Kalibrierung autark vom Fahrzeugsystem zu überprüfen. Gleichzeitig ließen sich damit bei der Hauptuntersuchung auch die vom EDR aufgezeichneten Werte hinsichtlich der vorgegebenen Toleranzen überprüfen.

Eine Over-the-Air-Lösung über einen Datentreuhänder hätte zudem den Vorteil der einfachen Handhabung durch entsprechend autorisierte Unfallanalytiker oder Experten, die auf die Daten bei einer webbasierten Lösung praktikabel zugreifen könnten.

In Verbindung mit einer Unfallrekonstruktion auf neuestem Stand, unter Einbeziehung einer sehr genauen 3D-Unfallstellenvermessung mit Ausschöpfung sämtlicher Möglichkeiten der digitalen Spurensicherung, ließe sich damit auch ein sehr genaues, virtuelles Szenario des Unfallhergangs rekonstruieren. Dieses ließe sich anonymisieren und in einem Open-Szenario-Format in eine entsprechende Unfallszenarien-Datenbank transferieren, auf die alle interessierten Stakeholder zugreifen könnten.

Damit würde eine derartige Unfallrekonstruktion der Zukunft drei wesentliche Aufgaben hervorragend erfüllen:

Als erstes ist zu nennen, dass durch dieses Verfahren Rechtssicherheit und Datenschutz für alle gewährleistet wird. Unfälle können sicher aufgeklärt werden und sowohl der Hersteller als auch betroffene Fahrer können sich gegebenenfalls exkulpieren. Das schafft Vertrauen auf allen Seiten.

Zusätzlich können durch die deutlich genauer rekonstruierten Unfälle anonymisierte Unfallszenarien-Datenbanken gespeist werden, die von enormem Wert für eine Vielzahl von Stakeholdern wären. Insbesondere wäre die zeitnah aus einem Unfall abzuleitende Schlussfolgerung für die Entwicklung speziell von hochautomatisierten Fahrzeugen sowie für die Weiterentwicklung einer sicheren Verkehrsinfrastruktur von bedeutendem Wert. Diese Aspekte werden bei der bisherigen klassischen Unfallanalyse weitestgehend vernachlässigt.

Als letzter Punkt lässt sich anführen, dass durch entsprechenden Zugriff auf EDR-Daten in Echtzeit die Qualität von hoheitlichen Überwachungsuntersuchungen wie Hauptuntersuchungen oder Abgasuntersuchungen erheblich gesteigert werden könnten.

## References

- [1] *Straßenverkehrsgesetz (StVG) § 63a Datenverarbeitung bei Kraftfahrzeugen mit hoch- und vollautomatisierter Fahrfunktion: StVG § 63a*, 2017.
- [2] United Nations Economic and Social Council, *Revised Framework document on automated/autonomous vehicles: World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations - 178th session*. [Online] Available: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjbs3nr5TIAhXFa1AKHcdKAtEQFjABegQI-AxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.unece.org%2Ffileadmin%2FDAM%2Ftrans%2Fdoc%2F2019%2Fwp29%2FECE-TRANS-WP29-2019-34-rev.1e.pdf&usg=AOvVaw0bbJQEz-Al-D1ek4uC65s>. Accessed on: Oct. 11 2019.
- [3] UNECE, *Working Party on Automated/Autonomous and Connected Vehicles (GRVA): DSSAD / EDR*. [Online] Available: <https://wiki.unece.org/pages/viewpage.action?pageId=87621709>.
- [4] NHTSA, *Code of Federal Regulation (CFR) 49: Part 563 - Event Data Recorders*. [Online] Available: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2018-title49-vol6/xml/CFR-2018-title49-vol6-part563.xml>. Accessed on: Oct. 13 2019.
- [5] European Commission, *Mobility and Transport - Road safety: Black boxes/ in-vehicle data recorders*. [Online] Available: [https://ec.europa.eu/transport/road\\_safety/specialist/knowledge/esave/esafety\\_measures\\_known\\_safety\\_effects/black\\_boxes\\_in\\_vehicle\\_data\\_recorders\\_en](https://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/esave/esafety_measures_known_safety_effects/black_boxes_in_vehicle_data_recorders_en). Accessed on: Oct. 13 2019.
- [6] European Commission, *Vehicle categories*. [Online] Available: <https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/vehicle-categories/>. Accessed on: Oct. 07 2019.

- [7] S. Dürnberger and Kreutner Melanie, "EDR-Daten heute und in Zukunft," *VKU*, 13 Oct., pp. 328–341, 2017, <https://www.vkuonline.de/edr-daten-heute-und-in-zukunft-2023508.html>.
- [8] M. Kreutner and K. Böhm, "What should an EDR for automated vehicles look like from an accident analyst's point of view?: An elaboration of the informal working group AHEAD," Ingolstadt, Mar. 13 2018.
- [9] European Commission, *European Commission - Press release: Road safety: Commission welcomes agreement on new EU rules to help save lives*. Brüssel, 2019.
- [10] UNECE, *Working Party on Automated/Autonomous and Connected Vehicles (GRVA): EDR/DSSAD 1st session*. EDR-DSSAD-01-06 Overview of EDR. [Online] Available: <https://wiki.unece.org/pages/viewpage.action?pageId=87621710>. Accessed on: Oct. 11 2019.
- [11] National Transportation Safety Board (NTSB), *Office of Highway Safety: Tesla - Vehicle Automation Data Summary Report*. [Online] Available: <https://dms.nts.gov/pub-dms/search/hitlist.cfm?docketID=62683&CFID>. Accessed on: Oct. 14 2019.
- [12] National Transportation Safety Board (NTSB), *Office of Highway Safety: Tesla - Vehicle Data Recorder Specialist's Factual Report*. [Online] Available: <https://dms.nts.gov/pub-dms/search/hitlist.cfm?docketID=62683&CFID>. Accessed on: Oct. 14 2019.
- [13] Audi AG, "Handbuch Audi Q3," 2018.
- [14] *Technical specification of remote service and management system for electric vehicles - Part 3: Communication protocol and data format*, GB/T 32960.3, 2016.
- [15] Peter Vertal, Luboš Nouzovský, Michal Frydryn, Tomáš Mičunek, Zdeněk Svatý, Eduard Kolla, "Auswertung von CDR-Crashversuchen," *VKU*, no. 10, pp. 328–337, 2018.
- [16] N. Raith, *Das vernetzte Automobil: Im Konflikt zwischen Datenschutz und Beweisführung*, 1st ed.: Springer Vieweg, 2019.
- [17] H.-G. Schweiger, C. Fother, and K. Böhm, "Event Data Recorder für automatisierte Fahrzeuge: Rechtssicherheit und Datenschutz für alle," *Automobil Elektronik*, März 2019, pp. 48–51, 2019, <https://www.automobil-elektronik.de/blog/2019/04/15/automobil-elektronik-032019/>.
- [18] B. John, *Aktuelle Deloitte-Studie ergibt: Verbraucher haben wenig Vertrauen ins autonome Fahren*. [Online] Available: <https://www.automobilwoche.de/article/20190305/NA-CHRICHTEN/190309952/aktuelle-deloitte-studie-ergibt-verbraucher-haben-wenig-vertrauen-ins-autonome-fahren>.

- [19] AHEAD, *AHEAD (Aggregated Homologation-proposal for EventRecorderData for Automated Driving): Rechtssicherheit und Datenschutz für alle*. [Online] Available: <https://www.thi.de/forschung/carissma/technologiefelder/sichere-elektromobilitaet/ahead/>. Accessed on: Oct. 14 2019.
- [20] M. Kreutner, C. Lauterwasser, and J. Gwehenberger, "Data Model "AHEAD" - Details and Additions," Barcelona, Spain, Oct. 24 2019.
- [21] GIDAS, *German In-Depth Accident Study*. [Online] Available: <https://www.gidas.org/willkommen/>. Accessed on: Oct. 15 2019.
- [22] FSD Zentrale Stelle nach StVG (2019), Ed., *Präsentationsstand: ,Umfeldsensorik-Prüfen 21' VdTÜV/DEKRA: Sachverständigentag (SVT), Berlin, Feb. 2019.*



# Predicted crash configurations for Autonomous Driving vehicles in mixed German traffic for the evaluation of occupant restraint system

**Martin Östling, Hanna Jeppsson, Nils Lubbe,**  
Autoliv Research, Vårgårda, Sweden

## Zusammenfassung

Autonome Fahrzeuge werden weiter verunfallen, zumindest solange sie den Verkehrsraum mit nicht-autonomen Fahrzeugen teilen. Eine Vorhersage, wie genau diese Unfallszenarien aussehen werden ist notwendig, um zukünftige Rückhaltesysteme zu entwickeln und Insassen effektiv zu schützen. In der hier vorliegenden Studie wird eine Vorhersage anhand von numerischen Simulationen konzeptioneller autonomer Fahrfunktionen und der Vermeidbarkeit und Milderung von Unfällen in der GIDAS PCM Datenbank durchgeführt. Die Unfälle, die trotz autonomer Fahrfunktion nicht vermieden werden können, wurden in repräsentative Gruppen aufgeteilt, um zusammen mit den vorhergesagten Unfallgeschwindigkeiten als Lastfälle für die Entwicklung und Evaluation zukünftiger Rückhaltesysteme zu dienen. Fünf Szenarien wurden herausgearbeitet:

- Seitenaufprall, Insassen abgewandte Seite, Kollisionspartner von rechts
- Seitenaufprall, Insassen zugewandte Seite, Kollisionspartner von links
- Frontalaufprall, Kollisionspartner von leicht rechts
- Frontalaufprall, Kollisionspartner von leicht links
- Frontalaufprall, Kollisionspartner schräg von rechts

## Abstract

Advanced Driver Assistance Systems (ADASs) effectively reduce the number and severity of specific types of crashes (e.g., pedestrian, rear-end, run-off road, loss-of-control, and skidding). Autonomous Driving (AD) vehicles, an evolution of ADASs, can avoid many types of crashes by acting like a safety-minded driver: obeying traffic rules with respect to speed limits, right-of-way, and traffic lights—and adapting proactively to road and weather conditions. However, it is unlikely that all crashes will be avoided. In particular, mixed traffic, comprising both AD and manually driven (MD) vehicles, remains a challenge.

The objective of this study is to create detailed intersection-related crash configurations, to be used when designing ADs' future occupant restraint systems, which simulate the situations that AD vehicles will be exposed to in mixed traffic.

First, a virtual representation of an AD vehicle was defined and used in two sets of simulations, baseline and treatment. Data from German In-Depth Accident Study (GIDAS) database and the related Pre-Crash Matrix (PCM) were used to calculate the unavoidable crashes. Second, crashes from the treatment simulation were clustered according to impact angles to define representative crash configurations. Finally, for each cluster the two vehicles' impact velocities were described as bivariate distributions, giving ranges for which restraint systems should be developed.

This process resulted in five well-defined crash configurations to be used when designing occupant restraints for future AD vehicles:

- Side far-side, impact forward of the passenger compartment, manual driven vehicle approaching from the right
- Side near-side, impact forward of the passenger compartment, manual driven vehicle approaching from the left
- Oblique head-on, manual driven vehicle approaching from the right
- Oblique head on, manual driven vehicle approaching from the left
- Frontal oblique far-side, manual driven vehicle approaching from the right

## 1. Introduction

The number of road accident fatalities in the European Union (EU) fell by 41% between 2007 and 2016 [1], but about 25,600 people still lose their lives and 1.4 million people get injured in traffic accidents annually [2]. Almost half of all fatalities (46%) are passenger vehicle occupants [1]. As a result, improved vehicle safety through crash prevention and occupant safety features has been selected—together with improved infrastructure safety, safer road use, and effective post-crash care—as a cornerstone for the EU's next steps to "Vision Zero" [3].

Today, intersection-related crashes represent almost 50% of all injury crashes and almost 30% of all fatal crashes in the US [4]. In the EU almost 20% of all fatal crashes are intersection-related [5].

Advanced Driver Assistance Systems (ADASs) are effective at reducing specific types of crashes: pedestrian autonomous emergency brake (AEB) for pedestrian crashes [6-7], rear-end AEB for rear-end crashes [8-11], electronic stability control (ESC) for loss-of-control and skidding crashes [12-14], and lane departure warning for run-off-road crashes [9-11, 15]. The

introduction of new ADASs like intersection AEB (I-AEB) [16-19] and evasive steering (ES) [20-21] are predicted to reduce all types of crashes; however, the relative frequency of intersection crashes is predicted to increase [22-23].

Autonomous Driving (AD) vehicles can be seen as an evolution of ADAS: while certainly freeing up time otherwise spent driving for other activities and increasing individual mobility, the key motivation is to provide safe travel for everyone on the road by reducing the role of human error [3, 24]. These errors could be, for example, speeding, disregarding others' right-of-way or traffic lights, and failing to adapt proactively to road and weather conditions [24]. However, not all crashes can be avoided, even with AD vehicles. In particular, mixed traffic consisting of both AD and manually driven vehicles will continue to be a challenge for a long time [25]. This problem has been highlighted by the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) in their voluntary guidelines: "Given that a mix of vehicles with Automated Driving Systems (ADS) and those without will be operating on public roadways for an extended period of time, entities still need to consider the possible scenario of another vehicle crashing into an ADS-equipped vehicle and how to best protect vehicle occupants in that situation" [26, p.12]. Further, the EU's recommendation on sustainable mobility states: "new risks are emerging in the transition phase, some related to the functioning of highly automated vehicles in mixed traffic and the complex interaction between the driver and the vehicle" [27, p.3]. For AD vehicles in mixed traffic, intersection crashes will continue to be important, both for emergency pre-crash interventions and for occupant in-crash injury mitigation, as intersection scenarios are among the most complex and crash-prone of the traffic environment.

Developing occupant restraints for AD vehicles requires an understanding of which crash configurations, i.e. occupant loading directions and occupant kinematics, the restraint system should be designed for. AD vehicles might be exposed to different crash configurations (at least when driven in mixed traffic) compared to manual driven vehicles, due to the AD vehicles' ability to intervene before emergency situations occur, possibly leading to different types of emergency situations (where emergency intervention by steering and braking is needed). For this reason, it is important to predict crash configurations that are likely to be most frequent for future AD vehicles. Furthermore, vehicle interiors and occupant sitting positions and postures are expected to differ from current traditional seating (e.g., reclined or swivel seating, including the face-to-face position [28-30]). It is stated in Safety First for Automated Driving (2019) that "Occupant protection shall be ensured even when the customer has new uses for the interior that are made possible through automated driving systems" [31, p.9]. Thus, a certain configuration might be a low crash risk for a manual driven vehicle but a high crash risk for an AD vehicle.

Previous studies have estimated what types of crashes will still be unavoidable after introduction of AD vehicles [32-33], but no study has proposed the specific crash configurations that should be used for the development of occupant restraints for AD vehicles.

The objective of this study is to predict detailed intersection-related crash configurations that AD vehicles will be exposed to in mixed traffic in order to ensure the effectiveness and relevance of their occupant restraint systems. The study applies time history data from real crashes from the German In-Depth Accident Study (GIDAS) and the related Pre-Crash Matrix (PCM) database to a prospective method with a simulation framework. It has been suggested that this method inherently contains more surprise events than traffic simulations [34]. Well-defined and representative crash configurations were created from the large dataset of unavoidable crashes, to be used in future evaluations of occupant restraints for AD vehicles.

## 2. Method

To estimate which crash configurations an AD vehicle would be exposed to in intersection-related, mixed-traffic situations, a dataset of existing intersection crashes (Section 2.1) was created and a virtual representation of an AD vehicle was defined (Section 2.2). Two type of simulations were then performed on the dataset, baseline and treatment (Section 2.3). The impact angles were determined (Section 2.4). Baseline simulations reconstructed the time history data of each crash and validated the virtual model (Section 2.5). There were two treatment simulations: (a) the manual driven vehicle is violating a traffic rule or is at fault in some way (having caused the original crash) and the AD vehicle is trying to avoid the crash in the treatment simulation, and (b) the AD vehicle is at fault (having caused the original crash) and trying to avoid it in the treatment simulation (Section 2.6). The crashes from these two simulations were combined into one dataset and clustered (Section 2.6) according to the impact angles determined in Section 2.4, to determine representative crash configurations. Three pairs of impact velocities from each cluster were derived using bivariate distributions (Section 2.6).

### 2.1 Data collection

The GIDAS database, released August 2018, and the related GIDAS-PCM database were used in this study; crash collection started in 1999 in the areas surrounding Hanover and Dresden, Germany [35]. To be selected for investigation, the crash had to involve at least one suspected injury for at least one of the participants [36]. The GIDAS-PCM database gives time history data about the trajectories of the involved vehicles for the five seconds prior to the crash, as well as vehicle properties—and, if present, environment surroundings like road edges, road markings, and static objects [37].

Inclusion criteria for the current study were passenger vehicle-to-passenger vehicle intersection crashes involving exactly two vehicles, irrespective of injury outcome. A passenger vehicle was defined by the variable TYPEPCM (type of participant) in GIDAS-PCM. There were 1605 intersection crashes: 780 Straight Crossing Path (SCP), 470 Left Turn Across Path Opposite Direction (LTAP-OD), and 355 Left Turn Across Path Lateral Direction (LTAP-LD), according to the grouping presented by Lubbe et al. (2018) using the GIDAS variable UTYF [32]. Each crash involved two vehicles; therefore the 1605 crashes correspond to 3210 crashed vehicles, which are used in the baseline simulation; see Section 2.3.

## 2.2 Virtual AD vehicle representation

The virtual representation of an AD vehicle used in this study was defined in two steps. First an AD filter was applied to the dataset, which identified and removed crashes that a conceptual AD vehicle would inherently avoid by acting as a safety-minded driver: respecting all traffic rules, driving cautiously, and adapting to driving conditions (e.g., reducing speed below the speed limit if roads are icy or visibility is limited). The results were filtered according to the value of the GIDAS variable HURSU (main accident cause). The causation factors were reviewed and selected by identifying the effects from 'Safety-minded driving' and 'Cautious driving', as Lubbe et. al. did (2018) [32]. The complete list of accident causes that were removed from the dataset can be found in Appendix A. Thus, the dataset for the treatment simulation included (a) the 1605 original crashes plus (b) the 474 unavoidable crashes remaining after the AD filter was applied (that is, the crashes that an AD would not inherently be able to avoid).

In the second step, a detailed simulation model was designed using Autoliv's in-house simulation framework, PRAEDICO [34]. Each vehicle was modelled as a rectangle whose length and width was obtained from the individual crash in the GIDAS-PCM. The emergency intervention function was designed to represent a state-of-the-art AEB crash avoidance system in a future AD vehicle, including environment sensing, motion prediction, threat assessment by time-to-collision (TTC) estimate, and vehicle control. The estimated TTC was calculated by assuming constant acceleration until the point of contact for the equipped vehicle.

The AD AEB crash avoidance system includes requirements for sensor field-of-view (FoV), sensor range, sensor frame rate (time step), time to detection, and vehicle classification. Additionally, the crash avoidance system predicts both vehicle trajectories, assuming constant acceleration and turn rate [38]. A crash is foreseen if the predicted positions of the two vehicles intersect in time and space. A brake intervention is applied if a crash is predicted and the TTC falls below a predefined threshold. No reference value for TTC for a state-of-the-art intersection AEB system was found for an AD vehicle, so the TTC was set at either 1.2 s, 1.7 s or 2.2 s.

This range is well within the TTC limits assumed to be relevant for US LTAP-OD and SCP crashes (1.0 to 3.0 s) [18-19]. The braking function includes 0.2 s latency for pressure build-up, 66 m/s<sup>3</sup> brake rate [39-40] and a maximal deceleration given by the coefficient of friction between the tires and the road (retrieved from the GIDAS-PCM database) multiplied by 9.81 m/s<sup>2</sup>. Static obstructions in the line of sight could limit the sensors' functionality, but the sensors were otherwise modelled as ideal (without inaccuracies or performance limitations due, for example, to limited visibility due to bad weather conditions or darkness). The full technical specifications of the AEB crash avoidance system can be found in Appendix B.

### 2.3 Simulations

For each crash, the simulation framework uses the information on the vehicle dimension, vehicle trajectories and surroundings as recorded in the GIDAS-PCM database and checks if the approaching vehicle is within the field of view and sensor range of the equipped vehicle for each time step (40 Hz). If a crash is predicted and the TTC is less than the threshold value, the brake function activates, according to the AEB logic described in Section 2.2. The simulation runs each vehicle's movements and checks each time step, until a crash happens, or the vehicles pass each other, and then stops. Output from the simulations are whether the intervention was activated, the vehicle trajectories, and (if an impact occurred) the impact conditions (i.e., impact points, impact angles, and impact velocities).

Two types of simulations were conducted: (i) baseline simulations re-running each crash in the GIDAS-PCM dataset and (ii) treatment simulations in which (a) the AD vehicle is trying to avoid a crash that is caused by a manually driven vehicle or (b) the AD vehicle is causing the crash and trying to avoid it.

### 2.4 Impact angle definitions

The configuration of each crash was described by its impact angles: the AD vehicle impact angle (AD-IA), the manually driven vehicle impact angle (MD-IA), and the relative impact angle (RIA) between the two vehicles. The angles are defined as seen from the AD vehicle's perspective. The first point of contact (FPOC) of both vehicles (assumed to be rectangles) was used to calculate the three impact angles. For each vehicle, the angles were measured counter-clockwise of the heading direction (defined as the vehicle longitudinal axis without considering any possible effect of skidding on the vehicle velocity vector), with the origin in the geometric centre of each vehicle; see Fig. 1. The relative impact angle (RIA) between the two vehicles was calculated as the angle between the heading direction of the AD vehicle and the heading direction of the manually driven vehicle [41].

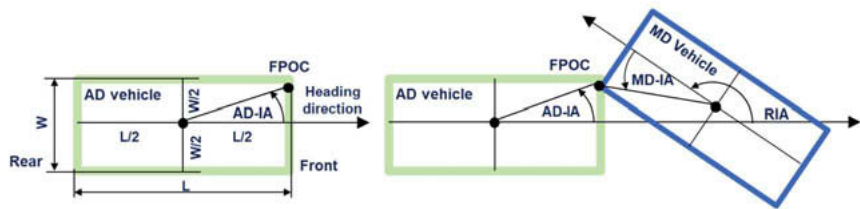


Fig. 1: Definition of impact angles; the light green rectangle represents the AD vehicle and the dark blue rectangle represents the manually driven (MD) vehicle.

The vehicles in the dataset have different dimensions and therefore different width/length ratios. This means that the angle that represents a corner impact could vary: a long, narrow vehicle has a smaller angle for the front left corner than a short, wide one. Hence, two differently shaped vehicles with identical angles can be impacted in slightly different locations. We quantified the inaccuracy of the angles we used by calculating the average and standard deviation of each vehicle's corner angle.

## 2.5 Validation of simulation model by baseline simulations

To validate the simulation model, the calculated impact velocities and impact locations from the baseline simulation of each crash were compared to values from the GIDAS-PCM dataset.

To validate the accuracy of the simulated impact velocities, the average difference between the two velocities (baseline and original) and its standard deviation were calculated.

The impact angles were divided into eight groups by impact location: Frontal, Frontal oblique near- and far-sides, Side near- and far-sides (corresponding to an impact to the vehicle passenger compartment), Rear oblique near- and far-sides, and Rear impact; see Fig. 2. To validate the accuracy of the simulated impact angles, a comparison was done of the frequency of each group in both datasets.

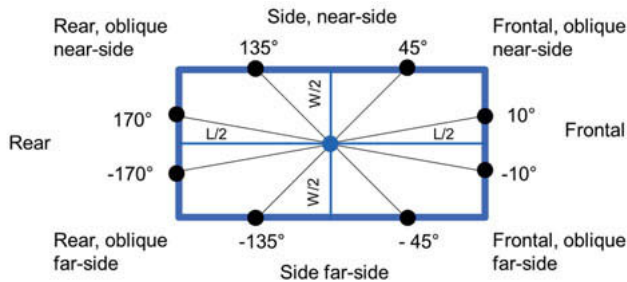


Fig. 2: Visualisation of the eight impact location groups.

## 2.6 Treatment simulations to predict future crashes, clustering and impact velocities

First, the outcome of the treatment simulations was calculated: either the crash was avoided, or it was mitigated, or the AEB crash avoidance system was not activated—for the three different TTC thresholds: 1.2 s, 1.7 s and 2.2. s. The effectiveness of the three TTC thresholds at avoiding crashes was then calculated for each of the three crash sub-groups, SCP, LTAP-OD and LTAP-LD. Then the impact points, impacts angles, and impact velocities of both vehicles were calculated for all three TTC thresholds. These values were used to describe the predicted crashes using clustering.

Clustering methods are normally used to identify a small number of cases that can represent a larger dataset. To determine representative crashes, the impact angles AD-IA, MD-IA, and RIA (described in Section 2.4) were clustered. The k-medoid clustering method was preferred over the k-means method, as it gives an existing representative crash instead of a calculated average of the dataset [42]. The clustering was performed on both baseline and treatment simulations for all sub-groups (SCP, LTAP-OD, and LTAP-LD).

The clusters were derived in three steps. First, the number of clusters was optimised for each dataset based on the Average Silhouette Width (ASW) [43], which describes how well each data point fits into its assigned cluster. Second, all crashes in each dataset were assigned to the closest medoid using the Partitioning Around Medoids (PAM) method [42]. In the third and last step, the clusters were evaluated using the ASW. A low ASW value (close to zero) indicates that no substantial structure could be found (clusters are not well differentiated), while a value between 0.5 and 0.7 indicates that a reasonable structure could be found and a value between 0.7 and 1 indicates a strong structure (clusters are well defined and far apart) [44].

For each cluster, three impact velocity configurations were derived (thus covering a major part of all unavoidable crashes), in order to represent the range of most likely impact configurations for which restraint systems should be developed. This process was done in four steps.



First, the average impact velocity for both vehicles and the covariance between the two velocities were calculated. Second, the velocity vectors were converted into arrays which could be used in 3D surface plots, and the probability density function (pdf) was calculated using the average and covariance. Third, for every 10% increase in impact velocity a contour line was created. Forth, to get the median velocity value, a new contour line (red arc in Fig. 3) was created, consisting of several points with a small step in between the two maximum values. The distance between each point and the cumulative sum of these distances were calculated; the median value (the centre point of the red arc in Fig. 3) is half the cumulative sum. Notably, the median values are calculated—unlike the two maximum values, which correspond to actual crashes. The velocities of both vehicles were plotted as a scatter plot together with the contour lines and the retrieved maximum and median velocity values of both vehicles at the 90th-percentile contour line; see example in Fig. 3.

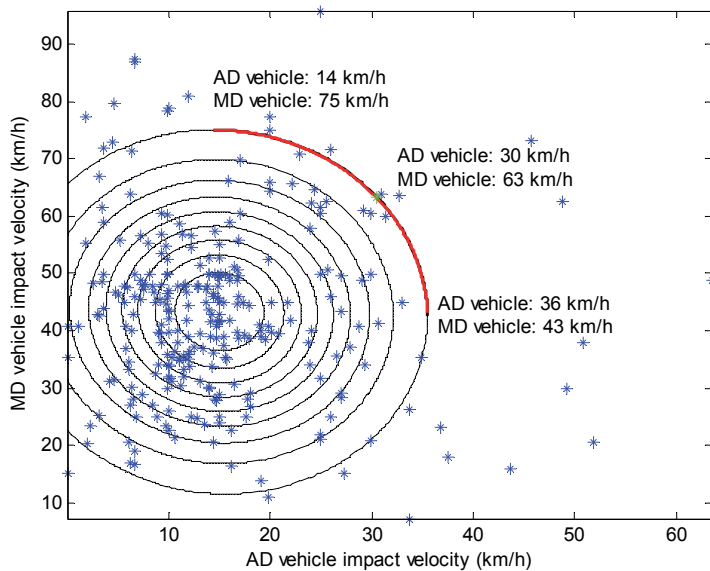


Fig. 3: Example of bivariate distributions of impact velocities for baseline simulation LTAP-LD cluster 1; each dot represents one crash and each circle represents a contour line with increments of 10% in impact velocity. Thus, the outer circle represents the 90th-percentile contour line. The dark red line represents a new contour line created to calculate the median value between the maximum impact velocities for the AD vehicle and manually driven (MD) vehicle.

### 3. Results

The results are organised into four parts. Section 3.1 presents the validation of the model. Section 3.2 evaluates AD and AEB effectiveness in preventing crashes. Section 3.3 describes the overall effect of AD and AEB on impact locations. Section 3.4 shows the clusters for SCP, LTAP-OD, and LTAP-LD crashes.

#### 3.1 Baseline validation

The baseline simulation was assessed by comparing the calculated impact angles and impact velocities with the original data. The calculated impact location groups were also compared with those from the dataset. The results show how well the baseline simulation corresponds to the GIDAS-PCM data. Ideally, the baseline simulation reproduces the GIDAS-PCM data exactly.

##### 3.1.1 Impact angle accuracy

The difference between corner impact angles due to differences in the width/length ratio of all vehicles in the dataset has an average value of  $22^\circ$  and a standard deviation of  $1.4^\circ$ . Given the simplification that the vehicle shapes are represented by rectangles in the simulations, this is considered sufficient for this investigation. However, modern vehicle front ends are actually more round than rectangular, so approximating a vehicle shape with a rectangle might be inadequate when the vehicle is impacted at the front corners [16].

##### 3.1.2 Impact velocity accuracy

The difference between the impact velocities from the baseline simulation and the GIDAS-PCM dataset was calculated for each crash. The distribution of differences has an average value of 0.2 km/h and a standard deviation of 0.5 km/h. This is considered a very good match, indicating the high validity of the simulation.

##### 3.1.3 Impact location accuracy

To demonstrate the differences in impact locations, the impact angles from the GIDAS-PCM data and the baseline simulations are grouped by location in Table 1. Due to the simulations' simplification of the vehicle shapes as rectangles, fewer frontal impacts and more frontal oblique crashes would be expected in the baseline simulation than the dataset. The results reflect this difference. However, for the other impact locations the baseline simulation represents the GIDAS-PCM data well.

Table 1: Impact location for GIDAS-PCM dataset and baseline simulations.

	Frontal +/- 10°	Frontal oblique near-side 10-45°	Frontal oblique far-side -(10-45°)	Side near- side 45-135°	Side far-side -(45-135°)	Rear oblique near-side 135-170°	Rear oblique far-side -(135-170°)	Rear +/-170-180
GIDAS-PCM	24.3%	30.0%	26.1%	7.5%	8.5%	1.7%	1.8%	0%
Baseline	12.1%	38.9%	31.8%	7.2%	6.6%	1.5%	1.9%	0%

### 3.2 AD and AEB effectiveness in preventing crashes

AD vehicles were expected to avoid 1131 crashes by acting as safety-minded drivers and adapting driving to weather and road conditions; see Fig. 4. The remaining 474 crashes consist of 14 SCP (baseline 780), 400 LTAP-OD (baseline 470) and 60 LTAP-LD (baseline 355). Notably, AD effectiveness is not constant across the three intersection crash configurations.

The 2079 crashes available for the treatment simulations can be described as follows: a) the AD vehicle is trying to avoid a crash caused by a manually driven vehicle (1605) and (b) the AD vehicle caused the original crash and is trying to avoid it (474).

With higher TTC thresholds, AEB crash avoidance increased from 44% to 69% (of 2079); see Fig. 4. The percentage of crashes unaffected by the AEB crash avoidance system, i.e. crashes where the brakes did not activate, was relatively low—16% for TTC threshold 1.2 s and slightly lower with higher TTC thresholds.

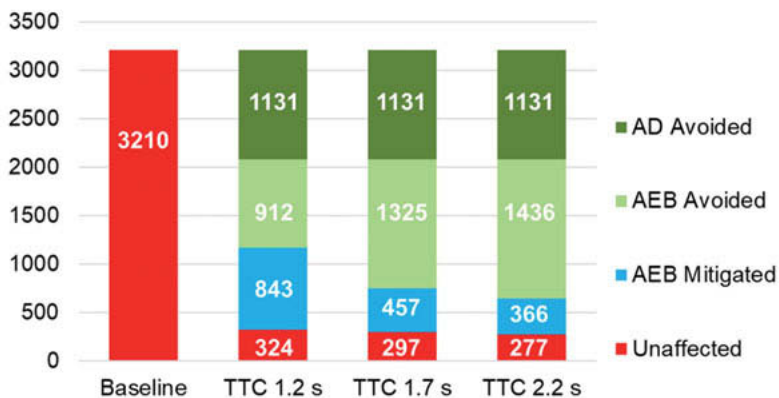


Fig. 4: Number of crashes that were avoided, mitigated, or unaffected by AD or AEB crash avoidance system.

Fig. 5 shows that the AEB system’s effectiveness at avoiding crashes increases as the TTC increases, for all three intersection crashes, but starts to plateau after 1.7 s TTC. The highest effectiveness is seen for LTAP-OD crashes, reaching almost 80% for TTC 2.2 s (while SCP and LTP-LD reach approximately 60% each).

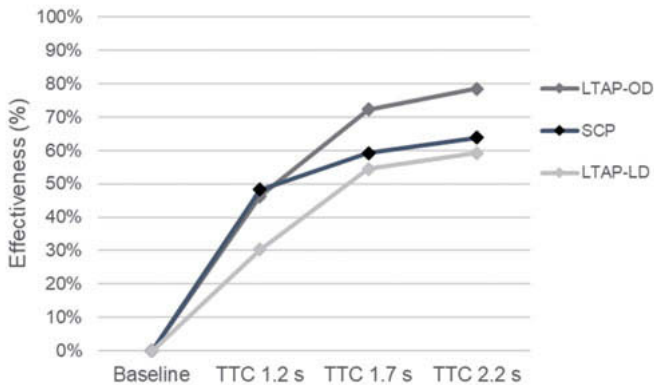


Fig. 5: AEB effectiveness at avoiding SCP, LTAP-OD, and LTAP-LD crashes for all three TTC thresholds.

3.3 AD and AEB effect on impact locations

The impact locations of baseline and treatment simulations are presented in Table 2. It is clear that the impact location is not substantially affected by AD and AEB implementation, as the results are within a few percentage points of each other for each location.

Table 2: Impact location for baseline and treatment simulations.

	Frontal +/- 10°	Frontal oblique near-side 10-45°	Frontal oblique far-side -(10-45°)	Side near- side 45-135°	Side far- side -(45-135°)	Rear oblique near-side 135-170°	Rear oblique far-side -(135-170°)	Rear +/-170-180
Baseline	12.1%	38.9%	31.8%	7.2%	6.6%	1.5%	1.9%	0%
TTC 1.2 s	16.2%	43.2%	31.2%	4.0%	3.3%	1.1%	0.9%	0%
TTC 1.7 s	13.9%	41.1%	30.9%	6.0%	4.9%	1.7%	1.5%	0%
TTC 2.2 s	13.7%	40.7%	30.3%	6.5%	5.3%	1.9%	1.6%	0%

### 3.4 Predicted characteristics of future crashes

The clustered crash configurations and the calculated impact velocities from each cluster are presented in three tables: SCP (Table 3), LTAP-OD (Table 4) and LTAP-LD (Table 5). Each table includes results from the baseline and treatment simulations. The number of clusters in each dataset, calculated based on the ASW, varied between two and three. For all clusters, the ASW values were between 0.5 and 0.7 which indicates that a reasonable structure was found.

#### 3.4.1 SCP crashes, baseline and treatment clusters

The results of clustering all SCP crashes, for baseline and treatment simulations, are presented in Table 3. Light green rectangles represent the AD vehicles and dark blue rectangles represent the manually driven vehicles (hence the baseline results are represented by two blue rectangles). Two clusters, both fairly large, represent the SCP crashes for all baseline and treatment results. The clusters SCP 1 and SCP 2 describe similar crash configurations throughout the baseline and treatment simulations, both representing side impacts forward of the passenger compartment, one far-side (SCP 1) and one near-side (SCP 2), when interpreted from a driver's seat position on the left in the vehicle. Each cluster is represented by three impact velocity configurations, calculated using bivariate distributions (see Section 2.6).

#### 3.4.2 LTAP-OD crashes, baseline and treatment clusters

The results of clustering all LTAP-OD crashes, for baseline and treatment simulations, are presented in Table 4. In this dataset the cluster sizes differ more than in the previous datasets. The larger clusters are of greater interest than smaller ones. For the baseline and TTC 2.2 s simulations, two clusters were found to represent the crashes—but for each simulation only one, LTAP-OD 1, has a substantial size. For treatment simulations TTC 1.2 s and 1.7 s, three clusters were found to represent the crashes but only two, LTAP-OD 1a and 1b, have a substantial size. The clusters LTAP-OD 1, (1a and 1b for TTC 1.2 s and TTC 1.7 s, respectively) describe similar crash configurations throughout the baseline and treatment simulations, representing oblique head-on frontal impacts.

Notably, cluster LTAP-OD 2 represents a side-to-compartment impact for the baseline simulation; this cluster is not seen in the results from the treatment simulations.

Table 3: SCP clusters and impact velocities. Baseline, TTC 1.2 s, TTC 1.7 s, and TTC 2.2 s. Clusters describing similar crash configurations have the same colour in Cluster name.









	Cluster size	Cluster name	Visualisation	AD-IA [ ° ]	MD-IA [ ° ]	RIA [ ° ]	Impact velocity	AD [km/h]	MD [km/h]
Baseline	492	SCP1		-28	24	88	AD 90%ile contour	62	35
							MD 90%ile contour	30	74
							Median 90%ile contour	54	61
	288	SCP 2		31	-21	275	AD 90%ile contour	67	40
							MD 90%ile contour	29	74
							Median 90%ile contour	55	65
TTC 1.2 s	169	SCP1		-20	28	89	AD 90%ile contour	74	34
							MD 90%ile contour	40	66
							Median 90%ile contour	64	57
	242	SCP 2		24	-28	272	AD 90%ile contour	72	27
							MD 90%ile contour	30	59
							Median 90%ile contour	57	51
TTC 1.7 s	138	SCP1		-24	21	90	AD 90%ile contour	75	34
							MD 90%ile contour	41	66
							Median 90%ile contour	64	57
	186	SCP 2		30	-20	271	AD 90%ile contour	72	28
							MD 90%ile contour	32	59
							Median 90%ile contour	58	51
TTC 2.2 s	126	SCP1		-24	21	90	AD 90%ile contour	75	33
							MD 90%ile contour	40	68
							Median 90%ile contour	65	58
	161	SCP 2		30	-20	271	AD 90%ile contour	73	28
							MD 90%ile contour	33	59
							Median 90%ile contour	59	52

Table 4: LTAP-OD clusters and impact velocities. Baseline, TTC 1.2 s, TTC 1.7 s, and TTC 2.2 s. Clusters describing similar crash configurations have the same colour in Cluster name. Clusters without colour are judged too small to represent the crashes.

	Cluster size	Cluster name	Visualisation	AD-IA [°]	MD-IA [°]	RIA [°]	Impact velocity	AD [km/h]	MD [km/h]
Baseline	404	LTAP-OD 1		-21	13	146	AD 90%ile contour	40	47
							MD 90%ile contour	19	80
							Median 90%ile contour	35	68
	66	LTAP-OD 2		-81	-23	130	AD 90%ile contour	44	54
							MD 90%ile contour	23	90
							Median 90%ile contour	39	76
TTC 1.2 s	122	LTAP-OD 1a		0	21	157	AD 90%ile contour	30	39
							MD 90%ile contour	1	87
							Median 90%ile contour	23	69
	291	LTAP-OD 1b		7	-21	211	AD 90%ile contour	67	19
							MD 90%ile contour	32	39
							Median 90%ile contour	53	35
TTC 1.7 s	54	LTAP-OD 3		-23	-134	230	AD 90%ile contour	69	25
							MD 90%ile contour	35	49
							Median 90%ile contour	55	41
	106	LTAP-OD 1a		2	21	158	AD 90%ile contour	35	31
							MD 90%ile contour	1	88
							Median 90%ile contour	26	66
TTC 2.2 s	111	LTAP-OD 1b		6	-21	216	AD 90%ile contour	76	19
							MD 90%ile contour	34	43
							Median 90%ile contour	59	37
	24	LTAP-OD 3		-25	-144	231	AD 90%ile contour	70	21
							MD 90%ile contour	60	37
							Median 90%ile contour	68	31
TTC 2.2 s	168	LTAP-OD 1		20	5	185	AD 90%ile contour	67	12
							MD 90%ile contour	0	80
							Median 90%ile contour	43	56
	19	LTAP-OD 3		-22	-122	232	AD 90%ile contour	73	26
							MD 90%ile contour	67	37
							Median 90%ile contour	72	31

### 3.4.3 LTAP-LD crashes, baseline and treatment clusters

The results of clustering all LTAP-LD crashes, for baseline and treatment simulations, are presented in Table 5. In this dataset the difference in cluster sizes is similar to that of the LTAP-OD crashes. For both the baseline and TTC 2.2 s simulations, two clusters were found to represent the crashes, but for each simulation only one cluster has a substantial number of crashes (LTAP-LD 1 for baseline and LTAP-LD 3 for TTC 2.2 s). For the treatment simulations TTC 1.2 s and 1.7 s, three clusters were found to represent the crashes—but only one, LTAP-LD 3, has a substantial number. The LTAP-LD 3 clusters all describe a frontal oblique far-side crash configuration throughout the treatment simulations.

Notably, cluster LTAP-LD 2, representing a side-to-compartment impact for the baseline simulation, is not seen in the results from the treatment simulations.

### 3.4.4 Impact velocities from selected clusters

To visualize how the impact velocities were affected by the virtual AD vehicle representation, the average values of the AD and manually driven vehicles' median impact velocities from the 90th-percentile contour plot were calculated for selected clusters; Fig. 6. Note that for the two lines LTAP-OD 1a and 1b, the baseline and TTC 2.2 s velocities are taken from cluster LTAP-OD 1. For LTAP-LD 3, the baseline value is taken from cluster LTAP-LD 1.

The calculated average velocity is only marginally affected by the virtual AD vehicle representation. Hence, the velocities of the unavoidable crashes are not substantially reduced, despite the AEB intervention.

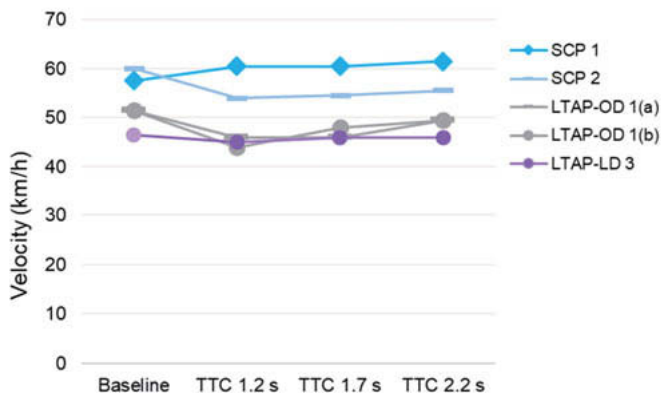


Fig. 6: Average impact velocity of AD vehicle and manually driven vehicle for selected clusters.



Table 5: LTAP-LD clusters and impact velocities. Baseline, TTC 1.2 s, TTC 1.7 s, and TTC 2.2 s. Clusters describing similar crash configurations have the same colour in Cluster name. Clusters without colour are judged too small to represent the crashes.

	Cluster size	Cluster name	Visualisation	AD-IA [°]	MD-IA [°]	RIA [°]	Impact velocity		AD [km/h]	MD [km/h]
Baseline	279	LTAP-LD 1		22	-1	252	AD 90%ile contour		36	43
							MD 90%ile contour		14	75
							Median 90%ile contour		30	63
	76	LTAP-LD 2		93	20	241	AD 90%ile contour		35	51
							MD 90%ile contour		19	84
							Median 90%ile contour		31	71
TTC 1.2 s	29	LTAP-LD 1		22	-7	252	AD 90%ile contour		26	28
							MD 90%ile contour		0	76
							Median 90%ile contour		22	58
	200	LTAP-LD 3		-1	24	111	AD 90%ile contour		72	17
							MD 90%ile contour		42	33
							Median 90%ile contour		60	30
TTC 1.7 s	60	LTAP-LD 4		21	123	118	AD 90%ile contour		69	21
							MD 90%ile contour		42	34
							Median 90%ile contour		58	31
	28	LTAP-LD 1		22	-7	252	AD 90%ile contour		28	28
							MD 90%ile contour		0	77
							Median 90%ile contour		23	57
TTC 2.2 s	123	LTAP-LD 3		-6	22	110	AD 90%ile contour		74	17
							MD 90%ile contour		44	33
							Median 90%ile contour		62	30
	38	LTAP-LD 4		21	123	118	AD 90%ile contour		69	21
							MD 90%ile contour		42	36
							Median 90%ile contour		59	33
TTC 2.2 s	29	LTAP-LD 1		22	-7	252	AD 90%ile contour		26	28
							MD 90%ile contour		0	76
							Median 90%ile contour		22	58
	140	LTAP-LD3		-6	24	107	AD 90%ile contour		74	17
							MD 90%ile contour		43	35
							Median 90%ile contour		62	31

#### 4. Discussion

The current study predicts the crash configurations that an AD vehicle will be exposed to in mixed traffic, by creating a virtual AD representation, applying treatment simulations and k-medoid clustering to the unavoidable crashes. The method was successful in identifying five distinct crash configurations, all with a substantial numbers of crashes per cluster. The five crash configurations are described below (see Fig. 7):

- Side far-side, impact forward of the passenger compartment, manual driven vehicle approaching from the right
- Side near-side, impact forward of the passenger compartment, manual driven vehicle approaching from the left
- Oblique head-on, manual driven vehicle approaching from the right
- Oblique head on, manual driven vehicle approaching from the left
- Frontal oblique far-side, manual driven vehicle approaching from the right

Each crash configuration includes three impact velocity combinations (see Tables 3-5).

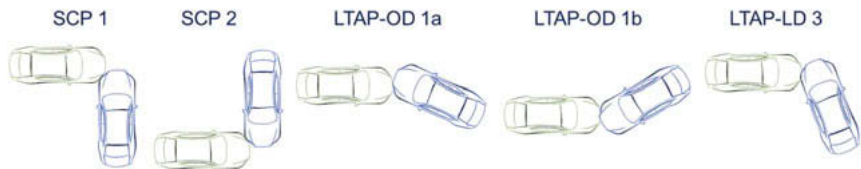


Fig. 7: The five crash configurations that best represent the unavoidable crashes after the treatment simulations. (AD vehicle visualised to the left in all crash configuration)

These five crash configurations are similar to the five found by Östling et al. (2019), who described an in-depth method which grouped the AIS2+ intersection crashes remaining after a filter representing 15 ADASs was applied [23]. There are two slight differences: in that work, the two distinct configurations “Oblique head-on, vehicle approaching from the right” and “Frontal oblique far-side vehicle approaching from the right” found in this study are combined into one, and one additional “Near-side passenger compartment” impact is presented [23] which is not in the current study.

The different TTC threshold values for the AEB had relatively little effect on the clustered crash configurations, indicating that the defined crash configurations are robust.

The clusters of the treatment simulations did not differ substantially from the clusters of the baseline simulations; however, the above crash configurations were selected to represent the

crash configurations that an AD vehicle will be exposed to in mixed traffic. Note that it is only the green (left) vehicle that should be used for occupant restraint evaluation, as it represents the impacted vehicle—the blue vehicle is only a bullet vehicle. Further, these configurations should not be confused with crash configurations that manually driven vehicles are exposed to. Those crash configurations should be selected from the baseline simulation clusters, which are between manually driven vehicles, due to the low penetration rate of AD vehicles in the foreseeable future. (In fact, we have not investigated AD-to-AD vehicle crashes as their occurrence is judged to be too far away in the future.) For the baseline simulation clusters, both vehicles are of interest for the evaluation of occupant restraints.

It is worth mentioning that for both baseline LTAP-OD and LTAP-LD simulations, there were clusters of crashes with impacts to the side passenger compartment of the vehicles (even if the numbers were small: 66 and 76 respectively). However, these crashes disappear in the treatment simulations, probably as a result of the AEB braking.

Similar to what Lubbe et. al. (2018) found [32], removing the crashes that an AD vehicle would inherently avoid by acting as a safety-minded driver also removed most of the SCP crashes. This result is reasonable, as most of the SCP crashes are preceded by some kind of right-of-way or traffic light violation. In addition, the different TTC thresholds for AEB greatly affect the system's ability to avoid crashes (with values ranging from 30% for TTC 1.2 s for LTAP-LD up to almost 80% for TTC 2.2 s for LTAP-OD). These values indicate the importance of the setting of system parameters for an AEB system for intersections. We found that the effectiveness plateaus at the TTC threshold of 1.7 s, as Scanlon et. al. (2017) also reported [18-19]. This study found plateau values of approximately 60% and 80% for SCP and LTAP-OD, respectively, while Scanlon et. al. (2017) reported 50% and 70% for SCP and LTAP-OD, respectively. These are surprisingly similar values, given that Scanlon et. al. (2017) used US crash data and we used German crash data.

In spite of the high effectiveness of AD and AEB at preventing crashes, the impact velocities of the remaining crashes are not substantially reduced. The few remaining crashes still occur at high speeds, as has been observed in previous intersection AEB studies [17, 45]. This emphasizes the need for a high level of crashworthiness also in future AD vehicles in terms of advanced crash structure, passenger compartment stability, and occupant restraints. In simpler words: AD vehicles will need seatbelts.

Even though the AD vehicle was equipped with a sensor with 180° FoV, in 16% of all treatment simulation the AEB was not even activated, due to sensor obstruction and that the threat assessment algorithm did not predict that the AD vehicle would crash but was impacted by the manually driven vehicle anyway.

## Limitations

This study has a number of limitations. First, it only considers AD and manually driven vehicles. Since new ADAS with semi-automatic functions like intersection AEB are penetrating the vehicle fleet, it would have been interesting to also include scenarios in which the manually driven vehicle brakes autonomously.

Second, although AD vehicles introduced to the vehicle fleet might be able to avoid a crash by steering, this countermeasure was not considered in this study's simulations. There are two reasons: there is no appropriate simulation model and the baseline data did not include on-coming traffic, which would limit the possibility of avoiding crashes by steering. Hence, any prediction about crash avoidance by steering would overestimate real-world effects substantially.

Third, the GIDAS-PCM data also have some limitations, as they only include information about the two vehicles that are crashing and the fixed environment, like houses and parked vehicles. The possibility that other traffic might have obstructed the view of the sensor cannot be evaluated. The lack of other road users therefore results in an underrepresentation of sight obstructions (mentioned above).

Fourth, our results are based on an unweighted sample of traffic accidents in Germany. However, the data from GIDAS-PCM are known to be slightly biased [46], under-sampling lower accident severities in particular [36, 47].

Some analyses based on GIDAS samples used unweighted data [48-49], while others use sample weights calculated from a comparison of GIDAS with German national statistics and weighted data [47, 50]. Data weighting has been shown to be important when the sample of interest is not sufficiently similar to national statistics (as, for example, in the construction of pedestrian injury risk curves [51]).

For the analysis of car-to-car intersection crashes, Sander (2017) proposed a two-step hyper-cube weighting from GIDAS-PCM to GIDAS and from GIDAS to German national statistics, followed by normalization to keep the sample size constant [16]. Factors for the GIDAS-PCM to GIDAS weighting were based on road width and impact momentum, and factors for the GIDAS to national statistics weighting were based on accident type and accident severity; all factors are described by Sander and Lubbe (2018) [17].

Based on the fact that these factors are reasonably close to unity, we estimate that our data sample of GIDAS-PCM intersection crashes is sufficiently similar to national statistics that data weighting would have only a marginal influence on the results. However, future work should confirm this estimation.

Lastly, our results are based on German data, hence affected by the road infrastructure in Germany. As intersection crashes depend on specific road infrastructure, our findings should only be generalized to countries where the infrastructure is similar.

## Conclusions

This study identifies five distinct crash configurations that an AD vehicle operating in mixed traffic will be exposed to, independent of market penetration level. They are robust against parameter variations of AD vehicle functionality. It is proposed that these crash configurations, together with three derived impact velocity combinations, should be used when developing and evaluating AD vehicles' crashworthiness, i.e., crash structure and occupant restraint systems.

## Acknowledgement

The work was carried out as part of the OSCCAR project, which has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 768947.

We would like to thank Magdalena Lindman at Volvo Cars Corporation, Jan Dobberstein at Daimler AG and Daniel Schmidt at Robert Bosch GmbH, all being involved in OSCCAR WP1, for fruitful discussion and technical insights when setting up this study. We also thank Tina Mayberry for language editing.

## Appendices

Appendix A – Main accident cause, HURSU

Appendix B – Technical specification of the AEB crash avoidance system parameters

## References

- [1] European Commission, Traffic safety basic facts 2018, [https://ec.europa.eu/transport/road\\_safety/sites/roadsafety/files/pdf/statistics/dacota/bfs2018\\_infographics.pdf](https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/statistics/dacota/bfs2018_infographics.pdf), accessed 8th of October 2019.
- [2] European Commission, Annual Accident Report. European Commission, Directorate General for Transport, June 2018, [https://ec.europa.eu/transport/road\\_safety/sites/roadsafety/files/pdf/statistics/dacota/asr2018.pdf](https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/statistics/dacota/asr2018.pdf), accessed 8th of October 2019.
- [3] EU Road Safety Policy Framework 2021-2030 - Next steps towards "Vision Zero" Brussels, 19.6.2019.

- [4] Traffic Safety Facts 2016. A Compilation of Motor Vehicle Crash Data from the Fatality Analysis Reporting System and the General Estimates System. National Highway Traffic Safety Administration National Center for Statistics and Analysis U.S. Department of Transportation Washington, DC DOT HS 812554.  
<https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/812554>, accessed 8th of October 2019.
- [5] European Commission 2017. Traffic Safety Basic Facts on Junctions, European Commission, Directorate General for Transport. [https://ec.europa.eu/transport/road\\_safety/sites/roadsafety/files/pdf/statistics/dacota/bfs2017\\_junctions.pdf](https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/statistics/dacota/bfs2017_junctions.pdf), accessed 8th of October 2019.
- [6] Edwards, M., Nathanson, A. and Wisch, M. 2014. Estimate of potential benefit for Europe of fitting Autonomous Emergency Braking (AEB) systems for pedestrian protection to passenger cars. Traffic Injury Prevention, 15: pp. S173–82.
- [7] Rosén, E. 2013. Autonomous Emergency Braking for Vulnerable Road Users. In Proceedings of IRCOB conference, 2013, Gothenburg, Sweden, pp. 618–27.
- [8] Jermakian, J. 2011. Crash avoidance potential of four passenger vehicle technologies. Accident Analysis and Prevention, 43 (2011) pp. 732–40.
- [9] Cicchino, J. B. 2017. Effectiveness of forward collision warning and autonomous emergency braking systems in reducing front-to-rear crash rates. Accident Analysis and Prevention, 99 (2017) pp. 142–52.
- [10] Kusano, K. and Gabler, H. C. 2015. Comparison of Expected Crash and Injury Reduction from Production Forward Collision and Lane Departure Warning Systems. Traffic Injury Prevention, 16: pp. S109–S114.
- [11] Hummel, T., Kühn, M., Bende, J. and Lang, A. 2011. Advanced Driver Assistance Systems: An investigation of their potential safety benefits based on an analysis of insurance claims in Germany. German Insurance Association, Research report FS 03. Available at: [https://udv.de/sites/default/files/tx\\_udvpublications/RR\\_12\\_fas.pdf](https://udv.de/sites/default/files/tx_udvpublications/RR_12_fas.pdf), accessed 8th of October 2019.
- [12] Farmer, C. M. 2004. Effect of electronic stability control on automobile crash risk. Traffic Injury Prevention, 5(4): pp. 317–25. DOI:10.1080/15389580490896951.
- [13] Dang, J. N. 2007. Statistical Analysis of the Effectiveness of Electronic Stability Control (ESC) Systems. Evaluation Division; National Center for Statistics and Analysis National Highway Traffic Safety Administration Washington, D.C. 20590. DOT HS 810 794.

- [14] Lie, A., Tingvall, C., Krafft, M. and Kullgren, A. 2006. The effectiveness of electronic stability control (ESC) in reducing real life crashes and injuries. *Traffic Injury Prevention*, 7(1): pp. 38–43.
- [15] Sternlund, S., Strandroth, J., Rizzi, M., Lie, A. and Tingvall, C. 2017. The effectiveness of lane departure warning systems: A reduction in real-world passenger car injury crashes. *Traffic Injury Prevention*, 18(2): pp. 225–9.
- [16] Sander, U. 2017. Opportunities and limitations for intersection collision intervention—A study of real world ‘left turn across path’ accidents. *Accident Analysis and Prevention*, 99 (2018) pp. 342–355.
- [17] Sander, U and Lubbe, N. 2018. Market penetration of intersection AEB: Characterizing avoided and residual straight crossing path accidents. *Accident Analysis and Prevention*, 115 (2018) pp. 178–188.
- [18] Scanlon, J.M., Sherony, R. and Gabler, H.C. 2017. Injury mitigation estimates for an intersection driver assistance system in straight crossing path crashes in the United States. *Traffic Injury Prevention* 18:S1, 9–17.
- [19] Scanlon, J. M., Sherony, R. and Gabler, H.C. 2017. Preliminary Effectiveness Estimates for Intersection Driver Assistance Systems in LTAP/OD Crashes. *Proceedings of Fourth International Symposium on Future Active Safety Technology: Toward zero traffic accidents (FAST-zero)*, Nara, Japan.
- [20] Esquer, Á., Aparicio, A., Baurès, S. and Sanz, L. 2017. Study of the application of steering support systems to complement autonomous emergency braking systems for active collision avoidance strategies. *Proceedings of 25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Detroit, Michigan USA.
- [21] Eckert, A., Hartmann, B., Sevenich, M., and Rieth, P.E. 2011. Emergency steer & brake assist – a systematic approach for system integration of two complementary driver assistance systems. *Proceedings of 22th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Washington. D.C., USA.
- [22] Östling, M., Lubbe, N., Jeppsson, H. and Puthan, P. 2019. Passenger car safety beyond ADAS: Defining remaining accident configuration as future priorities. *Proceedings of 26th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, 2019, Eindhoven, The Netherlands.
- [23] Östling, M., Lubbe, N. and Jeppsson, H. 2019. Predicting crash configurations in passenger car to passenger car crashes to guide the development of future passenger car safety. In *Proceedings of IRCOBI conference*, 2019, Florence, Italy.

- [24] Singh, S. 2018. Critical reasons for crashes investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey. Traffic Safety Facts Crash Stats. Report No. DOT HS 812 506. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration, <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/812506>.
- [25] Transition To Autonomous Cars Will Take Longer Than You Think, Waymo CEO Tells Governors, Sam Abuelsamid, Forbes Jul 20, 2018. <https://www.forbes.com/sites/sama-buelsamid/2018/07/20/waymo-ceo-tells-governors-av-time-will-be-longer-than-you-think/#3a1476c5d7da>, accessed 8<sup>th</sup> of October 2019.
- [26] The U.S. Department of Transportation's: Automated driving systems 2.0 a vision for safety, September 2017. [https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/13069a-ads2.0\\_090617\\_v9a\\_tag.pdf](https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/13069a-ads2.0_090617_v9a_tag.pdf), accessed 8th of October 2019.
- [27] Sustainable Mobility for Europe: safe, connected, and clean. 2018. [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar%3A0e8b694e-59b5-11e8-ab41-01aa75ed71a1.0003.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar%3A0e8b694e-59b5-11e8-ab41-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF), accessed 8th of October 2019.
- [28] Jorlöv, S., Bohman, K. and Larsson, A. 2017. Seating Positions and Activities in Highly Automated Cars—A Qualitative Study of Future Automated Driving Scenarios. In Proceedings of IRCOBI conference. Antwerp, Belgium.
- [29] Östling, M., and Larsson, A., 2019. Occupant activities and sitting positions in automated vehicles in China and Sweden. Proceedings of 26th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Eindhoven, Netherlands.
- [30] Filatov, A., Scanlon, J.M., Bruno, A., Danthurthi, S.S.K, and Fisher, J. 2019. Effects of Innovation in Automated Vehicles on Occupant Compartment Designs, Evaluation, and Safety: A Review of Public Marketing, Literature, and Standards. Presented at WCX SAE World Congress Experience, SAE International, ISSN: 0148-7191, 2019.
- [31] Safety First for Automated Driving. 2019-07-02 <https://newsroom.intel.com/wp-content/uploads/sites/11/2019/07/Intel-Safety-First-for-Automated-Driving.pdf>.
- [32] Lubbe, N., Jeppsson, H., Ranjbar, A., Fredriksson, J., Bårgman, J. and Östling, M. 2018. Predicted road traffic fatalities in Germany: The potential and limitations of vehicle safety technologies from passive safety to highly automated driving. In Proceedings of IRCOBI conference, 2018, Athens, Greece.
- [33] Robinson, T.L., Wallbank, C. and Baig, A., 2017. Automated Driving Systems: Understanding Future Collision Patterns. Transport Research Foundation, TRL Academy.



- [34] Sander, U. and Lubbe, N., 2016. Prediction of Accident Evolution by Diversification of Influence Factors in Computer Simulation: Opportunities for Driver Warnings in Intersection Accidents. *Aktive Sicherheit Und Automatisiertes Fahren - Methodenentwicklung Im Expertendialog*. Expert Verlag GmbH, Renningen, Essen, Germany, p. 29.
- [35] Otte, D., Krettek, C., Brunner, H. and Zwipp, H., 2003. Scientific Approach and Methodology of a New In-Depth- Investigation Study in Germany so called GIDAS. *Proceedings of 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Nagoya, Japan.
- [36] Hautzinger, H., Pfeiffer, M. and Schmidt, J., 2004. Expansion of GIDAS Sample Data to the Regional Level: Statistical Methodology and Practical Experiences. *1st International Conference on ESAR "Expert Symposium on Accident Research."* Hanover. Germany. pp. 38–43.
- [37] Schubert, A., Erbsmehl, C. and Hannawald, L., 2013. Standardized pre-crash scenarios in digital format on the basis of the VUFO simulation input data from GIDAS. In: *5th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“*. Fachverlag NW in der Carl Schuenemann Verlag GmbH ISSN: 0943-9293. Hanover, Germany. pp. 366–372.
- [38] Godthelp, H. 1986. Vehicle control during curve driving *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 28(2):211-21, DOI: 10.1177/001872088602800209.
- [39] Seiniger, P., Bartels, O., Pastor, C. and Wisch, M. 2013. An Open Simulation Approach to Identify Chances and Limitations for Vulnerable Road User (VRU) Active Safety. *Traffic Injury Prevention*, 14:sup1, S2-S12, DOI: 10.1080/15389588.2013.797574.
- [40] Edwards, M., Nathanson, A. and Wisch, M. 2014. Estimate of Potential Benefit for Europe of Fitting Autonomous Emergency Braking (AEB) Systems for Pedestrian Protection to Passenger Cars, *Traffic Injury Prevention*, 15:sup1, S173-S182, DOI: 10.1080/15389588.2014.931579.
- [41] Wågström L., Leledakis, A., Östh, J., Lindman, M. and Jakobsson, L. 2019. Integrated safety: Establishing links for a comprehensive virtual tool chain. *Proceedings of 26th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Eindhoven, Netherlands.
- [42] Kaufman, L. and Rousseeuw, P.J., 2005. *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. Wiley - Interscience 33 1, 368. DOI:10.1007/s00134-006-0431-z.
- [43] Rousseeuw, P.J., 1987. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *J. Comput. Appl. Math.* 20, 53–65. DOI:10.1016/0377-0427(87)90125-7.

- [44] Sander, U. and Lubbe, N. 2018. The potential of clustering methods to define intersection test scenarios: Assessing real-life performance of AEB. *Accident Analysis and Prevention*, 113 (2018) pp. 1-11.
- [45] Sander, U., Lubbe, N. and Pietzsch, S. 2019. Intersection AEB implementation strategies for left turn across path crashes. *Traffic Injury Prevention*, 20:sup1, S119-S125, DOI: 10.1080/15389588.2019.1602728.
- [46] Liers, H., Rößler, R. and Ziegler, J. 2017. Performance of restraint systems in accidents – does every occupant benefit equally from the measures? *Proceedings of 25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Detroit, Michigan USA.
- [47] Rosén, E. and Sander, U. 2009. Pedestrian fatality risk as a function of car impact speed. *Accident Analysis and Prevention*, 41 (2009) pp. 536–542.
- [48] Otte, D., Jänsch, M. and Haasper, C. 2012. Injury protection and accident causation parameters for vulnerable road users based on German In-Depth Accident Study GIDAS. *Accident Analysis and Prevention*, 44 (2012) pp. 149–153.
- [49] Guibing Li, G. Lyons, M. Wang, B., Yang, J. Otte, D. and Simms C. 2017. The influence of passenger car front shape on pedestrian injury risk observed from German in-depth accident data. *Accident Analysis and Prevention*, 101 (2017) pp. 11–21.
- [50] Otte, D., Facius, T., and Wiese, B., 2015. Accident Characteristics and Influence Parameters of Severe Motorcycle Accidents in Germany. *SAE Technical Paper 2015-01-1466*, 2015, DOI:10.4271/2015-01-1466.
- [51] Rosén, E., Stigson, H. and Sander, U. 2011. Literature review of pedestrian fatality risk as a function of car impact speed. *Accident Analysis and Prevention*, 43 (2011) pp.25–33.

## Appendix A – Main accident cause, HURSU

To create a dataset with only crashes that could not be avoided by a conceptual AD vehicle, the GIDAS variable HURSU was used. HURSU contains the main accident cause coded by the GIDAS team and it's the same causation order as the police use [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/verkehrsunfaelle-jahr-2080700187004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/verkehrsunfaelle-jahr-2080700187004.pdf?__blob=publicationFile) (Page 12-15).

Only accident causes involving two vehicles have been considered. The list below shows the accidents causes that could potentially be avoided by a conceptual AD vehicle.

Driving performance: 1, 2, 3, 4

Road usage: 8, 9, 10, 11

Speed: 12

Overtaking: 16, 17, 19, 20, 21, 23

Passing stationary vehicles: 24, 25

Driving in same direction: 26

Disregarding right-of-way: 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33

Resting traffic: 43, 44, 45, 46

Loading: 47, 48

Technical failure: 50, 51, 52, 53, 54, 55

Road conditions: 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 90

Weather: 80, 81, 82, 83, 84

Obstacles: 85, 86, 87, 88

## Appendix B – Technical specification of the AEB crash avoidance system

Table B1: Description of the AEB crash avoidance system parameters

FOV	180°	Sensor field-of-view, with sensor mounted in the upper wind-screen
R <sub>min</sub> , R <sub>max</sub>	0-100 m	Minimum and maximum sensor range
Sensor frame rate	40 Hz	Rate at which images from the sensor is gathered
Detection	-	For detection, at least one side of the vehicle had to be within the sensor field-of-view
Classification	5 frames	Time for classification
Brake latency	0.2 s	Latency before brake start to ramp up
Brake rate	66 m/s <sup>3</sup>	Gradient on brake ramp up
Brake max	μ*9.81	Maximum brake retardation provided by the AEB system
TTC	1.2 s, 1.7 s and 2.2 s	Predicted time to collision, for a non-braking vehicle, when the brake decision was made. Note that brake onset would occur slightly later due to brake latency

## 20 Jahre Vision Zero. Utopie oder Realität?

Dr. **Wolfram Hell**, LMU Institut für Rechtsmedizin, München

### Kurzfassung

Lange wurde die „Vision Zero“ in Deutschland als Nullvision missverstanden, mittlerweile hat sie sich auch in Deutschland und bei den deutschsprachigen Nachbarn etabliert. Aus verkehrspolitischer Sicht hat Claes Tingvall diese Vision 1997 in Schweden auf den Weg gebracht die Philosophie hat sich bis zu UN in New York durchgesetzt. Menschliches Leben soll über ALLEM stehen, d.h. es sollten alle bekannten Anstrengungen unternommen werden das Verkehrssystem so zu gestalten, dass möglichst keine Verkehrstoten und Schwerverletzten vorkommen. Menschen machen Fehler und der Systemdesigner sollte dies in sein Sicherheitskonzept miteinbeziehen. Dabei sind nicht nur Fahrzeugdesigner sondern auch Straßenbauer verantwortlich. Z.B. hat es ganz Schweden 2017 und 2018 kein getötetes Kind als Radfahrer gegeben, ein Ziel an dem viele andere Länder noch arbeiten müssen. Schweden, Norwegen, Niederlande, UK und die Schweiz haben inzwischen einen relativ geringen Anteil von Verkehrstoten in Deutschland und Österreich liegen diese Zahlen höher. Aktuell kommen in Deutschland ca. 270 Menschen pro Monat ums Leben, das entspricht einem Airbus A 320. Würde dies in der Luftfahrt jeden Monat passieren wären die Medien voll mit Schlagzeilen. Seit 2010 ist aber in einigen Ländern auch z.B. in Schweden fast eine Stagnation der Verkehrstotenzahlen festzustellen, die Ursachen sind bislang noch nicht ganz klar. Dennoch sollen die Verkehrstoten in Schweden weiter in 10 Jahren um 50% gesenkt werden, es werden hierzu jährliche Konferenzen abgehalten und eine Zielerreichung/Verfehlung mit Saftey Performance Indicators festgestellt.

### 1. Einführung

Ziele zu setzen um die Anzahl der Verkehrstoten und Schwerverletzten zu senken ist eine Tradition von immer mehr Ländern. Seit einigen Jahren wurden in Schweden seit 1997 Langzeitziele gesetzt, diese basierend auf der Vision Zero. In dieser Vision ist die ultimative Zielsetzung das Straßen Transportsystem so zu entwickeln das es möglichst vollkommen fehlerverzeihend ist, nach dem Prinzip des nicht perfekten und fragilen Menschen. Diese Design Philosophie soll Menschliche Fehler reduzieren, aber da sie ständig passieren soll das System vergeben können. Diverse technologische Ansätze sollen vorliegen das System wieder auf „normal“ zurückzustellen oder für einen Crash vorzubereiten der überlebbar ist

und keine Langzeitverletzungen verursacht. Um ein sicheres Transportsystem zu entwickeln müssen eine Anzahl von Faktoren und Komponenten vereint werden damit das System die Strassenbenutzer schützen kann. Im Einzelnen muss der Betrag der kinetischen Energie z.B. Geschwindigkeit soweit limitiert werden das protektive Systeme wirken können.

## 2. Ziele und Statistik

Vision Zero manchmal „Safe System“ genannt ist von vielen Stakeholdern weltweit angenommen worden. Individuelle Länder der EU, USA und viele Städte entwickeln nun ihr Transportsystem anhand dieser Politik, z.B. hat die EU das Ziel für 2050 gesetzt nahe an Zero Verkehrstoten zu sein.

Aktuell ist das neue Ziel der EU von 2020 -2030 eine weitere Halbierung der Verkehrstoten und Schwerverletzten, obwohl dieses gleiche Ziel von 2010 -2020 wohl leider deutlich verfehlt werden wird (s.u.).

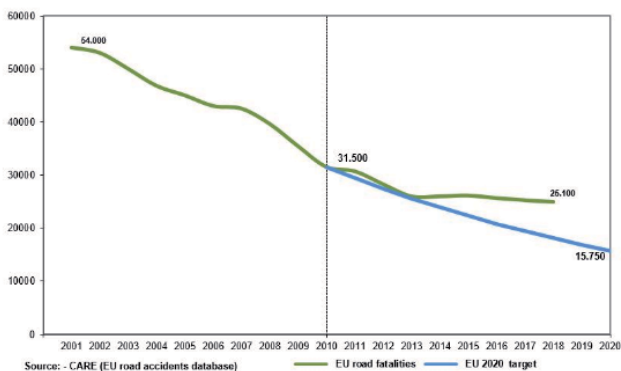


Bild 1: Zeitliche Entwicklung: Reduktion der Verkehrstoten in der EU  
(Quelle European Commission Press Release 2018)

Ähnliche Ziele werden z.B. auch von Schweden und der Schweiz verfolgt. Beide Länder haben grundsätzlich fallende Getötetenzahlen, die allerdings längerfristig in Mehrjahresabständen betrachtet werden sollen, da immer wieder einzelne Ausreisserjahre dazwischen können deren Effekte nicht vollständig erklärbar sind

Für den kurzfristigen Anstieg z.B. 2018 (2019 bisher wieder im Trend) in Schweden gibt es folgende Erklärungen: Gute Wirtschaftslage und entsprechend höhere Fahrleistungen, mehr

Unfälle von Pkw gegen Lkw, wegen besserem Wetter deutlich mehr schwere Motorradunfälle.

Insgesamt erscheint z.B. auch die Getötetenrate pro 1 Mio. Einwohner aussagekräftig. Hier belegen die Schweiz und Schweden sowie Norwegen die vorderen Plätze, während Deutschland und Österreich deutlich abfallen, auch wenn andere Länder noch höhere Werte aufweisen z.B. USA, Korea und Polen.

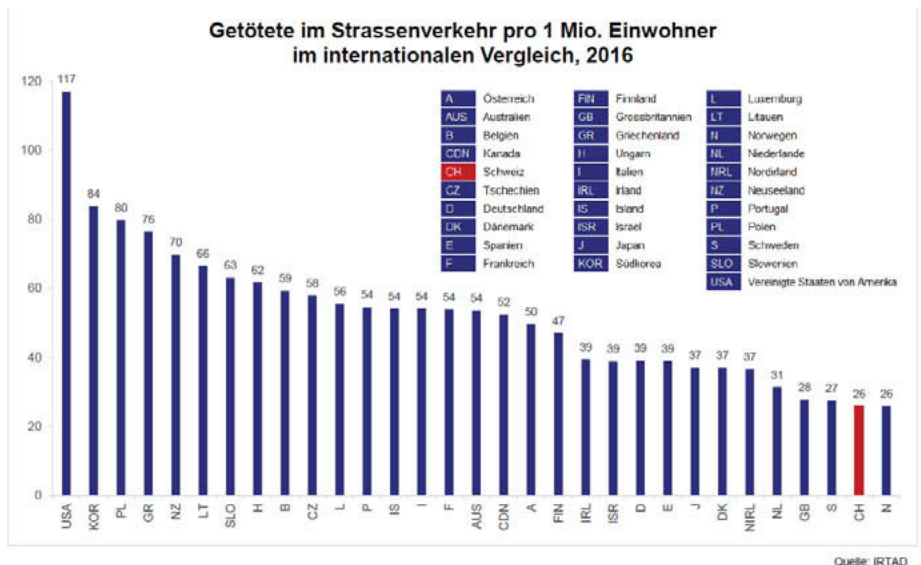


Bild. 2: Getötete pro 1 Mio. Ew. im Strassenverkehr 2016 (Quelle IRTAD)

### 3. Verbesserungen in Schweden und der Schweiz

Der aktuelle Schwedische Straßenverkehrssicherheits Aktionsplan umfasst 111 commitments von 14 Stakeholdern.

Insbesondere:

- ☐ Geschwindigkeit
- ☐ Alkohol, Drogen
- ☐ Sicheres Fahrradfahren

Die Schwedische Verkehrssicherheitsbehörde setzt Hauptschwerpunkte bei:

- O Verkehrssicherheits Kameras
- O Landstrassen mit Mittelleitplanken (sog. 2+1 Strassen)
- O Reduktion des Tempolimits z.B. auf Landstrassen ohne Trennung von 90 km/h auf 80 km/h

Dieser Plan soll pro Jahr ca. 40-50 Verkehrstote (2017 in Schweden insgesamt 250 Getötete) und 500 Schwerverletzte pro Jahr einsparen.

Die Kameras tragen insbesondere bei jüngeren Fahrern zu einer besseren Geschwindigkeitsdisziplin bei, hier werden großflächig bestimmte Verkehrsadern ausgestattet.



Bild 3 Speed Camera in Schweden

Eine ähnliche Strategie verfolgt die Schweiz mit Ihrem Programm „Via sicura“. Hier sind die Strafen für „Raser“ drastisch erhöht worden z.B. wird bei > 70 km/h in einer Tempo 30 Zone, > 100 km/h in einer 50 Zone das Fahrzeug eingezogen und versteigert und der Fahrer bis zu 1 Jahr mit Gefängnisstrafe belegt. Auch hier ist eine große „Disziplin“ in der Einhaltung der Geschwindigkeiten gerade auch bei den Risikogruppen wegen der höheren Strafen auffallend. Parallel hierzu sind in der Schweiz die Kurven der Getöteten seit 2010 selbst der Motorradfahrer jährlich gesunken. Weitere Schwerpunkte setzt die Schweiz auf: Fahren mit Licht am Tag, Alkoholverbot für Neulenkler und Berufskraftfahrer, sowie der Sanierung von Unfallschwerpunkten.

Die seit 1997 in Schweden eingeführten 2+1 Landstraßen MIT Fahrbahntrennung weisen eine sehr deutliche Reduktion der Verkehrstoten (minus 80-90%) auf. Dies soll auch für Motorradfahrer gelten, da diese dann nicht in den Gegenverkehr gelangen können. Ebenfalls



werden nicht nur sogenannte Cables zur Fahrbahntrennung sondern auch Pfosten mit Leitplanken eingesetzt.

Viele dieser Strassen werden zusätzlich mit quergerippten Fahrbahnrandhöhlungen mittig und außen zur Prävention von Einschlafunfällen (-70% Reduktionspotential von Abkommen von der Strasse) ausgestattet, Probleme mit der Schneerräumung sind in Schweden nicht bekannt. Zur Zeit sind 76% aller Staatsstraßen mit Fahrbahntrennung „sicher“, das Ziel für 2020 liegt bei 90%.



Bild. 4: 2+1 Road mit Median barrier in Schweden

Die Geschwindigkeitsreduktion auf Landstrassen 80 km/h und in der Stadt bei Mischverkehr mit 40 km/h bald mit Geofencing soll ebenfalls eine effektive Maßnahme zur Reduktion der Verkehrstoten darstellen und soll in Kürze in Stockholm eingesetzt werden.

Auch die Fahrradhelmmtragequote ist mit freiwillig 80% in Stockholm außergewöhnlich hoch. Zum Vergleich liegt die Quote in Deutschland bei ca. 15%.

Eine intelligente Straßenplanung für abbiegende Lkw und Fahrradfahrer mit verschiedenen Maßnahmen (versetzte Spuren, getrennte Ampelschaltung, Gefahrenwarnung) stellt ebenfalls eine effektive Maßnahme zur Reduktion der häufig fatalen Lkw-Fahrradunfälle dar. Hier sollten in Zukunft ebenfalls endlich Totwinkelerkennungssysteme bei Lkw Standard werden.

#### 4. Ausblick

Durch moderne Technologie ist die Reduktion von Verkehrstoten und Langzeitverletzten bei weitem noch nicht ausgereizt. Gerade eine stärkere Marktrelevanz von aktiven Systemen (z.B. Notbremsysteme auch mit FG und Radfahrer Erkennung), Emergency Call, Geofencing lassen einen deutlichen Rückgang der Verkehrstoten erwarten.

Nach Untersuchung der FOLKSAM hat in der Vergangenheit hat die zunehmende Verbreitung von 5 Sterne NCAP Fahrzeugen seit MJ 2004 ebenfalls eine deutliche Reduktion (bis zu 86 % der Verkehrstoten im Pkw) gebracht. Bei Motorradfahrern sowie Fußgängern und Radfahrern sieht die Situation leider bislang deutlich schlechter aus, gerade hier bedarf es noch großer Anstrengungen – bei steigendem Seniorenanteil - eine Vision Zero Philosophie zu erreichen. Aber auch hier kann insbesondere straßenarchitektonisch und mit Erhöhung der Helmtragequote für Radfahrer einiges in Zukunft erreicht werden. Einige Kommunen z.B. München haben Vision Zero in ihre Verkehrsplanung aufgenommen, ein verantwortungsvolles Handeln sollte aber von allen Stakeholdern (Industrie, Verkehrsplanung, Gesetzgeber und Überwachung) erwartet werden.

Hierzu können jährliche Bestandsaufnahmen und ein umfassendes Commitment mit Dialog aller Beteiligten helfen.

Um in Deutschland das Ziel von einer deutlichen Reduktion von Verkehrstoten zu erreichen sollten auch folgende Maßnahmen diskutiert werden:

- Senkung des Tempolimits auf Landstrassen MIT nicht abgetrenntem Gegenverkehr von 100 km/h auf 80 km/h
- Mehr 2+1 Landstraßen am besten mit Fahrbahntrennung
- verpflichtende Einführung von Totwinkel Erkennungssysteme für rechtsabbiegende LKW
- LKW Notbremsysteme die von 80 km/h auf 0 km/h bremsen
- bei Mischverkehr (FG, Fahrrad) und Pkw Temporeduktion von 50 km/h auf 40 km/h
- Deutliche Steigerung der Fahrrad- und e-scooter Helmquote
- Sanktionen gegen „Raser“ in der Stadt und auf der Landstrasse analog Schweiz

- Geschwindigkeitskontrolle von Motorrädern mit Speed Kameras auf der Landstrasse mit Kennzeichenerfassung
- Ganzheitliche Verkehrssicherheitsplanung unter Einbeziehung der Straßenarchitektur

#### Literatur

- [1] Matteo Rizzi , Per Hurtig, Simon Sternlund, Anders Lie, Claes Tingvall: HOW CLOSE TO ZERO CAN VOLVO CARS GET BY 2020? AN ANALYSIS OF FATAL CRASHES WITH MODERN VOLVO PASSENGER CARS IN SWEDEN  
ESV conference Eindhoven 2019
- [2] Road Safety. Vision Zero on the move. Trafikverket Swedish Transport Association
- [3] Hanna Lindberg; Maria Håkansson. How dreams can become reality: Vision Zero 20 years.  
AF Consult 2018
- [4] Werner Jeger: Via sicura. Viel erreicht jedoch nicht am Ziel.  
Gmtdb Jahrestagung Konstanz 2019
- [5] Walter Eichendorf: Die zehn Top Forderungen des DVR zur Vision Zero  
Gmtdb Jahrestagung Konstanz 2019
- [6] Larsson, P., Tingvall, C. (2013). The Safe System Approach: A Road Safety Strategy Based on Human Factors Principles. In: Harris (ed) Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. Applications and Services. Lecture Notes in Computer Science. 8020: 19-28. doi:10.1007/978-3-642-39354-9\_3.





