

# Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbags

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 143

**bast**

# Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbags

von

Johannes Holtz  
Roman Heidt  
Gerd Müller

Verkehrs- und Maschinensysteme  
Institut für Land- und Seeverkehr  
Fachgebiet Kraftfahrzeuge  
TU Berlin

Heiko Johannsen  
Michael Jänsch  
Christian Hammer

Verkehrsunfallforschung  
Medizinische Hochschule Hannover

Andreas Büchner

Deutsches HörZentrum Hannover  
Medizinische Hochschule Hannover

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Fahrzeugtechnik Heft F 143**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 82.0576**  
Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbags

**Fachbetreuung**  
Marcus Wisch

**Referat**  
Passive Fahrzeugsicherheit, Biomechanik

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9307  
ISBN 978-3-95606-672-6

Bergisch Gladbach, Februar 2022

## Kurzfassung · Abstract

### Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbags

Airbags sind ein wichtiger Bestandteil der passiven Sicherheitsausstattung von Fahrzeugen, haben sich in den letzten 30 Jahren stark weiterentwickelt und somit die Schutzwirkung für die Insassen weiter erhöht. Ziel dieser Arbeit ist es, auf Basis verschiedener Datensätze die Schutzwirkung von modernen Airbagsystemen aufzuzeigen und weiteres Optimierungspotential offenzulegen. Dabei wurde der Fokus auf die Analyse von Realunfalldaten und Verletzungen durch Airbags und deren Schallpegel gesetzt.

Daten aus dem Unfallgeschehen im Straßenverkehr wurden auf Basis von GIDAS- und NASS-Daten ausgewertet. Mittels der ausgewerteten GIDAS-Daten konnte gezeigt werden, dass bei einem Delta-v von ca. 20 km/h bereits 50 % aller Airbags ausgelöst wurden, welches nicht den Erwartungshorizont der Auslöseschwelle von 25 bis 30 km/h nach KLANNER et al. (2004) entspricht. Außerdem wurde ein Trend erkannt, der zeigt, dass bei neueren Fahrzeugen die Anzahl der Airbagzündungen in einem Unfall steigt. Eine statistische Auswertung von airbaginduzierten Verletzungen ergab, dass keine statistisch signifikanten Ergebnisse in Bezug auf airbaginduzierte Verletzungen entnommen werden konnten, allerdings konnten in den analysierten Fällen leichte Verletzungen identifiziert werden, die durch die Airbagzündung verursacht wurden. Die festgestellten Verletzungen waren beispielsweise Schürfwunden, Prellungen und Verbrennungen bis maximal 2. Grades. Es wurden 14 Einzelfälle analysiert bei denen die Verletzungsschwere höher war, als es die Unfallschwere erwarten ließ. Davon waren elf Unfälle durch schlechte strukturelle Interaktion gekennzeichnet, beispielsweise Unterfahren, zentraler Stoß oder Stoß außerhalb der Längsträger. Im vorliegenden GIDAS-Datenmaterial und in der Analyse von MHH Patientinnen- und Patientendaten konnten Einzelfälle, bei denen es zu Hörschädigung in Folge einer Airbagzündung kam, identifiziert werden, allerdings konnte keine statistisch signifikante Verbindung zwischen Airbagzündung und einer Hörschädigung festgestellt werden.

Auf Basis der analysierten GIDAS-Fälle wurde eine Versuchsmatrix entwickelt, um die aufgezeigten Probleme mittels experimenteller Unfallrekonstruktion und akustischer Messungen zu adressieren. In der Unfallrekonstruktion mit zentralem Baumaufprall konnte gezeigt werden, dass bei dem vorliegenden Fall eine frühere Airbagzündung das Brustverletzungsrisiko hätte senken können und somit

die vorliegende Brustverletzung wahrscheinlich vermieden hätte. In dem analysierten Auffahrunfall mit einer Unterfahrsituation konnte gezeigt werden, dass die Airbagauslösung unnötig war, da das Verletzungsrisiko durch die Airbagzündung nicht reduziert wurde. In diesem Fall hätte eine unterdrückte Airbagzündung die Hörschädigung des Fahrers verhindert.

Im Rahmen der durchgeführten akustischen Messungen wurden systematische Messungen von Schallpegeln in Fahrzeugen während eines Unfalls und im Stand gemessen. Es konnte gezeigt werden, dass die Crashbegleitgeräusche der Fahrzeugdeformation ausreichen, um den Stapediusreflex auszulösen, dadurch ist das Risiko einer Hörschädigung gering – trotz Pegel von über 160 dB. Das Risiko für eine Hörschädigung steigt mit der Anzahl der gezündeten Airbags durch die kurze Aneinanderreihung von Knallereignissen trotz ausgelösten Stapediusreflex. Auch bei frühen Zündzeitpunkten steigt das Risiko einer Hörschädigung, da der Stapediusreflex noch nicht ausgelöst ist oder sich in der Anschwellphase befindet und somit seine Schutzwirkung nicht komplett entfalten kann.

Mit den analysierten Daten konnte gezeigt werden, dass die Schutzwirkung von Airbags unumstritten ist, allerdings wurde Optimierungspotential in den Zündalgorithmen offengelegt. Das gilt für Unfälle mit schlechter struktureller Interaktion und daraus resultierendem nicht optimalen Zündzeitpunkt und für eine unnötige Airbagauslösung bei geringer Unfallschwere. Weiteres Optimierungspotential zur Reduzierung des Verletzungsrisikos besteht bei Airbags hinsichtlich ihres Potentials Schürfwunden, Prellungen, Verbrennungen und Hörschäden zu verursachen.

### Accident injuries in vehicles equipped with airbags

The use of airbags is an important element of the passive safety equipment of vehicles. During the last 30 years airbags showed high improvements in the level of occupant protection. The aim of this project is to reveal the current occupant protection level and the potential for optimisation of the restraint system, with a particular focus on airbags. Based on in-depth data from Germany (GIDAS) and the US (NASS) road traffic accidents were analysed. Experimental accident reconstructions were conducted and volumehearing loss risks were assessed based on airbag activation by noise measurements in crash tests and static airbag deployment tests. In individual case analyses hearing loss was seen.



Based on the GIDAS analysis results a test matrix was developed to address the revealed problems with accident reconstruction and acoustical measurement. In the accident reconstruction that addresses a central pole impact the airbag deployed too late which was linked with causing severe chest injuries. An earlier airbag deployment could lower this injury risk. In the analysed vehicle-vehicle collision it was shown that the airbag deployment did not lower the injury risk. If this unnecessary airbag deployment would have been prevented the temporary hearing loss of the driver would likely not have been occurred.

The acoustical measurements showed that the crash noise itself without airbag deployment is sufficient to trigger the stapedius reflex, which prevents the ear from damage caused by high volume exposure. Therefore the risk for hearing loss is considerably low despite the measured volumes exceeding

160 dB. However, the risk for hearing losses increases with the number of deployed airbags in a car due to the extended duration caused by the sequence of explosions. Also a deployment very shortly after first crash contact of the vehicle increases the risk for hearing losses because the stapedius reflex needs some time for activation.

With the analysed data it was shown that the protection level resulting from airbags is non-controversial, but potential for further optimisation was revealed. In cases with poor structural interaction the airbag triggering time may not always be optimal and in cases with low accident severity the problem of unnecessary airbag deployment should be addressed. Potential to lower injury risk during an airbag deployment was seen for abrasion, burnings, contusions and hearing loss injuries.

---

## Summary

### Accident injuries in vehicles equipped with airbags

#### 1 Scope of work

The use of airbags is an important element of the passive safety equipment of vehicles. During the last 30 years airbags showed high improvement in the level of occupant protection.

The aim of this project was to reveal the occupant protection level and the potential for optimisation of the restraint system, especially the airbag. Based on German In-Depth Accident Study (GIDAS) and National Automotive Sampling Systems (NASS) data road traffic accidents were analysed. Accident reconstructions and acoustical measurements were conducted.

With the analysed data it was shown that the protection level by airbags is non-controversial. Nevertheless, potential for optimisation was revealed. In cases with poor structural interaction the airbag triggering time was found to be not optimal and in cases with low accident severity the problem of unnecessary airbag deployment needs to be discussed further. Potential to lower the injury risk during an airbag deployment were seen for abrasions, burnings, contusions and hearing loss injuries.

#### 2 Methods

A literature review was performed with the aim to document the state of the airbag technology as well as to determine the benefit and potential negative consequences due to airbag deployments. The market penetration of airbags was also calculated based on child restraint compatibility data.

Subsequently, accidents were analysed based on GIDAS and NASS data. The following aspects were considered: Number of deployed airbags, lower airbag deployment threshold, injuries in frontal and lateral accidents with airbags and trigger time. Additionally, a case-by-case study was performed.

Accident reconstructions were conducted based on the findings from the case-by-case analysis. The selected accidents didn't show the full protection level of the restraint system for the occupants. The accident reconstructions were per-

formed twice. The first experiment aimed to reconstruct the accident as good as possible and in the following experiment the restraint system was optimised. Additionally, acoustical measurements were conducted where also the crash noises beside the airbag deployment were considered. The following aspects were considered within the acoustical measurements: Crash noises, level of the different airbag types, multiple airbag deployments and status of windows (closed or open).

All results were collected to derive conclusions and recommendations.

#### 3 Results

##### Airbag technology

The literature review showed that airbag and restraint technology is an ongoing development process. Some identified problems and recommendations from BAST report F53 are already addressed. For example, multiple stage restraint systems, partial adaptive restraint systems and pre-crash sensing are already available in current vehicle types. Due to Euro NCAP requirements, the occupant detection on all seating positions is also state-of-the-art. Nevertheless, in 17 out of 115 rigid wall impacts by Euro NCAP passenger airbag deployments were observed although the passenger seat was not occupied. Further, multiple crash sensing is state-of-the-art and proven as a robust system. No failure of airbag triggering was seen in the data or in the literature published.

The market penetration of frontal airbags was calculated with 100% based on child restraint compatibility data for current vehicles. It was shown that the benefit of airbags is non-controversial in scientific publications; nevertheless, minor to severe injuries can occur.

The only aspect from BAST report F53 which has not been addressed since its publication is the introduction of an underride crash test. The introduction of a test with a 5%-dummy in Europe was conducted by Euro NCAP and will be also addressed by UNECE R137. The automatic detection of rearward facing child seats is covered by the Child Seat Presence and Orientation Detection System (COPD-system) within the ISO TS 22239, but there is a lack of impulses for an intensive market penetration of such systems.

### 3.1 Analysis of accidents and occupants

#### Number of deployed airbags in accidents

The GIDAS data showed that in newer vehicles the number of deployed airbags is higher. These findings can be supported by the analysis of Euro NCAP crash tests, where the same trend was seen.

#### Airbag deployment threshold in GIDAS frontal impacts

The analysed GIDAS data showed that in 10% of the cases airbags have deployed up to a delta-v of 10 km/h. 50% of the airbag deployments happened up to a delta-v of 20 km/h. Airbag non-deployments were documented up to a delta-v of 34 km/h (Figure 3-1).

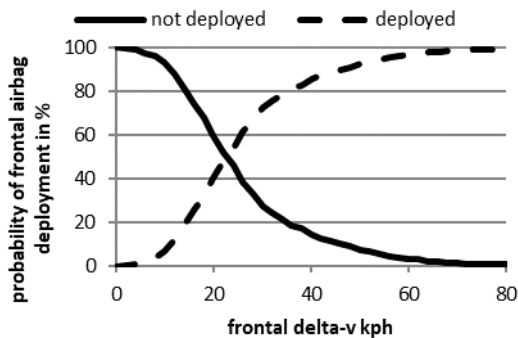


Figure 3-1: Probability of airbag deployments of frontal airbags relatively to delta-v

#### Injuries in GIDAS frontal impacts

The analysis of the injury severity definition as also used in national statistics rereflected the expected trends. In accidents without airbag deployment the injury severities are lower than in accidents with airbag deployments. This could be explained by the fact that an airbag deployment needs a minimal accident severity. Thus, accidents with airbag deployments are in general more severe than those without airbag deployment.

Compared to the AIS injury severity scale the same trend was seen as for the official injury severity. Only a few occupants in vehicles with airbags have injuries of MAIS 3 or higher (Figure 3-2).

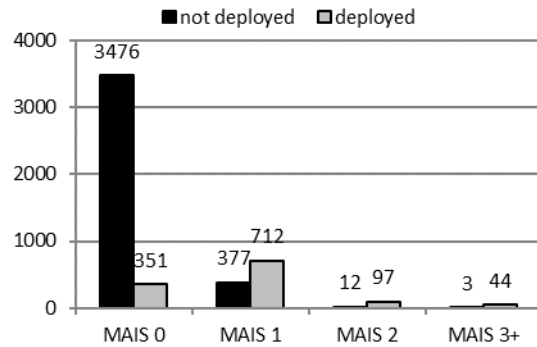


Figure 3-2: MAIS injury severity in accidents with and without airbag deployment

For MAIS 2+ injuries especially chest injuries stand out. Almost all MAIS 2 injuries without airbag had a chest injury. In cases with airbag interaction 52 of 97 cases had an AIS 2 chest injury. In 31 of 44 MAIS 3+ cases chest injuries were partly involved for scoring MAIS 3+.

#### Injuries in GIDAS side impacts

In the majority of the analysed cases for side impact the airbag did not deploy and the occupant were uninjured. The analysis of the official injury severity shows that only 1.6% of the occupants in vehicles without airbag deployment suffered from severe injuries. According to the frontal impact analysis this shows that the airbag deployment needs certain accident severity. Due to this a higher injury severity is anticipated. Further, it was found that the share of severe injured occupants is higher (13%) with only one deployed side airbag compared with a combination of two deployed side airbags (10.8%). The analysis of the MAIS injury severity showed the same trend (Figure 3-3).

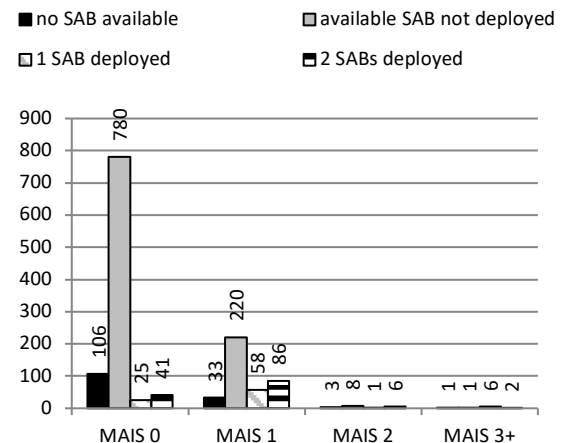


Figure 3-3: MAIS injury severity for side impacts

### Analysis of NASS accident data

Within this project accidents of the years 2014 und 2015 were considered with occupants with known injury severity. The injury severity related to the airbag deployment shows the same trend as in the GIDAS data analysis. However the difference in injury severity in accidents with and without airbag deployment is lower compared to the equivalent GIDAS analysis (Figure 3-4).

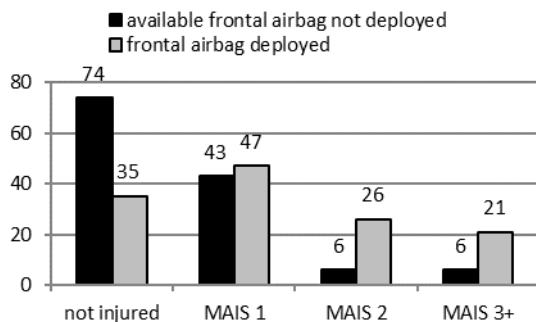


Figure 3-4: Maximum injury severity relative to frontal airbag deployment in NASS CDS data

### Analysis of NASS EDR data

To address airbag trigger time of frontal airbag deployment NASS EDR data (Event Data Recorder) was considered. A mean airbag triggering time of 32ms was calculated. For higher accident severity the triggering time tend to be lower.

## 3.2 Accident reconstructions

Based on the case-by-case analysis of GIDAS data two accidents were reconstructed with full-scale tests. Two accidents were selected in which both vehicles of interest had poor structural interaction. The first case was a frontal impact against a tree. A Seat Leon crashed into a tree with a speed of 50 km/h. The impact zone was 10 cm left outside of the centre line so that both longitudinal beams were not charged. The occupant experienced an AIS 5 serial rib fracture, while this vehicle scored in Euro NCAP a good chest rating.

The second accident reconstruction was a rear-end collision of several vehicles, where the impact of a Fiat 500 into a Skoda Fabia was of interest. The Fiat impacted with 15 to 30 km/h. Due to the pitch movement following the braking of both vehicles an underride situation occurred. Neither the frontal cross beam of the Fiat, nor the rear cross beam of the Skoda were damaged significantly. The airbags of the Fiat de-

ployed during the accident despite the low delta-v. The driver of the Fiat experienced an AIS 1 craniocerebral injury.

### Results accident reconstruction with Seat Leon

With the accident reconstruction the chest injury of the driver was proven. It was determined that the airbag triggering in this case was late during the impact. An earlier airbag triggering time could have reduced the chest deflection as shown with second crash test. Nevertheless the injury risk was still high.

### Results accident reconstruction with Fiat 500

The results of the second accident reconstruction couldn't proof all injuries of the driver by dummy measuring despite the higher impact speed. The measured head loadings could not confirm the documented concussion.

Despite the difference of accident severity between the documented accident and the accident reconstruction these tests showed that airbag triggering in this case had no benefit on the occupant protection despite the higher impact speed.

## 3.3 Acoustical measurements

It was shown that only few systematical tests are available addressing hearing loss in combination with an airbag deployment. Therefore, several acoustical measurements were performed to address the risk of hearing loss during such a blast event. On the one hand, microphones inside and outside the vehicles under test were installed to record the noise of the airbag and the accompanied crash noises and on the other hand airbag deployments were recorded separately to analyse the airbag noise detached from the crash noises. The aim was to determine the risk of a hearing loss and its influencing factors.

### Results of acoustical measurements

Noise levels of up to 160 dB were calculated for the driver airbag at the driver's ear. It was calculated that the crash noises can trigger the stapedius reflex and the risk of hearing loss is low with a triggered stapedius reflex. For multiple airbag deployment (for example driver, passenger and knee airbag) a high risk of a hearing loss was calculated due to the short sequence of blast events even with triggered stapedius reflex. The comparison of airbag deployment with open or closed windows showed a higher risk for

cases with open windows. In vehicles with closed window it was assumed that the pressure inside the vehicle increases and the eardrum is under tension for which reason the transfer of the noise to the inner ear is interrupted.

Comparing the static and dynamic acoustical measurements showed that the analysis of airbag noises needs the accompanied crash noises to calculate the risk of hearing loss considering the stapedius reflex.

## 4 Conclusion

Airbags are equipped in production vehicles for more than 30 years. Together with the three-point-belt they are the most important parts of the restraint system required in vehicle crashes. Due to further development the customer acceptance is very high.

In conclusion the analysis showed that airbags combined with a three-point-belt are an effective and safe restraint system with a high market penetration. Nevertheless, there is a residual risk of suffering from minor or severe injuries issues due to airbag deployments.

The comparison between the benefit of airbags and their potential negative link to a raised injury risk showed that in all analysed scientific literature the benefit of airbags was dominating. However, potentials for the optimisation of airbag triggering times were identified related to child restraint systems, hearing loss and burns.

The work performed showed that accident constellations with poor structural interaction exist and that there is potential for optimisation of the restraint system for accidents with low accident severity. These cases address the trigger algorithm.

The acoustical measurements showed that the stapedius reflex protects the ear in case of an airbag deployment but the risk of a hearing loss raises with multiple airbag deployments or in case of an early triggering time before the stapedius reflex is fully developed.

Future airbag systems and their development should consider additionally the following points:

- Systematical analysis of hearing loss following an airbag deployment and addressing those with quiet airbags
- Analysis of the triggering of the stapedius reflex

- Earlier airbag triggering time in accidents with poor structural interaction
- Avoidance of unnecessary airbag triggering in accidents with low severity
- Lowering of the temperatures and the unfolding speed during an airbag deployment
- Include pre-crash-sensing by using data from driver assist systems
- Adaptive restraint systems that adapt airbag and safety belt according to the occupant and the accident situation so that belt and airbag complement each other

It has to be noted that various safety technologies are appropriate to protect car occupants; however, all of them have in common that they require a high market penetration for highest safety impacts. These market shares can in particular be raised in short-term by consumer protection entities.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung / Vorgehen</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Medienanalyse</b> .....	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>Dokumentation des Standes der Technik</b> .....	<b>14</b>
3.1	Funktionsweise und Schutzwirkung.....	14
3.1.1	Funktionsweise von Airbags.....	14
3.1.2	Angebotene Airbagsysteme.....	14
3.1.3	Generatorsysteme.....	16
3.1.4	Sensortechnik.....	17
3.1.5	Auslösekriterien.....	19
3.2	Geschichte der Airbagtechnologie.....	19
3.2.1	1. Generation – Harte und aggressive Airbags der 80er-Jahre.....	19
3.2.2	2. Generation – Seitenairbags halten Einzug.....	19
3.2.3	3. Generation – Mehrstufige Systeme.....	20
3.3	Marktdurchdringung von Airbagsystemen.....	20
3.4	Nutzen und Schädigung durch Airbagsysteme.....	21
3.4.1	Nutzen von modernen Airbags.....	22
3.4.2	Probleme durch Airbagauslösung.....	24
3.5	Testverfahren.....	27
3.5.1	Frontalaufpralltestverfahren.....	27
3.5.2	Seitenaufpralltestverfahren.....	30
3.6	Expertinnen- und Experteninterviews.....	31
3.7	Fazit zum Stand der Technik.....	32
<b>4</b>	<b>Analyse von Verkehrsunfällen und Unfallbeteiligten</b> .....	<b>32</b>
4.1	Anzahl der ausgelösten Airbags im Unfallgeschehen.....	33
4.2	Airbagauslöseschwelle in GIDAS-Frontalunfällen.....	33
4.3	Verletzungen in GIDAS-Frontalunfällen.....	35
4.3.1	Analyse der Gesamtverletzungsschwere mit und ohne Airbag.....	35
4.3.2	Analyse der Einzelverletzungen.....	36
4.4	Verletzungen in GIDAS-Seitenaufprällen.....	38
4.5	GIDAS-Einzelfallanalyse.....	39
4.5.1	Fall 1: Frontalkollision mit Renault Scenic.....	40
4.5.2	Fall 2: Frontalkollision Nissan Micra.....	40
4.5.3	Fall 3: Frontalkollision Daihatsu Cuore.....	40
4.5.4	Fall 4: Baumaufprall Seat Cordoba.....	41
4.5.5	Fall 5: Baumaufprall Seat Leon.....	41
4.5.6	Fall 6: Laternenkollision Nissan Micra.....	41
4.5.7	Fall 7: Laternenkollision VW Golf.....	41
4.5.8	Fall 8: Laternenkollision Fiat Stilo.....	42
4.5.9	Fall 9: Kollision mit Laderampe Ford Focus.....	42
4.5.10	Fall 10: Unterfahren Mercedes E-Klasse.....	42
4.5.11	Fall 11: Unterfahren Fiat 500.....	43
4.5.12	Fall 12: Unterfahren Skoda Yeti.....	43
4.5.13	Fall 13: Unterfahren VW Polo.....	43
4.5.14	Fall 14: Unterfahren BMW X5.....	43
4.5.15	Zusammenfassung Einzelfallanalyse.....	44
4.6	Patientinnen- und Patientendaten der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH).....	44

---

4.6.1	MHH Zentrale Notaufnahme.....	44
4.6.2	Arztbriefauswertung der Unfallchirurgie .....	44
4.6.3	Ansprache von Patienten des Deutschen Hörzentrums .....	45
4.6.4	Gutachtenfälle des Deutschen Hörzentrums.....	45
4.7	Online-Umfrage.....	45
4.7.1	Inhalt der Umfrage .....	45
4.7.2	Analyse der Umfrageergebnisse.....	45
4.8	Analyse von NASS Unfalldaten .....	47
4.9	Analyse NASS EDR-Daten.....	48
4.10	Fazit zur Analyse von Verkehrsunfällen und Unfallbeteiligten.....	48
<b>5</b>	<b>Unfallrekonstruktion und akustische Messungen.....</b>	<b>49</b>
5.1	Unfallrekonstruktion .....	49
5.1.1	Unfallrekonstruktion mit Seat Leon .....	50
5.1.2	Unfallrekonstruktion mit Fiat 500 .....	55
5.2	Akustische Messungen .....	60
5.2.1	Ziele der akustischen Messungen .....	60
5.2.2	Versuchsaufbau der dynamischen akustischen Messungen .....	61
5.2.3	Ergebnisse der dynamischen akustischen Messungen der Unfallrekonstruktion mit Seat Leon	63
5.2.4	Ergebnisse der dynamischen akustischen Messungen aus den Unfallrekonstruktionen mit Fiat 500	65
5.2.5	Versuchsaufbau der statischen akustischen Messungen .....	67
5.2.6	Ergebnisse der statischen akustischen Messungen .....	67
5.2.7	Vergleich zwischen geschlossenem und offenem Fahrzeug bei statischen Versuchen.....	68
5.2.8	Fazit aller akustischen Messungen.....	68
5.3	Parametervariation durch FEM-Simulationsanalyse.....	69
5.3.1	Modellaufbau .....	69
5.3.2	Parametervarianten der Simulationsmatrix .....	69
5.3.3	Ergebnisse der Simulationsanalyse.....	70
5.3.4	Fazit zur Simulationsanalyse.....	74
<b>6</b>	<b>Probleme aktueller Rückhaltesysteme.....</b>	<b>76</b>
6.1	Hörschäden .....	76
6.2	Nicht optimaler Zündzeitpunkt .....	77
6.3	Unnötige Airbagauslösung bei geringer Unfallschwere .....	77
6.4	Airbaginduzierte Verletzungen.....	77
<b>7</b>	<b>Empfehlung für verbesserte Rückhaltesysteme.....</b>	<b>77</b>
7.1	Empfehlung an die Gesetzgebung und den Verbraucherschutz.....	77
7.2	Empfehlung an die Rückhaltesystementwicklung.....	78
7.3	Empfehlung an die Forschung.....	78
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....</b>	<b>78</b>
	<b>Literatur.....</b>	<b>82</b>
	<b>Bilder.....</b>	<b>86</b>
	<b>Tabellen.....</b>	<b>90</b>

## 1 Einleitung / Vorgehen

Die Zahl der getöteten Unfallbeteiligten konnte in den letzten Dekaden stetig verringert werden. Grund dafür waren unter anderem neue technische Lösungen für die Rückhaltung der Insassen wie beispielsweise der Airbag. Die Auswirkungen einer Airbagzündung wurden immer wieder kritisch hinterfragt und auch in nicht wissenschaftlichen Veröffentlichungen teils negativ behaftet dargestellt. Daher wurde in diesem Projekt der aktuelle Stand bezüglich Airbags erhoben und ein Verbesserungspotential aufgezeigt.

Das Gesamtziel des Projekts war es, Anforderungen an Airbagsysteme zu definieren, die eine weitere Reduzierung des Verletzungsrisikos im Verkehrsunfallgeschehen anstreben. Hierbei wurden insbesondere die Punkte Gefährdung durch den Airbag und Verbesserung der Schutzwirkung thematisiert.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden die folgenden Teilziele definiert:

- Bewertung des Gefährdungspotentials aktueller Airbagsysteme mit Hilfe von Unfall- und Versuchsdaten
- Bewertung des realen Schutzpentials aktueller Airbagsysteme im Vergleich zu Standardtests mit Hilfe von Unfall- und Versuchsdaten
- Analyse von Verbesserungspotential in Bezug auf die Airbagtechnologie und die Anforderungen an Airbagsysteme
- Ableiten von Anforderungen an zukünftige Airbagsysteme

Die Vorgehensweise teilte sich in vier Arbeitspakete.

Im 1. Arbeitspaket wurde eine eingehende Marktanalyse durchgeführt. Dabei wurde vor allem die Funktionsweise von Airbags verschiedener Generationen und deren Zusammenwirkung als Rückhaltesystem mit anderen Komponenten betrachtet. Im Vordergrund standen dabei die Entwicklungsstufen mit den dazugehörigen Problemstellungen und deren Nutzen im realen Unfallgeschehen. Auf den gewonnenen Erkenntnissen des Arbeitspakets wurden Expertinnen- und Experteninterviews durchgeführt, um den aktuellen technischen Stand der Airbagentwicklung bei Zulieferern und Autoherstellern vertiefen zu können.

Grundlage für diese Recherche bilden die beiden BAST-Berichte F53 „Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbags“ [KLANNER et al., 2004] und F75 „Fehlgebrauch der Airbagabschaltung bei

der Beförderung von Kindern in Kinderschutzsystemen“ [MÜLLER et al., 2010]. Auf Basis von veröffentlichten statistischen Untersuchungen und der Analyse von Einzelfällen wurde das Verletzungsrisiko und das Schutzzpotential von Airbags dargelegt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden hinsichtlich der adressierten Probleme aus dem BAST-Bericht F53 „Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbag“ auf Aktualität geprüft und neu offengelegte Probleme dargestellt. Des Weiteren wurde ein Überblick aller die Airbagtechnologie betreffenden Testverfahren in der Gesetzgebung und im Verbraucherschutz gegeben.

Im 2. Arbeitspaket wurde auf Basis von Unfalldaten das Schutzzpotential von Airbags analysiert. Die wichtigste Datenquelle für dieses Arbeitspaket stellen die Daten der German In-Depth Accident Study (GIDAS) dar. Hierbei wurde besonderer Wert auf aktuelle Fahrzeuge gelegt, um veraltete Airbagsysteme weitestgehend nicht zu berücksichtigen. Die Analyse der GIDAS-Daten beinhaltete auf der einen Seite statistische Auswertungen größerer Datenmengen und auf der anderen Seite Einzelfallbetrachtungen. Ergänzend zu den GIDAS-Daten wurden öffentlich zugängliche US-amerikanische Unfalldatenbanken der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) untersucht. Obwohl Abweichungen zwischen den europäischen und den amerikanischen Unfalldaten vorhanden sind, da Fahrzeuge, Fahrzeugnutzung und Nutzung der Sicherheitsausstattung differieren, gaben die Daten ein Indiz für airbagspezifische Probleme, aufgrund der größeren Fallzahlen. Außerdem konnten aus den teilweise vorhandenen Daten der Event Data Recorder (EDR) zusätzliche Informationen gewonnen werden, wie zum Beispiel Zündzeitpunkte der Airbags.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit waren Hörschädigungen infolge des Knallereignisses einer Airbagzündung dazu wurden Unfalldaten und Daten von unfallbeteiligten analysiert. Es wurde eine prospektive Unfallerhebung bei Patientinnen und Patienten des Deutschen Hörzentrums (DHZ) sowie der Unfallchirurgischen Klinik der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH) mit dem Schwerpunkt auf airbaginduzierte Verletzungen durchgeführt.

Um die Nutzendensicht auf den Airbag als solches zu analysieren, wurde ein Fragebogen ent-



wickelt, der sich an Unfallbeteiligte mit Airbaginteraktion richtet und Erfahrungen und subjektive Eindrücke der Unfallbeteiligten erfragt.

In Arbeitspaket 3 wurden verschiedene Versuchsreihen durchgeführt. Einerseits wurden zwei relevante Fälle aus der Einzelfallbetrachtung der GIDAS-Unfalldatenanalyse mit Crashversuchen rekonstruiert, um die Diskrepanz zwischen vorhandener Verletzungsschwere und erwarteter Verletzungsschwere aufgrund der Unfallschwere zu ergründen. Anschließend wurden mit einem zweiten Versuch gleicher Unfallkonstellationen Änderungen in der Wirkung des Rückhaltesystems vorgenommen, um deren Einfluss auf das konkrete Unfallgeschehen zu analysieren. Andererseits wurden Versuche durchgeführt, um den Schalldruck von zündenden Airbags zu messen. Es wurden sowohl Onboard-Messungen als auch Umfeldmessungen durchgeführt während der o.g. Unfallrekonstruktionsversuchen. Ziel war es den Einfluss von Deformationsgeräuschen bewerten zu können mittels Vergleichsmessungen aus den Unfallrekonstruktionen und Airbagzündungen am stehenden Fahrzeug. Die Versuche wurden unterstützt durch Finite-Element-Simulationen (FE-Simulationen), in denen eine umfangreiche Simulationsmatrix aufgestellt wurde, um die untere Auslöseschwelle von Airbags zu adressieren.

Im letzten Arbeitspaket wurden auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse Empfehlungen ausgesprochen, um die Anforderungen an Airbags anzupassen und somit die Schutzwirkung für Insassen durch Airbags zu erhöhen. Der Bezug auf den BASt-Bericht F53 „Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbag“ wurde an dieser Stelle hergestellt. Optimierungsmöglichkeiten in Bezug auf eine Minderung des Gefahrenpotentials wurden erarbeitet.

## 2 Medienanalyse

Aufgrund der weiten Verbreitung von Airbags im Fahrzeugbestand finden sich Berichte in vielen Formen in diversen Medien wieder, die Airbags thematisieren. Für dieses Projekt wurden neben wissenschaftlichen Veröffentlichungen auch Artikel, Fernsehbeiträge, Blogbeiträge, Forenbeiträge und weitere nichtwissenschaftliche Veröffentlichungen analysiert, um die daraus erzielte Wirkung auf die Nutzenden abzuleiten. Im Folgenden wurden die einzelnen analysierten Beiträge losgelöst vom Medium (Internet, Fernsehen, Radio oder Print) thematisch sortiert.

### Umfangreiche Artikel oder Magazinbeiträge

Artikel dieser Kategorie haben meist einen Umfang von einer Zeitschriftenseite und mehr. Aufgrund des Umfangs beleuchteten diese Artikel die Schutzwirkung und Probleme von Airbags von vielen Seiten. So wurde der Airbag als wichtiges Sicherheitssystem in Fahrzeugen hervorgehoben und die Funktion zielgruppengerecht dargestellt. Beispielsweise wurde in einem Bericht aus „Die Welt“ geschrieben: „Wenn's kracht, dann kracht's - und das ist gut so. Jedenfalls wenn der zweite Knall ein bis zwei Hundertstel Sekunden nach dem ersten erfolgt. Denn das bedeutet, dass sich der Airbag rechtzeitig aufgeblasen hat, um die Fahrzeuginsassen beim Aufprall abzufangen“ [MARSISKE, 2006]. Weitere Aussagen, die für den Nutzen des Airbags sprechen, wurden vom „Handelsblatt“ und „derstandard.at“ veröffentlicht: „Der lebensrettende Nutzen von Airbags ist unbestritten.“, „Airbag und Sicherheitsgurt retten zwar einerseits Leben...“ und „moderne Rückhaltesysteme [haben] insgesamt einen großen Beitrag zur Senkung der Zahl der Verkehrstoten geleistet“ [HANDELSBLATT, 2006, DERSTANDARD.AT, 2010]. Andererseits wurden in diesen Beiträgen auch Probleme kritisch analysiert, die in Kombination mit konkreten Ereignissen stehen. Dies können Auffälligkeiten bei der Steuerung oder dem Entfaltungverhalten sein, die auf den Einzelfall bezogen sind. So schrieb „Die Welt“ weiter, dass „die Lautstärke bei der Aktivierung eines Airbags ungefähr einem Gewehrschuss [entspricht], [...] auch die chemischen und physikalischen Abläufe ähneln denen beim Zünden einer Patrone“ [MARSISKE, 2006]. Das Handelsblatt schrieb weiter: „Explodierende Airbags können bei Kindern zu Atemproblemen und dauerhaften Ohrgeräuschen führen. [...] Atemwegbeschwerden traten hingegen auf Vorder- und Rücksitz gleich häufig auf. Auch der Typ des Airbags hatte keinen Einfluss, berichten die Forscher. [...] Das explosionsartige Aufblasen kann mit 170 Dezibel lauter sein als ein Presslufthammer“ [HANDELSBLATT, 2006]. In Bezug auf wissenschaftliche Quellen schrieb „derstandard.at“ weiter, dass „andererseits [...] sie aber auch zahlreiche Brust- und Armverletzungen, wie eine aktuelle Studie zeigt [verursachten]“ [DERSTANDARD.AT, 2010].

Zusammenfassend zeigten umfangreiche Artikel ein positives Bild des Airbags, da die Schutzwirkung hervorgehoben wurde und Probleme als Einzelfälle kritisch hinterfragt wurden. Außerdem wurden Verbesserungsvorschläge gemacht und auf zukünftige Entwicklungen vorausgeblickt. So

schrrieb „derstandard.at“ abschließend: „Wir gehen davon aus, dass unsere Daten die Diskussion um neuartige, abgeschwächter agierende Rückhaltesysteme beleben wird. Ziel der Entwicklung muss sein, sowohl Leben zu retten als auch die oberen Extremitäten vor schweren Verletzungen zu schützen.“ „Die Welt“ fasste zusammen, dass „Die Entwicklung [...] dabei gegenwärtig vor allem in Richtung von Treibladungen [geht], die flexibel aktiviert werden können, um ein variables, verschiedenen Situationen angepasstes Aufblasen des Airbags zu ermöglichen“ [MARSISKE, 2006].



Bild 2-1: Kollage einiger analysierter Zeitungs- und Onlineartikel

### Kurznachrichten

In Lokalzeitungen oder Onlinenachrichtenseiten wurden Verkehrsunfälle meist in sehr kurzen Beiträgen genannt. Dabei könnten die plakativen Überschriften beim Leser ein negatives Bild über Airbags erzeugen, das auch durch den kurzen Text nicht widerlegt wird. In Bild 2-1 wurde einige Überschriften solcher Artikel dargestellt.

### Fahrzeugpräsentationen oder -vergleiche

In Automobilzeitschriften, -fernsehsendungen oder -blogs wurden Medienbeiträge von Fahrzeugtests und -vorstellung analysiert. In diesen Beiträgen wurden Airbags nur in Ausnahmefällen thematisiert, da diese als Basisausstattungsmerkmale angesehen werden. Solche Ausnahmefälle kamen vor, wenn Airbags nicht im Serienumfang enthalten sind oder wenn als positives Beispiel eine Neuerung im Rückhaltesystem, die bis dato in keinem anderen Fahrzeug verbaut war, vorgestellt wurde. Der Grundtenor in diesen Präsentationen oder Tests ließ den Airbag als wichtiges und lebensrettendes Rückhaltesystem dastehen, wenn dies thematisiert wurde.

### Berichte über Rückrufaktionen

Die analysierten Berichte über airbagrelevante Rückrufaktionen hoben vor allem die Anzahl der zurückgerufenen Fahrzeuge in den Vordergrund, die meist bereits im Titel oder Untertitel auftauchte. Vor allem in Bezug auf die Rückrufaktion des Automobilzulieferers TAKATA im Jahr 2016, wurde mit der großen Zahl an betroffenen Airbags von rund 70 Millionen Stück allein in den USA, sachlich umgegangen. Es wurde das technische Problem genauer betrachtet und zusammengefasst, dass diese Problematik in Europa aufgrund der Klimaverhältnisse nicht auftritt. Wirtschaftliche Aspekte wurden hier ebenfalls thematisiert.

### Foren- und Blögeinträge

In Foren- und Blögeinträgen oder auch in Kommentarbereichen und in sozialen Netzwerken zeigte sich ein nicht eindeutiges Bild. Da hier die Nutzenden individuelle Erfahrungen teils mit falschen oder gar keinen Fakten oder unreflektiert aus dem Zusammenhang gerissen wiedergaben, fallen vor allem negativ berichtende Beiträge auf, neben vielen Beiträgen, die die Schutzwirkung von Airbags weiter unterstrichen. So hieß es zum Beispiel in WISNEWSKI (2015): „Daumen und Finger können abgerissen werden, Arme können zahlreiche Knochenbrüche erleiden. Man kann auch schwere Augen-, Gesichts-, Kopf- und Hirnverletzungen erleiden, wenn Airbags auslösen. [...] Die Konsequenz kann dann nur lauten: Raus mit dem Airbag!“ oder in LUDER (2013): „So steigt die Gefahr, vom Airbag erschlagen zu werden, bei den über 55-jährigen um 14 Prozent und bei den „alten Säcken“, den über 75-jährigen sogar um 22 Prozent.“ Diese Beiträge waren allerdings nur Ausnahmen.

### Fazit zur Mediendarstellung von Airbags

Die Analyse der Mediendarstellung von Airbags hat gezeigt, dass Airbags im Großteil der analysierten Berichte positiv dargestellt wurden und ihre Schutzfunktion hervorgehoben wurde. Nur in Kurznachrichten konnte durch fehlende Information der Eindruck entstehen, dass Airbags mehr Risiko- als Schutzpotential haben. Umfangreichere Berichte waren sachlich verfasst, wiesen auf bestimmte Probleme reflektiert hin und zeigten Neuerungen auf. Nutzende wurden im Regelfall nicht für den Ausbau von Airbags gestimmt und nur in wenigen Beiträgen wurde dem Airbag die Schutzwirkung abgesprochen.



Bild 2-2: Beispiele für Airbags: Links: Frontairbags, Mitte: Knieairbag, Rechts: Beltbag [FORD MOTOR COMPANY, 2013]

### 3 Dokumentation des Standes der Technik

In diesem Kapitel wird die Funktionsweise von Airbags und deren Zusammenwirkung als Rückhaltesystem mit anderen Komponenten (Fahrzeuggurt, Pre-Crash-Elementen etc.) beschrieben. Aktuelle und zukünftige technische Entwicklungen in der Insassenrückhaltung und die Ergebnisse einer Marktanalyse werden vorgestellt. Des Weiteren wurde ein Überblick zu Testverfahren der Gesetzgebung und des Verbraucherschutzes erstellt. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden Interviews mit Airbagfachleuten durchgeführt, um den aktuellen technischen Stand der Airbagentwicklung bei Fahrzeugherstellern und ihren Zulieferern zu vertiefen.

#### 3.1 Funktionsweise und Schutzwirkung

Ein Airbagsystem besteht aus einem Stoffsack, einem Gasgenerator, welcher diesen Stoffsack befüllt und den Sensoren mit der Auslöseelektronik, die entscheidet, ob und wie der Gasgenerator aktiviert werden soll. Die Sensoren detektieren bei einem Aufprall z.B. eine starke Beschleunigung und geben diese Information an das Airbagsteuergerät weiter. Dieses entscheidet u.a. ob die Sicherheitsgurte ausreichen, die Gurtstraffer gezündet werden oder ob zusätzlich die Airbags ausgelöst werden sollen. Diese Entscheidungen werden innerhalb von wenigen Millisekunden getroffen und die nötigen Systeme aktiviert, sodass die zu schützenden Personen rechtzeitig durch Gurt und Airbag geschützt werden können. Airbags schützen vor dem Aufprall auf harte Gegenstände im Fahrzeug (z.B. Lenkrad, B-Säule) und verhindern schwere Verletzungen, da durch die Airbaginteraktion die Bewegung des Insassen kontrolliert werden kann [WIESINGER,

2015-1]. Im Folgenden werden die Funktionsweise von Airbags, verfügbare Airbagsysteme, Generatorsysteme, Sensortechnik und Auslöseschwellen von Airbags genauer betrachtet.

##### 3.1.1 Funktionsweise von Airbags

Der Airbag ist ein Teil des Insassenschutzsystems, der sich im Falle eines Unfalls in den Bewegungsraum des Insassen (zwischen Insasse und harten Bauteilen) entfaltet. In diesen Luftsack kann der Insasse eintauchen und somit durch plastische Verformung des Luftsacks relative Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Insassen und Fahrzeug abbauen. Das vollständige Schutzpotential kann nur entfaltet werden in Kombination mit dem Sicherheitsgurt und regelkonformer Sitzhaltung. Grundsätzlich gibt es folgende Hauptziele die für die Rückhaltung des Insassen wichtig sind:

- Vermeidung von Kontakt zwischen Insassen und harten Fahrzeugstrukturen,
- Belastungen des Insassen minimieren (beispielsweise die Verzögerungswerte) und
- Frühzeitige Ankopplung des Insassen an die Fahrzeugverzögerung.

Für eine optimale Schutzwirkung sollte sich der Airbag schon vor dem ersten Kontakt mit dem Insassen komplett entfaltet haben. Während des Kontakts mit dem Insassen sollte der Airbag eine entsprechende Plastizität bieten, um den Insassen mit einer möglichst geringen Verzögerung zu belasten, allerdings genug Festigkeit aufweisen, damit der Insasse nicht den Airbag durchschlägt.

##### 3.1.2 Angebotene Airbagsysteme Frontairbags

Die hier angegebenen Airbags schützen den Insassen in Fahrtrichtung des Fahrzeugs. Je nach Lastfall und Auslösealgorithmus können diese Airbags auch bei Unfällen anderer Stoßrichtungen ausgelöst werden.

Der Fahrer- beziehungsweise Beifahrerairbag schützt die Frontinsassen bei Frontalkollisionen vor dem Aufprall mit dem Oberkörper und Kopf auf dem Lenkrad oder dem Armaturenbrett (Bild 2-2 Links) [KRAMER, 2013, ZF TRW, 2014]. Des Weiteren entlasten sie den Hals durch die gemeinsame Rückhaltung von Kopf und Oberkörper im Vergleich zur alleinigen Rückhaltung durch den Gurt, bei der der Kopf ausschließlich durch den Hals zurückgehalten wird [UNECE R94, 2012, STOCK, 2013]. Die Bezeichnung als Fahrer- beziehungsweise Beifahrerairbag ist nicht mehr zeitgemäß, da diese Sitzpositionen durch weitere Airbags zusätzlich geschützt werden. Trotzdem wird weiterhin mit diesen Begriffen immer nur der frontal wirkende Airbag für Kopf und Brust in der Fachwelt und entsprechend der Literatur benannt.

Knieairbags sitzen im Armaturenbrett und haben je nach Bauart verschiedene Aufgaben (Bild 2-2 Mitte). Zum einen werden bei einem Aufprall die Knie geschützt, sodass diese nicht von unten gegen das Armaturenbrett schlagen und zum anderen werden ein Durchrutschen der zu schützenden Person unter dem Gurt (sog. Submarining) und ein Verdrehen des Körpers verhindert. Außerdem sollen Knieairbags in Verbindung mit größeren Frontairbags den Sicherheitsgurt ergänzen [KRAMER, 2013]. So wird durch Knieairbags das Becken stabilisiert, Submarining verhindert und die Femurbelastung kontrolliert.

Eine weitere Innovation, die bereits in wenigen Fahrzeugen verfügbar ist, sind Beltbags (Bild 2-2 rechts) [WELT N24, 2012]. Das sind im Sicherheitsgurt integrierte Airbags, die auf den Rücksitzen verbaut werden. Ziel ist es bei einem Frontalunfall die Fondinsassen möglichst gut abzufangen, indem der Gurtairbag auslöst und dadurch den Sicherheitsgurt um ein Vielfaches verbreitert wird. Durch die größere Kontaktfläche zwischen Gurt und Thorax wird die Flächenpressung verringert, die Kraft besser verteilt und das Verletzungsrisiko gesenkt. Es können dadurch Verletzungen an Rippen minimiert werden. [BURCZUK & MERZ, 2013]

Selten wird der Anti-Sliding-Bag verbaut, welcher sich im vorderen Teil des Sitzkissens unterhalb der Oberschenkel entfaltet (Bild 3-1). Dieser soll Submarining verhindern und das Becken stabilisieren. [KRAMER, 2013].



Bild 3-1: Funktionsweise eines Anti-sliding-Airbags [BIRCH, 2008]

### Seitenairbags

Seitenairbags schützen den Insassen lateral zur Fahrtrichtung des Fahrzeugs. Je nach Lastfall und Auslösealgorithmus können diese Airbags auch bei nicht-lateralen Unfällen ausgelöst werden.



Bild 3-2: Beispiele für Seitenairbags. Seitenairbag entfaltet sich aus der Rückenlehne und der Vorhangairbag überdeckt die Fensterfront zwischen A- und C-Säule

Seitenairbags, die vor intrudierenden Teilen schützen, gibt es als Thorax-, Kopf- und kombinierten Kopf-Thoraxairbags. Thoraxairbags befinden sich seitlich in den Sitzlehnen oder in den Türverkleidungen und schützen den seitlichen Brust- und Bauchbereich bei Unfällen mit lateraler Krafteinwirkung. Kopfairbags entfalten sich auch bei Überschlägen. Das Ziel ist es den Kopf vor seitlichen Aufschlägen gegen die B-, C- oder D-Säulen, die Scheiben und eindringende Strukturen (z.B. beim seitlichen Pfahlaufprall) zu schützen. Außerdem kann auch ein Heraus-schleudern des Kopfes und des Körpers aus dem



Fahrzeug vermieden werden. Diese Art von Airbag wird oft als Vorhangairbag (sog. Curtain-airbag) über die gesamte Innenraumlänge entlang der Seitenfenster aufgespannt [KRAMER, 2013]. Da Cabrios keinen festen Dachrahmen besitzen, wird die Kombination aus Thorax- und Kopfairbag meist bei solchen Fahrzeugen verwendet [KRAMER, 2013].

Eine Neuentwicklung sind Airbags in den Sitzwangen, die die zu schützende Person bei einer drohenden seitlichen Kollision in der Pre-Crash-Phase in Richtung Fahrzeugmitte verschiebt. Dadurch vergrößert sich der Abstand zwischen der zu schützenden Person und der Türinnenverkleidung. Diese Airbags haben keinen direkten Kontakt mit der zu schützenden Person. [HEINE et al., 2017]

### Weitere Airbagsysteme

Für Fahrzeuge mit kurzem hinterem Überhang kann ein Heckairbag vor eindringenden Teilen oder splitternden Scheiben schützen. Ein solcher Airbag wurde im Toyota IQ als Vorhangairbag vor der Heckscheibe umgesetzt [AUTO.DE, 2008].

Eine weitere Entwicklung ist der von Genera Motors Company als Front Center Airbag benannte Kopfairbag für die vorderen Sitzplätze, welcher sich zwischen den Vordersitzen aus dem Dachhimmel oder aus der Seite des Sitzes entfaltet und beide Insassen vor einem Zusammenstoß miteinander bewahrt [KRIEBEL, 2011]. Auch auf dem europäischen Markt wurden die ersten Mittenairbags bereits eingeführt. Seit 2017 ist ein Mittenairbag für vordere und hintere Sitzbank beispielsweise im Audi A8 erhältlich. Ziel ist es mit Mittenairbags die Zielwerte für die Bewertung des stoßabgewandten Insassen zu erfüllen nach EURO NCAP (2018).

Es existieren auch andere Airbagsysteme, die nicht in Kontakt mit den Insassen kommen. Das ist zum Beispiel der Fußgängerairbag, der Fußgänger bei einem Aufprall auf die Windschutzscheibe oder die A-Säulen schützt [WINTERHAGEN, 2012]. Hinzu kommen auch Konzepte, wie Seitenairbags außen an der Karosserie, die den Aufprall abfangen oder Bremsairbags, die sich unter dem Auto entfalten und den Unterboden gegen die Fahrbahn drücken, um eine größtmögliche Verzögerung zu erzielen [MAYER, 2015, WELT N24, 2015, VIEWEG, 2009]. Diese Systeme sind allerdings nicht Bestandteil dieser Untersuchung.

### 3.1.3 Generatorsysteme

Der Gasgenerator ist eine der wichtigsten Komponenten eines Airbags, da er für eine schnelle Entfaltung des Luftsacks sorgt, indem die geforderte Gasmenge in wenigen Millisekunden zur Verfügung gestellt wird. Wichtig ist dabei die Generatorkennung, die den Volumenstrom über die Zeit definiert. Die Generatoren für die verschiedenen Airbagsysteme differieren je nach Lage und Funktion des Airbags, allerdings ist der grundsätzliche Aufbau des Generators und dessen Funktion ähnlich. Es wird in pyrotechnische, Kaltgas- und Hybridgasgeneratoren unterschieden [KRAMER, 2013].

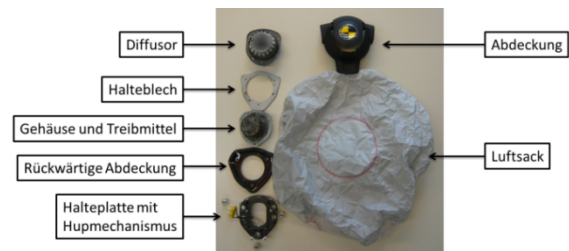


Bild 3-3: Aufbau eines Fahrerairbags mit pyrotechnischem Gasgenerator (nach der Zündung zerlegt)

### Pyrotechnische Generatoren

Bei pyrotechnischen Generatoren wird das Treibmittel pyrotechnisch entzündet und das entstehende Gas in den Luftsack geleitet. Es wird durch eine Primärzündung aus Schwarzpulver oder Bleitriazinat [KRAMER, 2013] die Gaserzeugung des eigentlichen pyrotechnischen Treibmittels ausgelöst. Als Treibmittel werden natriumazidhaltige und azidfreie Verbindungen genutzt, welche sich meistens in Form von Tabletten im Gasgenerator befinden. Bei der Reaktion des Treibmittels entsteht annähernd reines Stickstoffgas [KRAMER, 2013]. Die heißen Gase, die durch das Abbrennen der Treibladung entstehen, strömen vom Gasgenerator in den Luftsack über. Dabei werden die Gase durch einen Diffusor so geleitet, dass einerseits der Luftsack sich optimal entfalten kann und andererseits zum richtigen Zeitpunkt komplett entfaltet ist, bevor der Insasse in diesen eintaucht. Außerdem soll das Gewebe nicht direkt mit heißen Gasen punktuell angeströmt werden. Das Treibmittel brennt mit etwa 1.100 bis 1.300°C ab und weist durch die Expansion nach der Entfaltung im Luftsack etwa 150°C auf, allerdings nimmt das Stoffstreckgewebe diese Temperatur nicht an, da die Standzeit zu gering ist [KRAMER, 2013].

### Kaltgasgeneratoren

Bei einem Kaltgasgenerator ist das Gas, welches den Luftsack befüllen soll, in einem Gasdruckbehälter komprimiert. Durch eine pyrotechnische Zündung wird der Öffnungsmechanismus aktiviert und das Gas kann in den Luftsack strömen [ISI AIRBAG GMBH, 2002]. In dem Gasdruckbehälter werden beispielsweise Helium oder Argon mit einem Druck bis zu 250 bar gespeichert [KRAMER, 2013].

Der Vorteil von Kaltgasgeneratoren liegt in den geringeren Temperaturen und das dadurch geringere Risiko von Verbrennungen. Außerdem hat der Luftsack eine deutlich längere Standzeit als pyrotechnisch gefüllte Luftsäcke, die unverzüglich in sich zusammenfallen. Kaltgasgeneratoren eignen sich vor allem bei Vorhangairbags, da diese bei Überschlagunfällen mehrere Sekunden den Insassen vor dem Herausschleudern schützen [ISI AIRBAG GMBH, 2002].

### Hybridgasgeneratoren

Eine Kombination aus Kaltgas- und pyrotechnischem Generator sind Hybridgasgeneratoren. Dabei wird der Luftsack mittels einer Kombination aus Heißgas der pyrotechnischen Zündung und Kaltgas aus einem Druckgasbehälter gefüllt. Ein Vorteil der Hybridgasgeneratoren ist die längere Standzeit der Airbags, die besonders bei Überschlagunfällen wichtig ist. Des Weiteren sind die Temperaturen durch die Nutzung des Kaltgases geringer als bei pyrotechnisch gezündeten Airbags, einhergehend mit einem geringeren Risiko von Verbrennungen. Hybridgasgeneratoren eignen sich für Thorax- oder Curtainairbags. Sie können allerdings auch für Frontairbags eingesetzt werden. So wurde der Citroën C4 Cactus als erstes Serienauto mit einem Beifahrerairbag mit Hybridgasgenerator ausgestattet. Dieser ist als zweites Novum hier auch im Dachhimmel untergebracht [INSASSENSCHUTZ.50WEBS.COM, 2007].

### Mehrstufigkeit und Adaptivität

Die Mehrstufigkeit von Airbags adressiert meist den Gasgenerator, da dieser die Gasmenge geeignet kontrollieren muss. Neben dem Gasgenerator können auch schaltbare Auslass- oder Umströmöffnungen im Luftsack selbst eine oder mehrere Stufen im System definieren. Dies wird durch zwei verschiedene Zündstufen umgesetzt, die je nach Bedarf durch den Zündverzug die Härte, Größe und Entfaltungsgeschwindigkeit des Airbags beeinflussen. Bei einem mehrstufigen Airbag werden immer alle Stufen gezündet,

um Insassen und Rettungskräfte nach der Airbagzündung nicht zu gefährden. Die sogenannte Entsorgungszündung findet dann beispielsweise erst 150 ms nach dem Aufprall statt, wenn die Interaktion zwischen Airbag und dem Insassen bereits abgeschlossen ist.

Mehrstufigkeit bedeutet allgemein, dass es mindestens zwei verschiedene konstante Niveaus in der Systemantwort gibt. Beispielsweise gibt es bei zwei Zündstufen bis zu drei verschiedene Druckniveaus im Airbag bedingt durch die Auslösung der ersten, zweiten beziehungsweise beider Stufen. Eine Mehrstufigkeit des ganzen Rückhaltesystems kann beispielsweise auch durch Active Vents, zusätzliche Ab- oder Umströmöffnungen, mehrstufige Gurtkraftbegrenzer und Gurtstraffer realisiert werden.

Ein adaptives System ist ein anpassungsfähiges System, das auf den Systemeingang reagiert und die Systemantwort dementsprechend verändert [BENDEL, 2004]. Bei der Insassenrückhaltung heißt das, dass während der Rückhaltung das System durch gezielte Eingriffe (z.B. durch Unterdrücken der nächsten Zündstufe oder Aktivierung einer Auslassöffnung) die Rückhaltung verändern kann und somit das Verletzungsrisiko für den Insassen geringer ist. Bei Airbags sind die beeinflussenden Faktoren die zu schützende Person und die Unfallschwere und -richtung. Da die einzelnen Komponenten des Rückhaltesystems nicht stufenlos adaptiv sind, ist eine ideale Rückhaltung für jeden Lastfall derzeit nicht möglich, allerdings kann durch Kombination verschiedener mehrstufiger Komponenten die ideale Rückhaltung an den einzelnen Lastfall durch kleinere Abstufungen angenähert werden [BRAESS & SEIFFERT, 2013].

#### 3.1.4 Sensortechnik

Die Sensoren zur Steuerung der verschiedenen Airbags teilen sich in diejenigen auf, die an potentiellen Deformationszonen der gesamten Karosserie das Unfallereignis detektieren, und in die Sensoren, die zur Personenerkennung auf dem Sitz bestimmt sind. Zusätzlich befinden sich im Airbagsteuergerät Beschleunigungssensoren. Sensoren zur Unfalldetektion arbeiten meist auf dem Prinzip der Beschleunigungsmessung, außerdem werden Drucksensoren verwendet. Sensoren zur Sitzerkennung bestimmen die Parameter und Sitzposition der Personen im Fahrzeug (beispielsweise Körpermasse oder Sicherheitsstatus). Die Daten aller Sensoren werden im Air-

bagsteuergerät verarbeitet und je nach hinterlegtem Zündalgorithmus wird das Rückhaltesystem bedarfsgerecht ausgelöst, um das Verletzungsrisiko bei einem Unfall zu minimieren.

### Unfallerkennung

In heutigen Fahrzeugen sind zur Detektierung von Kollisionen am Fahrzeug, neben den Beschleunigungssensoren im Airbagsteuergerät, auch Sensoren in den Deformationszonen verbaut, welche eine Kollision zu einem möglichst frühen Zeitpunkt erkennen und deren Schwere detektieren sollen [BURG & MOSER, 2007]. Sensoren im Stoßfängerbereich werden nach BURG & MOSER (2007) und KRAMER (2013) als Up-Front Sensoren bezeichnet. Für den Seitenaufprall befinden sich Sensoren beispielsweise in der Tür (KRAMER, 2013). Diese Daten werden an das Airbagsteuergerät weitergeleitet, verarbeitet und das Rückhaltesystem an die Unfallschwere und die Personen zeitgerecht angepasst. Die Daten der verschiedenen Sensoren werden miteinander abgeglichen und auf Plausibilität geprüft. Im Falle einer Detektierung eines Seitenanpralls können auch Drucksignale verarbeitet werden (z.B. Überdruck in der Tür durch Eindrückung) [KRAMER, 2013]. Körperschallsensoren sollen die durch Deformation entstehenden Schwingungen am Fahrzeug, und somit die Kollision, früher erkennen als bisherige Beschleunigungssensoren. Diese sind allerdings noch nicht serienreif [CONTINENTAL AG, 2008].

Zusätzlich zu den bestehenden Sensoren werden neue Technologien entwickelt, welche den Unfall vor dem Aufprall detektieren [VIEWEG, 2009]. Dazu gehören Laser, Radar und Kameras, welche bis jetzt die Funktionen der aktiven Sicherheitssysteme unterstützen [WINTERHAGEN, 2012]. Die Auswertung dieser Sensoren kann Unfälle vorhersehen und dementsprechend können passive Sicherheitssysteme, beispielsweise Fahrzeuggurt und Airbags, vor dem Aufprall die Zündung einleiten [MARSISKE, 2006]. Dadurch kann vor allem im Seitenaufprall der kleine Raum zwischen der schützenden Person und Fahrzeugstruktur besser genutzt werden, da der Airbag schon vor dem Einsetzen der Relativbewegung zwischen Fahrzeug und Insassen entfaltet werden kann. Außerdem können mit Pre-Crash-Sensoren auch die Unfallpartner detektiert und klassifiziert werden, wie Nutzfahrzeuge, Bäume oder andere Objekte. Dadurch könnte die Auslösung des Rückhaltesystems dem Unfallpartner entsprechend früher oder später geschehen (Adaptivität).

### Detektieren von Personen im Innenraum

Eine Erkennung der Personen im Innenraum ist wichtig für die Aktivierung der jeweiligen Rückhaltesysteme. Mit Hilfe von Sensoren lassen sich die Sitzposition, Größe und Gewicht der Person bestimmen. Dazu werden diverse Messverfahren eingesetzt: Tauchspulenprinzip, Hallsensoren oder Dehnungsmessstreifen werden verwendet [DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT, 1999]. Da die Erkennung von Kindersitzen mit diesem System nicht vollständig erfolgen kann, gibt es dafür andere Lösungen [KRAMER, 2013]. Konventionell funktionieren solche Systeme manuell durch Eingriff der Insassen, beispielsweise über eine Schlüsselschaltung im Handschuhfach. Es existieren auch Kindersitze mit Transpondern, die bei korrespondierenden Empfängern im Fahrzeug den Einbauzustand des Kindersitzes übermitteln. Mit dieser Information kann das Airbagsteuergerät die Airbagzündung an dem entsprechenden Sitzplatz verweigern [ROBERT BOSCH GMBH, 2013]. Der Nachteil der transponderbasierten Systeme ist, dass diese nicht einheitlich sind und nicht alle Kindersitze über einen Transponder verfügen. Das Child Seat Presence and Orientation Detection System (COPD-System) wurde im Rahmen der ISO TS 22239 im Jahr 2009 vereinheitlicht. Allerdings nutzen aktuell nur wenige Fahrzeug- und Kindersitzhersteller diese Spezifikation [KRAMER, 2013, ISO TS 22239, 2009].

Um einen genaueren Überblick über das Geschehen im Fahrzeug zu erhalten, werden optische Systeme entwickelt [ROBERT BOSCH GMBH, 2006]. Mit Hilfe von Kameras werden zwei- und dreidimensionale Merkmale wie Größe und Sitzposition der Personen im Innenraum erfasst. Out-of-Position Situationen sollen rechtzeitig erkannt und ihnen mithilfe von Sitzeinstellungen oder Airbaganpassung entgegengewirkt werden. Das größte Augenmerk liegt in der Softwareentwicklung, damit Personen einerseits zuverlässig erkannt, andererseits auch deren Bewegungen, bis hin zu deren Beschäftigungen analysiert werden können [GROSCH, 2016]. Out-of-Position Situationen beschreiben Insassenpositionen im Fahrzeug, bei denen durch die Positionierung des Insassen das Schutzpotential nicht optimal ausgenutzt wird oder gar herabgesetzt werden kann, beispielsweise wenn das Kinn auf dem Lenkrad oder die Unterschenkel auf dem Armaturenbrett abgelegt werden.

### 3.1.5 Auslösekriterien

Das wichtigste Auslösekriterium ist die Hauptstoßrichtung bei einem Unfall. Diese entscheidet welche Airbags ausgelöst werden sollen. Bei einem Winkel von je ca. 30 Grad zur Fahrzeuglängsachse sind die Airbags betroffen, die in Richtung der Längsachse öffnen, wie Front-, Knie- und Beltbags. Bei rein seitlicher Beschleunigung entfalten sich nur die Seitenairbags, wie Kopf-, Thorax- und Vorhangairbags. Ist die Hauptlastrichtung in einem Unfall schräg, ca. 60 Grad von der Fahrzeugquerachse in Richtung Fahrzeuglängsachse, so werden die zugehörigen in Längs- und Querrichtung öffnenden Airbags gezündet [WIESINGER, 2015-2].

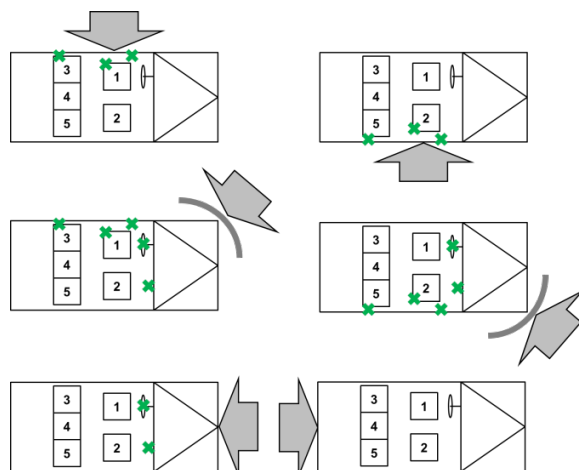


Bild 3-4: Hauptstoßrichtung und assoziierte Airbags [nach VOLKSWAGEN AG, 2010]

Ob die betroffenen Airbags überhaupt bei einem Unfall zünden oder die anderen Komponenten des Rückhaltesystems ausreichen, wird auf Basis von verschiedenen Sensordaten entschieden. Beispielsweise kann beim Überschreiten einer Verzögerung von 2 g durch eine Berechnung die sogenannte kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung bei einer Abtastrate von 1000 Hz ermittelt werden [PETERSEN, 2003, BURG & MOSER, 2007, KRAMER, 2013]. Mit Hilfe dieses Wertes wird über die Zündung der Airbags entschieden [PETERSEN, 2003]. Hierfür muss auch der Zündzeitpunkt für die Aufprallgeschwindigkeit ermittelt werden, da Berechnungs-, Auslösedauer und Vorverlagerung der zu schützenden Person berücksichtigt werden müssen. Ein weiteres Auslösekriterium ist die Sitzbelegung. Sitze, welche nicht besetzt sind, werden registriert und die Airbagzündung wird an den entsprechenden Stellen verhindert, um Kosten bei einer Instandsetzung zu sparen und die anderen Personen im Fahrzeug weniger zu belasten [KRAMER, 2013].

Die hier angegebenen Daten sind der aufgeführten Literatur entnommen. Genaue Auslösekriterien und Algorithmen sind fahrzeugspezifisch und sind öffentlich nicht zugänglich.

## 3.2 Geschichte der Airbagtechnologie

### 3.2.1 1. Generation – Harte und aggressive Airbags der 80er-Jahre

Seit den 50er Jahren existieren die ersten Patente, die Airbags zum Insassenschutz beschreiben. In den 70er Jahren gab es erste Versuche von General Motors Company, Fahrzeuge mit Airbags auszustatten, allerdings wurden erst Anfang der 80er Jahre die ersten Serienairbags für die Fahrerposition in der Mercedes S-Klasse verbaut [KRAMER, 2013]. Airbagsysteme der 1. Generation bestehen aus Crashsensoren, dem Steuergerät, einem einstufigen Gasgenerator und dem eigentlichen Luftsack. Airbags dieser Generation waren sehr groß und hatten eine große Entfaltungsgeschwindigkeit, da sie für höhere Geschwindigkeiten und auf den 50%-Dummy ausgelegt waren. Ein 50%-Dummy beschreibt eine anthropometrische Testpuppe, die in ihren Abmaßen einen durchschnittlichen Mann entspricht – dem sog. 50. Perzentil – das heißt, dass 50 % aller Männer größer und schwerer bzw. kleiner und leichter als ein 50%-Dummy sind.

Das Verletzungsrisiko bei dieser Airbaggeneration war hoch. Es traten besonders bei niedrigen Geschwindigkeiten und bei kleineren und leichteren Personen Verletzungen auf, die bei einer ausschließlichen Rückhaltung durch den Sicherheitsgurt nicht aufgetreten wären. Zudem war die Auslöseelektronik noch nicht ausgereift, wodurch auch Fehlzündungen vorkamen, die selbst Unfälle auslösen konnten. Bis etwa Mitte der 90er Jahre wird von Airbags der 1. Generation gesprochen [MACLENNAN et al., 2007].

### 3.2.2 2. Generation – Seitenairbags halten Einzug

Airbags der zweiten Generation hatten ab Mitte der 90er Jahre eine verbesserte Auslöseelektronik und einen abgeschwächten Gasgenerator, dadurch sollten Fehlauslösungen reduziert und auch kleinere und leichtere Personen auf den Vordersitzen besser geschützt werden



[KHOUZAM et al., 2016]. Die Wirksamkeit dieser Änderungen war gering, so gab es Ende der 90er Jahre weiterhin Airbagfehlzündungen und die Verletzungsgefahr von kleineren und leichteren Personen sank kaum im Vergleich zur Vorgängergeneration [MACLENNAN et al., 2007 WÜST, 1999]. In dieser Zeit kamen auch neue Airbagmodelle auf den Markt, wie Thorax-, Scheiben- und Kopfairbags, welche vor allem bei Seitenaufprällen schützen. In Tab. 3-1 ist ein zeitlicher Verlauf der Einführung von Airbags aufgezeigt.

1951	<b>Patent DE 896312 erteilt an Walter Linderer</b>
1974 bis 1976	"Air Cushion Restraint System" von GM als Testphase
1981	<b>1. Airbaggeneration</b> – Fahrerairbag von Mercedes
1987	Beifahrerairbag von Mercedes
1995	Seitenairbag von Volvo
1996	Knieairbag von Kia
1997	Kopfairbag von BMW
1998	<b>2. Airbaggeneration</b> – Kopfairbag im Fond von Volvo
2002	Sitzpolsterairbag von Renault
2003	<b>3. Airbaggeneration</b>
2008	Heckairbag als Vorhang im Toyota IQ
2011	Gurtairbag von Ford
2016	Sitzwangenairbag von Mercedes zündet vor $t_0$

Tab. 3-1: Zeitlicher Verlauf der Einführung von Airbags im Serieneinsatz [nach SÜDDEUTSCHE ZEITUNG, 2010, MIDSOUTH RESCUE TECHNOLOGIES, 2017 und FORD MOTOR COMPANY, 2013]

### 3.2.3 3. Generation – Mehrstufige Systeme

Die dritte und aktuellste Entwicklungsstufe berücksichtigt eine gestaffelte Zündung. Bei Airbags der 1. und 2. Generation gab es nur eine Zündstufe. Moderne Airbags passen sich der Unfallschwere an, indem verschiedene Zündstufen mit variablem Zeitversatz ausgelöst werden. Bei einem Unfall mit geringerer Schwere wird nur eine Stufe des Airbags gezündet, wodurch der

Airbagdruck niedriger ist. Dadurch kann die Insassenbelastung bei Unfällen mit geringeren Geschwindigkeiten reduziert werden [SAFECAR, 2016]. Bei hoher Unfallschwere werden dementsprechend mehrere Zündstufen ausgelöst. Die verschiedenen Zündstufen können außerdem die Größe und das Gewicht der zu schützenden Person adressieren, so kann beispielsweise bei einer leichten Person zur optimalen Rückhaltung nur eine Zündstufe verwendet werden. Werden für die Rückhaltung nicht alle Zündstufen benötigt, so werden meist die übrigen Zündstufen zu einem späteren Zeitpunkt ausgelöst, um Rettungskräfte und andere Beteiligte vor ungewollten Zündungen zu schützen [SPRINGER et al., 2008, VOLKSWAGEN AG, 2010].

Eine andere Methode den Airbagdruck und die Entfaltung zu steuern, die zurzeit in der Entwicklung ist, ist die Umleitung der Füllgase innerhalb des Airbags und vorbei am Airbag, um einen angepassten Druck zu erzeugen. Ab- oder Umströmöffnungen können sich während der Rückhaltung anpassen und somit das Verhalten des Airbags beeinflussen. Diese sogenannten Active Vents adressieren sowohl kleine und leichte Personen, als auch Out-of-Position Fälle [TRW AUTOMOTIVE, 2015].

## 3.3 Marktdurchdringung von Airbagsystemen

Auf Basis der CSC-Kindersitz-Kompatibilitäts-Datenbank<sup>1</sup> wurde die Marktdurchdringung von Airbagsystemen analysiert. Die Sonderabfrage beinhaltete Fahrzeuge die nach dem Jahr 2005 erschienen sind, da dadurch alle analysierten Fahrzeuge nach ECE-R94 getestet wurden und Airbags der 3. Generation verbaut sind. Insgesamt wurden 633 Fahrzeugtypen analysiert. Da die Datenbank Kindersitzthemen adressiert, konnte der Fahrerplatz nicht ausgewertet werden. Es ist davon auszugehen, dass dieser mindestens die gleiche Ausstattung hat wie der Beifahrersitzplatz. Knieairbags werden in der Regel öfter auf dem Fahrerplatz verbaut als auf dem Beifahrerplatz, sodass insbesondere bei diesem Airbagtyp eine Unschärfe durch das Außerachtlassen des Fahrerplatzes entsteht. Das heißt, dass Knieairbags häufiger verbaut sind, als die Analyse zeigt. Des Weiteren muss berücksichtigt

<sup>1</sup> CSC – Car Safety Consulting UG; <https://car-safety.de>

werden, dass einige Airbags nur optional erhältlich sind.

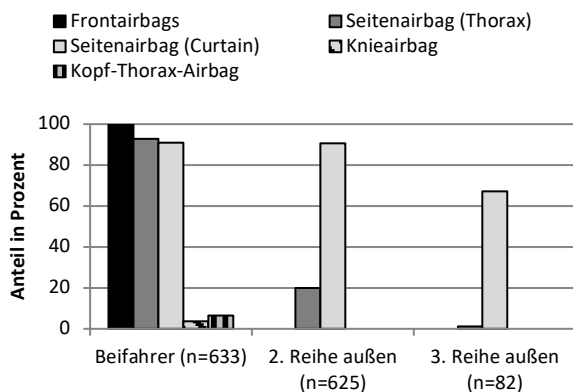


Bild 3-5: Marktdurchdringung der einzelnen Airbagtypen nach Sitzplatz

Es konnte gezeigt werden, dass in allen analysierten Fahrzeugen ein Beifahrerairbag verfügbar war. Dies bestätigt die Vorhersage von KLANNER et al. (2004), dass im Jahre 2015 eine 100%-Ausrüstquote bei Frontairbags erreicht würde. Lediglich in neun Fahrzeugen war kein Seitenairbag auf dem Beifahrersitzplatz für Thoraxinteraktion (weder Thorax- noch Kopf-Thorax-Airbag) und in 17 Fahrzeugen war kein Seitenairbag für Kopfinteraktion verfügbar (weder Vorhang- noch Kopf-Thorax-Airbag). In der zweiten Sitzreihe dominiert der Vorhangairbag, da dieser meist von der A-Säule bis zur C-Säule reicht. Nur in 20 % der Fahrzeuge war ein Seitenairbag in der 2. Sitzreihe verfügbar. Bis auf die optionalen Gurtairbags im Ford Mondeo wurden keine weiteren Airbags auf der Rücksitzbank registriert. In der Untersuchung hat sich gezeigt, dass ein Großteil der Thorax- und Kopf-Thorax-Airbags im Sitz und nur selten in der Tür integriert sind (Tab. 3-2).

Die Marktanalyse deckt sich mit den Untersuchungsergebnissen aus dem BAST-Bericht M258 aus dem Jahr 2015 bei dem auf Basis von Interviews von Nutzenden Ausstattungsquoten von 98 % für Frontairbags, 88 % für Seitenairbags und 57 % für Kopfairbags berechnet wurden. Allerdings wurde hierbei das Alter der Fahrzeuge nicht explizit betrachtet.

Zusätzlich wurden mittels der CSC-Datenbank die Gurtkomponenten ausgewertet. In den analysierten Fahrzeugen waren auf allen Sitzplätzen Dreipunktgurte verbaut. Auch hier zeigt sich das Bild, dass der Beifahrersitzplatz in den meisten analysierten Fahrzeugen eine hohe Ausstattungsquote aufweist (Bild 3-6). So waren in nur

zwei von 633 Fahrzeugen kein Gurtkraftbegrenzer, allerdings in allen Fahrzeugen ein Gurtstraffer verfügbar. Die meistverbaute Position des Gurtstrafers war am Gurtaufroller (Retraktor). Auf den anderen Sitzplätzen ist die Ausstattungsrate deutlich geringer.

Airbagtyp	SAB im Sitz integriert	SAB verbaut an strukturellen Fahrzeugteilen
<b>Thoraxairbag (1. Sitzreihe, n=571)</b>	100 %	0 %
<b>Thoraxairbag (2. Sitzreihe, n=125)</b>	96,8 %	3,2 %
<b>Kopf-Thorax-Airbag (n=42)</b>	95,2 %	4,8 %

Tab. 3-2: Einbauposition des Seitenairbags (SAB) der untersuchten Fahrzeuge

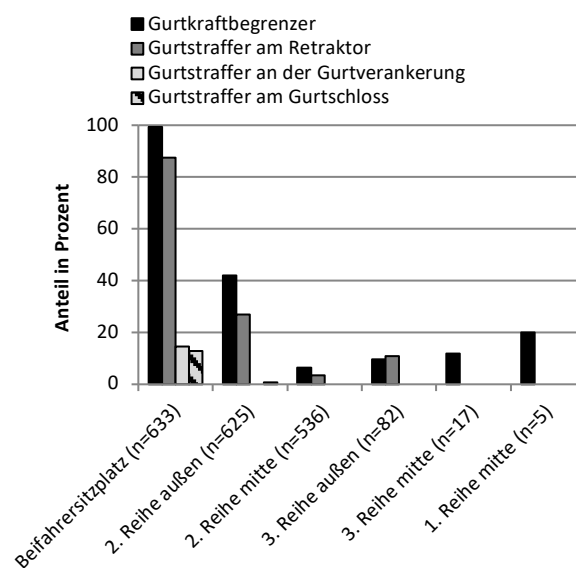


Bild 3-6: Marktdurchdringung Gurtkomponenten nach Sitzplatz

### 3.4 Nutzen und Schädigung durch Airbagsysteme

Grundsätzlich können Unfallverletzungen unterschieden werden in Kontaktverletzungen (mit und ohne Intrusion), Verletzungen, die durch das Rückhaltesystem induziert wurden, und anderen Verletzungsquellen. Bei den durch das Rückhaltesystem induzierten Verletzungen kann es sich um die folgenden Arten von Verletzungen handeln:

- Verletzungen, die zum Schutz vor schwereren Verletzungen auftraten (z.B. kann eine Schlüsselbeinfraktur durch zu große Gurtkraft oder Verbrennungen durch den Airbag bei schweren Unfällen in Kauf genommen werden, wenn dadurch ein Aufprall des Kopfes auf das Lenkrad, welcher zu schwereren Verletzungen führen kann, verhindert wird),
- Verletzungen, die durch ein verbessertes Rückhaltesystem vermieden werden könnten und
- Verletzungen, die ausschließlich auf die Interaktion mit dem Rückhaltesystem zurückgeführt werden können und nicht zur Vermeidung von schweren Verletzungen auftraten (z.B. Knalltrauma bei leichten Unfällen).

Die Verletzungsschwere wird im Allgemeinen und auch in diesem Bericht einerseits mit Hilfe der amtlichen Verletzungsschwere und andererseits mit Hilfe der Abbreviated Injury Scale (AIS) angegeben. Bei der amtlichen Verletzungsschwere werden die folgenden 3 Schwerelevel unterschieden [DESTATIS, 2016]:

- Tödlich verletzt: der Tod tritt als unmittelbare Folge des Verkehrsunfalls innerhalb von 30 Tagen ein
- Schwer verletzt: stationäre Behandlung unmittelbar nach dem Unfall von mehr als 24 Stunden
- Leicht verletzt: alle anderen Verletzungen

Beim AIS werden die Verletzungen anhand der Lebensbedrohung einer Einzelverletzung in einer nicht linearen Skala von 0 (unverletzt) bis 6 (eine Behandlung ist nicht möglich) eingeteilt. Mit Hilfe der schwersten Verletzung einer Person wird maximale AIS (MAIS) gebildet. In der Regel werden Verletzungsschwerebereiche zusammengefasst. Hierbei werden dann zum Beispiel Verletzungen der Schweregrade 3, 4, 5 und 6 mit MAIS 3+ bezeichnet. [AAAM, 1998]

Die Recherche zu Nutzen und Schädigungen durch Rückhaltesysteme baut auf dem Bericht KLANNER et al. (2004) auf und berücksichtigt neben den Ergebnissen aus diesem Bericht insbesondere neuere Erkenntnisse. Es wurden folgende Probleme identifiziert [KLANNER et al., 2004]:

- Airbag löst ungerechtfertigt aus (bei geringer Unfallschwere oder ohne Unfall),
- Nichtauslösung des Airbags bei hoher Unfallschwere und
- Airbagaggressivität durch Geräuschbelastung und Kontaktverletzungen.

Es wurde insgesamt in dem Bericht festgestellt, dass sich der Insassenschutz durch die Einführung von Airbags nachhaltig erhöht hat, jedoch noch ein großes Verbesserungspotential bestand [KLANNER et al., 2004].

### 3.4.1 Nutzen von modernen Airbags

Tatsächlich war der Nutzen durch die Einführung von Airbagsystemen am besten zu einem Zeitpunkt nachzuweisen, als Airbags als Sonderausstattung verbaut wurden, um eine Vermischung mit anderen Maßnahmen (z.B. strukturellen Maßnahmen oder Systemen der aktiven Sicherheit) zu vermeiden. Für Frontairbags war dies in der Zeit vor Erstellung des BAST-Berichts F53 der Fall. Hier wurde festgestellt, dass das Verletzungsrisiko eine schwere bis tödliche Verletzung zu erleiden 20 % geringer ist bei Fahrzeugen mit Fahrer- und Beifahrerairbag, als bei Fahrzeugen ohne Airbag [KLANNER et al., 2004].

In einer Untersuchung von Frontalaufprallunfällen der englischen In-Depth-Unfalldatenbank Cooperative Crash Injury Study (CCIS) der Jahre 1992 - 2000 und den Unfalldaten der Unfallforschung Hannover der Jahre 1996 - 1999 konnte gezeigt werden, dass Kopf- und Halsverletzungen effektiv mit Hilfe von Airbags adressiert werden können [FRAMPTON et al., 2000]. Brust-, Bauch- und Armverletzungen treten jedoch offenbar häufiger in Fahrzeugen mit Airbags auf (Bild 3-7). Hierzu ist anzumerken, dass die Verbesserung und Anpassung des Gurtsystems zeitlich erst nach der Einführung der Airbags vollzogen wurde. Es ist davon auszugehen, dass sich durch den Einsatz von Gurtstraffern und Gurtkraftbegrenzern die Situation insbesondere für die Brust und den Bauch heute gegenüber den in FRAMPTON et al. (2000) analysierten Daten verbessert hat.

Auch in anderen Studien konnte die Schutzwirkung von Frontalairbags gezeigt werden, wie beispielsweise in LACKNER et al. (2007) mittels Polytraumapatientinnen und -patienten des Universitätsklinikums München. ERNSTBERGER et al. (2015) zeigte eine Verringerung des Verletzungsrisikos um 14 % mittels GIDAS-Daten, allerdings bezogen auf Unfälle aus einer Periode von 21 Jahren, die entsprechend ältere Airbagsysteme beinhaltet. In einer Metaanalyse von 21 internationalen Studien zur Schutzwirkung von Airbags zeigte HOYE (2010) eine Reduktion um 22 % von MAIS 3+-Verletzungen.

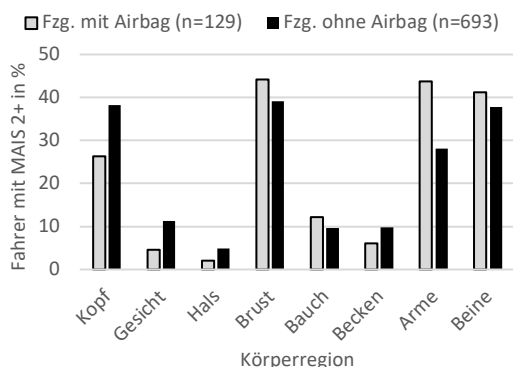


Bild 3-7: Verletzte Körperregionen mit und ohne Frontalairbag, eigene Darstellung nach [FRAMPTON et al., 2000]

Bei Seitenairbags ergab sich basierend auf Analysen vom European Enhanced Vehicle-Safety Committee (EEVC) ein weniger klares Bild [PAGE, 2006]. Die Ergebnisse der EEVC-Untersuchung zeigten keinen Trend an (Bild 3-8). Allerdings konnte bei einer Auswertung von einzelnen Fällen gezeigt werden, dass ein vorhandener Seitenairbag vor schweren Verletzungen schützte.

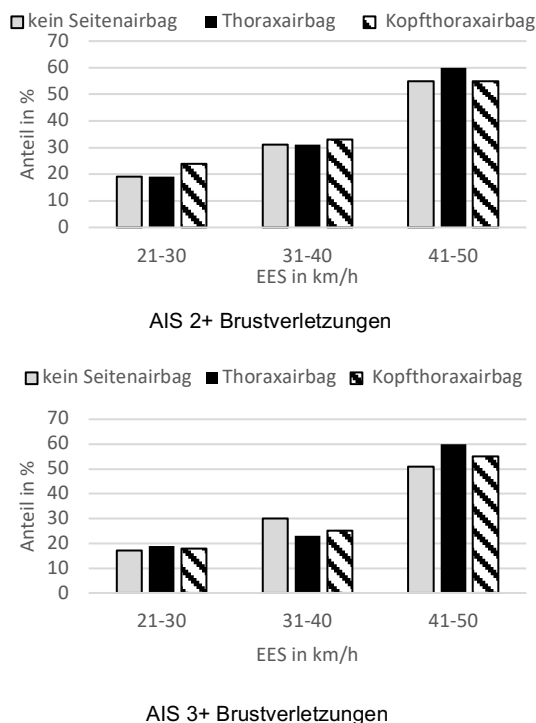


Bild 3-8: Brustverletzungsschwere mit und ohne Seitenairbag in Abhängigkeit der Deformationsenergie [PAGE, 2006]

In einer US-amerikanischen Studie konnte bereits 2004 gezeigt werden, dass bei einem Seitenaufprall das Verletzungsrisiko signifikant geringer ist, wenn das Fahrzeug mit Seitenairbags

für Kopf und Thorax ausgestattet ist [BRAVER & KYRYCHENKO, 2004]. In einer weiteren Studie konnte gezeigt werden, dass Seitenairbags das Todesrisiko zwischen 37 und 45 % verringern, außerdem können die Insassen Unfälle mit höherem  $\Delta v$  unverletzt überstehen [LABERGE-NAVEAU et al., 2009]. Auch MCCARTT & KYRYCHENKO (2007) konnten ein geringeres Todesrisiko offenlegen. D'ELIA et al. (2013) und MCGWIN et al. (2007) zeigten ein geringeres Verletzungsrisiko in Fahrzeugen mit Seitenairbags. In D'ELIA et al. (2013) und MCCARTT & KYRYCHENKO (2007) wurde zudem noch gezeigt, dass Systeme mit einer Kombination aus Vorhang- und Thoraxairbag einen effektiveren Schutz bieten, als ein System mit nur einem dieser Airbagtypen. Diese Veröffentlichungen basieren auf US-amerikanischen oder australischen Datensätzen und sind deshalb nur begrenzt aussagefähig für Europa, da Fahrzeuge, Fahrzeugnutzung und Nutzung und Anforderungen der Sicherheitsausrüstung differieren. Dadurch können diese Daten und deren Analysen nur als Indiz für den Nutzen von Seitenairbags in Europa gewertet werden. Eine Analyse der Datenbank der Unfallforschung der Versicherer aus dem Jahr 2013 versucht ebenfalls die Schutzwirkung von Seitenairbags nachzuweisen. Aufgrund der geringen Fallzahlen konnte keine statistische Signifikanz nachgewiesen werden, allerdings ist eine Tendenz einer positiven Schutzwirkung erkennbar [WALD, 2013].

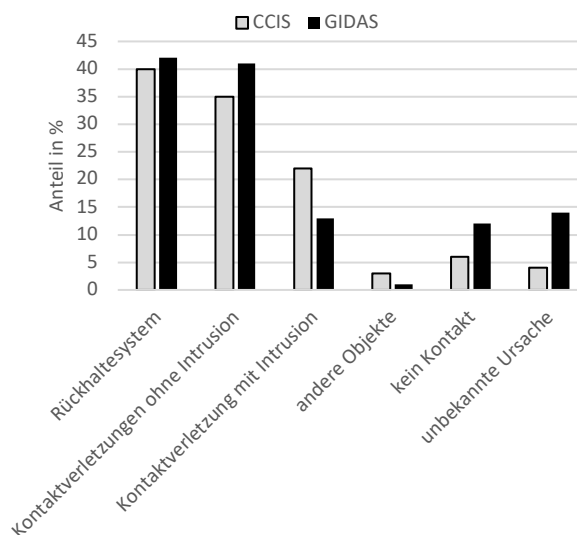


Bild 3-9: Verletzungsursachen beim Frontalaufprall von Personen in UNECE R94 zugelassenen Fahrzeugen [THOMPSON et al., 2013]

Unabhängig vom nachgewiesenen Nutzen von Frontalairbags (z.B. gemäß KLANNER et al. (2004)) wurde im EU Projekt „Frontal Impact and

Compatibility Research“ (FIMCAR) gezeigt, dass die weitere Verbesserung des Rückhaltesystems für eine zukünftige Senkung der Zahl der Schwerverletzten und Getöteten das größte Potential zukommt (Bild 3-9) [THOMPSON et al., 2013, EDWARDS et al., 2013]. Berücksichtigt wurden in dieser Analyse englische und deutsche In-Depth-Unfalldaten von Fahrzeugen, die die Regelung 94 der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) (siehe Kapitel 3.5.1) erfüllen.

### 3.4.2 Probleme durch Airbagauslösung

#### Kindersitze

Nachdem in den USA über tödliche Unfälle nach der Interaktion von Beifahrerfrontairbags mit rückwärts gerichteten Kindersitzen berichtet wurde [GRAHAM et al., 1998], wurde in den USA, Europa und anderen Regionen der Welt verboten, dass Kinder in rückwärts gerichteten Kindersitzen auf einem Sitzplatz mit aktivem Airbag befördert werden [MÜLLER et al., 2010]. Sofern ein vorhandener Airbag individuell ab- und angeschaltet werden kann, ist nur mit wenigen Verstößen gegen diese Regel zu rechnen, während sie deutlich häufiger ignoriert wird, sofern sich der Airbag nicht oder nur von der Werkstatt deaktivieren lässt [MÜLLER et al., 2010]. Bei vorwärts gerichteten Kindersitzen ist das Bild nicht so eindeutig. In der Regel wird berichtet, dass Frontalaufprallairbags für Kinder in vorwärts gerichteten Kindersitzen keinen Nutzen aufweisen aber auch nicht schaden, z.B. LESIRE et al. (2007). In Bedienungsanleitungen von Pkw wird mit dem Thema sehr unterschiedlich umgegangen. Während zum Beispiel die Audi AG Hinweise zur richtigen Einstellung des Beifahrersitzes gibt, wenn der Sitzplatz mit einem vorwärts gerichteten Kindersitz belegt werden soll, lässt die Opel Automobile GmbH keine Sitzerhöhungen mit und ohne Rückenlehne auf dem Beifahrerplatz zu und Renault S.A.S. (Société par actions simplifiée) schließt in der Regel die Benutzung von vorwärts gerichteten Kindersitzen auf dem Beifahrerplatz aus. Andere Autohersteller äußern sich entweder gar nicht zu dem Thema oder empfehlen die Airbagdeaktivierung für alle Arten von Kindersitzen.

Bei Seitenairbags ist die Wirksamkeit vom Airbagtyp abhängig. Bei älteren Vorhangairbags wird häufig beobachtet, dass der Airbag nicht weit genug nach unten reicht, um Kindern Schutz bieten zu können [LONGTON et al., 2012]. Sofern

sich der Kindersitz im Wirkungsbereich des Seitenairbags befindet, ist mit keiner Schädigung und in einigen Fällen mit einer zusätzlichen Schutzwirkung zu rechnen [LONGTON et al., 2012, GEHRE et al., 2004].

#### Airbagaggressivität

Aufgrund der hohen Energien, die bei einer Airbagentfaltung wirken, ist der Airbag ein System, das ein Gefährdungsrisiko der Personen im Fahrzeug darstellt. Bereits im BAST-Bericht F53 wird von sogenannter Airbagaggressivität berichtet. Vielen der potentiellen Gefahren wurde über die 30 Jahre, in denen Airbags in Fahrzeugen verbaut sind, stetig entgegengewirkt. Eine Unfallanalyse der NHTSA von 1990 bis 2009 hat gezeigt, dass bis zum Jahr 1997 die Zahl der airbaginduzierten Getöteten in den USA stetig auf 52 Getötete pro Jahr anstieg [NHTSA, 2009]. Infolge der Weiterentwicklung der Airbags sank dieser Wert auf keine airbaginduzierten Getöteten im Jahr 2009 [NHTSA, 2009]. Auch eine aktuelle Studie der NHTSA zeigt das deutlich geringere Verletzungsrisiko bei modernen Airbagsystemen. So verringerten sich die airbaginduzierten Verletzungen (AIS 3+) von Airbags der ersten Generation zur zweiten Airbaggeneration um 47 % und zur dritten Airbaggeneration um 96 % pro gezündeten Airbag [CHIDESTER & MYNATT, 2015, NHTSA, 2010, KINDELBERGER et al., 2003].

Schwere Verletzungen wurden in diversen Kasuistiken dokumentiert, z.B. ein Pneumothorax [MORGENSTERN et al., 1998], eine Herzklappenruptur [THEKKUDAN et al., 2012], Pneumonitis [GOVINDARAJAN et al., 2010] oder Verletzungen an Augen [CRIADO et al., 2010, SALAM et al., 2010, OGUN et al., 2014]. Solche extremen Fälle sind allerdings Einzelfälle und treten nur sehr selten auf, außerdem waren die verunglückten Fahrzeuge der dokumentierten Fälle nicht mit modernen Airbagsystemen der dritten Generation ausgestattet.

In den US-amerikanischen Regelwerk Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS) 208 werden unter anderem Out-of-Position Fälle getestet. Dadurch wird eine sogenannte Low-Risk-Deployment-Strategie gefördert bzw. gefordert. Dies führt dazu, dass das Thema der Airbagaggressivität näher untersucht und Gegenmaßnahmen entwickelt wurden, z.B. die Airbagfaltung und das Gewebe betreffend [MAO, 2001]. So werden beispielsweise gefährliche Situationen erkannt und die Airbagzündung unterdrückt, sollte diese den Insassen gefährden [MAO, 2001]. Neben der Airbagfaltung haben auch die

Einbaulage und die Kennung des Gasgenerators einen erheblichen Einfluss auf die Airbag-aggressivität. Die Low-Risk-Deployment-Strategie wird derzeit größtenteils vor allem in den USA verfolgt, da hier laut Gesetzgebung auch ungegurtete Personen geschützt werden müssen.

Auch bei Interaktion mit Seitenairbags treten bei Out-of-Position-Fällen vermehrt Verletzungen der oberen Extremitäten auf, beispielsweise Schultergelenkluxationen [MCGWIN et al., 2007]. Allerdings hoben MCGWIN et al. (2007) auch hervor, dass diese Verletzungen nicht lebensbedrohlich seien im Gegensatz zu den Verletzungen, die ohne Airbag entstanden wären.

Die im BAST-Bericht F53 adressierten Punkte für Airbagaggressivität waren Verbrennungen und Hörschäden, die im Folgenden separat betrachtet werden. Augenverletzungen und Verletzungen durch die Airbagabdeckung wurden in F53 wenig thematisiert. Auch neuere Literatur hat keine weiteren Augenverletzungen und Verletzungen durch die Airbagabdeckung offengelegt. Leichte Prellungen und Schürfwunden (AIS 1) können laut F53 toleriert werden, da die ursächlichen hohen Energieumsätze mit der notwendigen Airbagentfaltung zusammenhängen.

### Hörschäden

Der bei einer Airbagauslösung produzierte Schalldruckpegel ist sehr hoch. Durch die Knallereignisse der Airbagzündung und -entfaltung sind teilweise temporäre und dauerhafte Hörprobleme in Folge von Airbagauslösungen berichtet worden [KLANNER et al., 2004, ROUHANA et al., 1998, ROHM & SCHIMMELPFENNIG, 2007]. In der Literatur finden sich Schallpegelwerte bis 170 dB [ALLEN et al., 1971] und damit vergleichbar laut sind, wie ein Schuss etwa mit dem Bundeswehrgewehr G3 [FRAWO.DE, 2015], welches seit 1968 ohne Gehörschutz bei Schießübungen nicht mehr eingesetzt werden darf. In Tab. 3-3 sind weitere Geräuschquellen und deren Pegelwerte beispielhaft aufgeführt. Eine spezielle Literaturrecherche zum Thema Schädigung des Gehörs aufgrund des Airbagknalls zeigte entsprechende Wirkzusammenhänge auf, jedoch keine systematischen Untersuchungen, die einen klaren Zusammenhang zwischen dem Auslösen des Airbags und einem zugehörigen Knalltrauma aufzeigen.

Eine Zusammenstellung mit sechs gut dokumentierten Fallbeispielen lieferte SAUNDERS et al. (1998), allerdings werden hier Vorkommnisse aus den 80er und 90er Jahren mit aus heutiger

Sicht veralteter Airbagtechnologie der 1. Generation beschrieben. Dennoch ist die Publikation wertvoll, da einige der Personen aufgrund von bestehenden altersbedingten Hörverlusten eine Dokumentation ihres Hörschwellenverlaufs über die Zeit besaßen und somit ein direkter Zusammenhang zwischen dem Unfallgeschehen und dem sich ergebenden Hörstatus gezeigt werden konnte. Die Fälle entstammten einer Aktenrecherche durchgeführt an der House Ear Klinik in Los Angeles, so dass von einer kleinen Zahl an Betroffenen gesprochen werden muss.

dB(A)	Beispielergebnis
0	Hörschwelle
50	Normale Unterhaltung
75	Fahrradklingel (genormter Mindestschalldruckpegel)
80	Starker Straßenlärm
85	Gehörschutzpflicht im gewerblichen Arbeitsbereich
90	Autohupen
95	Empfohlene Pegelbegrenzung zum Schutz vor Gehörschäden in Diskotheken
110	Schnellzug in geringer Entfernung
120	Flugzeug in geringer Entfernung
130	Schmerzschwelle, Düsenflugzeug in geringer Entfernung
140	Gewehrusschuss
170	Bundeswehr G3 in Ohrnähe
190	Innere Verletzungen, Hautverbrennungen, Tod wahrscheinlich

Tab. 3-3: Beispiele für Geräuschquellen und deren Pegelwerte, nach [FRAWO.DE, 2015]

Ähnlich verhält sich die Situation an der Medizinischen Hochschule Hannover: Nach der Analyse aller gehörbezogenen Gutachten des deutschen Hörzentrums aus dem Zeitraum 2000 bis 2016 konnten fünf Fälle identifiziert werden, wo ein zumindest begrenzter Zusammenhang zwischen einer Airbagauslösung und einem daraus resultierendem Hörverlust bestand. Hierbei war die Position der betroffenen Person zum Airbag scheinbar von entscheidender Bedeutung: War ein Ohr dem Airbag sehr nahe und zugewandt, konnten die Gutachtenden eine Schädigung des Gehörs in einen unmittelbaren Zusammenhang mit der Auslösung bringen.

Die Publikation von SAUNDERS et al. (1998) führt in diesem Zusammenhang eine wichtige Grundlagenstudie zur Entwicklung von Airbagsystemen aus den späten 60er Jahren an: NIXON (1969) untersuchte hierbei 91 Freiwillige,

die dem Geräusch eines sich schlagartig mit komprimiertem Gas füllenden Airbags ausgesetzt wurden. Der dabei erreichte Spitzenpegel betrug 168 dB mit einer durchschnittlichen Dauer von 21 ms. 50 % der Teilnehmenden erlitten eine vorübergehende Hörverschlechterung (Temporary Threshold Shift, TTS) häufig verbunden mit Tinnitus, wobei sich die Hörschwellen innerhalb von 24 Stunden bei allen bis auf einen Teilnehmenden wieder normalisierten. Basierend auf diesen Daten und Untersuchungen von ALLEN et al. (1971) kam die im Auftrag der amerikanischen Regierung arbeitende Beraterfirma Bolt, Berenek and Newman zu dem Schluss, dass eine Hörschädigung bei mindestens 7 bis max. 30 % der einem Airbagknall ausgesetzten Personen auftreten müsste. 1998 schätzte die Forschungsabteilung der General Motors Company die Anzahl der zwischen 1988 und 1998 bei Unfällen ausgelösten Airbags auf 96.000. SAUNDERS et al. (1998) wendete die von ALLEN et al. (1971) angegebenen Prozentsätze auf diese Zahl an und kam auf 7.000 bis 28.000 durch Airbag ausgelöste Hörschädigungen im entsprechenden Zeitraum, welche sich jedoch bisher in diesem Umfang keinesfalls in der Literatur oder in klinischen Datenbanken großer HNO Zentren widerspiegeln.

### Verbrennungen

In einer Untersuchung der US-amerikanischen Daten des National Automotive Sampling Systems (NASS) wurden airbaginduzierte Verbrennungen untersucht. Dabei wurden 38,7 % der Unfallbeteiligten mit Airbaginteraktion der zweiten Generation identifiziert, die durch Verbrennungen verletzt wurden [RATH et al., 2005]. Am häufigsten traten Verbrennungen im Gesicht (37,4 %) und an den oberen Extremitäten auf (33,6 %). Mehr als 99 % der airbaginduzierten Verbrennungen waren Verbrennungen 1. Grades. Verbrennungen 3. Grades und höher traten in dieser Untersuchung nicht auf. Da US-amerikanische Daten nur bedingt auf Europa übertragbar sind, da Fahrzeuge, Fahrzeugnutzung und Nutzung und Anforderungen der Sicherheitsausrüstung differieren, können diese Untersuchungsergebnisse nur als Indiz angesehen werden. Allerdings wurden auch in Deutschland ähnliche Ergebnisse ermittelt [ULRICH et al., 2001]. Insgesamt werden Verbrennungen nach ULRICH et al. (2001) als vernachlässigbar eingestuft gegenüber den Vorteilen von Airbags.

### Fehler bei der Auslösung

Fehlerhafte Auslösungen von Airbags und Gurtstraffern beinhalten die folgenden Fälle:

- Airbag/Gurtstraffer löst aus, obwohl dies nicht erforderlich gewesen wäre
- Airbag/Gurtstraffer löst nicht aus, obwohl dies erforderlich gewesen wäre
- Airbag/Gurtstraffer löst zu spät aus
- Airbag/Gurtstraffer löst zu früh aus

Bereits vor Abschluss des BASt Berichts F53 wurde eine minimale Auslöseschwelle von Airbags in der Fachwelt diskutiert, um einerseits die Höhe des Sachschadens zu begrenzen und andererseits unnötige Belastungen zu vermeiden z.B. in LANGWIEDER et al. (1997). Bei neueren Fahrzeugen im Vergleich zur Analyse aus LANGWIEDER et al. (1997) und KLANNER et al. (2004) wird das Problem der Auslösung ohne Nutzen nicht mehr berichtet. Des Weiteren wurden Fälle berichtet, in denen ein zur Beförderung von Kindern deaktivierter Airbag auslöste [MÜLLER et al., 2010].

Das Fehlen der Auslösung trat nach Beobachtungen gemäß [KLANNER et al., 2004] insbesondere bei Fällen mit Über- bzw. Unterfahren auf. Für einen Teil der neueren NASS-Unfalldaten stehen zusätzliche Informationen in Form von Daten aus Event Data Recordern (EDR) zur Verfügung. In diesen Daten ist unter anderem der Auslösezeitpunkt von Rückhaltesystemkomponenten gespeichert. Diese Daten wurden bereits häufig herangezogen, um zu zeigen, dass die Airbagauslösezeitpunkte bei Unfällen deutlich später sein können als in den Standardtests [DALMATOS et al., 2009]. Eine weitere Studie zeigt, dass späte Auslösezeiten insbesondere bei Unfällen mit schlechter struktureller Interaktion (Über-/Unterfahren, geringer Überdeckung außerhalb der Längsträger und geringe Überdeckung innerhalb der Längsträger ohne Beaufschlagung der Längsträger) auftraten [JOHANNSEN & OTTE, 2015]. Hier zeigten sich auch schwere Verletzungen, siehe Bild 3-10.

Das zu frühe Auslösen eines Airbags wurde bisher noch nicht als Problem identifiziert. Ein früher Auslösezeitpunkt ist eher erwünscht, da mehr Zeit zur Verfügung steht den Airbag in Position zu bringen bevor die Vorverlagerung des Insassen beginnt.

Des Weiteren kann eine zu kurze Standzeit von Airbags bei Mehrfachkollisionen nur Schutz bei der ersten Kollision bieten. Vor allem bei Fahrer- und Beifahrerairbags werden Abströmöffnungen

genutzt um ein plastische Verhalten von Airbags zu erzielen, allerdings bieten diese Airbags nach der ersten Entfaltung keine weitere Schutzwirkung.

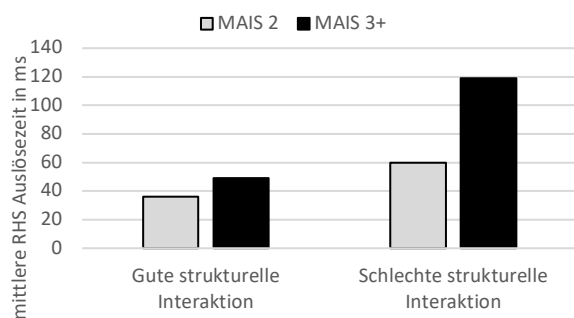


Bild 3-10: Verletzungsschwere in Abhängigkeit der Rückhaltesystemauslösezeit und der Qualität der strukturellen Interaktion [JOHANNSEN & OTTE, 2015]

## Rettung

In Folge einer per Video dokumentierten Auslösung eines Frontairbags bei Rettungsarbeiten der Feuerwehr aus den USA (Dayton) aus dem Jahr 1997 wurde das Risiko eines bei Rettungsarbeiten auslösenden Airbags weltweit diskutiert und von Rettungsgeräteherstellern sogenannte Airbagsafes angeboten, die die Ausbreitung eines auslösenden Airbags unterdrücken sollen. Nachträgliche Untersuchungen des Falls zeigten, dass die Batterie nicht abgeklemmt war, das Rettungsgerät auf dem Airbagsteuergerät abgestützt wurde und so ein Kurzschluss verursacht wurde. Heute wird empfohlen, die möglichen Gefahren durch Einhalten eines Mindestabstands von Unfallbeteiligten und Rettungskräften zu nicht ausgelösten Airbags, sofern an dem Fahrzeug mit Rettungsgerät gearbeitet wird, zu minimieren. Des Weiteren sollte, wenn möglich, die Batterie abgeklemmt werden und eine genaue Erkundung inklusive der Entfernung der relevanten Innenraumverkleidungsteile vorgenommen werden [ALLINGER, 2010].

## 3.5 Testverfahren

In Europa werden Kraftfahrzeuge im Allgemeinen zugelassen, die die jeweils aktuellen UNECE Regelungen bestehen. In Bezug auf Airbagsysteme sind das die Gesamtfahrzeugtests nach UNECE Regelung 94 (Frontalaufprall) und 95 (Seitenaufprall), die verbindlich für alle neuzugelassenen Fahrzeuge seit Oktober 2003 gelten. In einem vorhergehenden Übergangszeitraum

mussten neu homologierte Fahrzeuge die Anforderungen bereits bestehen.

Neben den Zulassungstests stellen Verbraucherschutzorganisationen zusätzliche aber unverbindliche Anforderungen auf. In Europa geschieht dies im Wesentlichen durch das European New Car Assessment Programme (Euro NCAP). Weiterhin sind Versicherungseinstufungstests relevant für das Crashverhalten bei niedrigen Unfallschweren.

Im Prinzip ist das System aus gesetzlichen Anforderungen und Verbraucherschutzorganisationen in anderen Regionen der Welt vergleichbar aufgebaut, sodass hier nur auf die europäische Situation im Detail eingegangen wird.

Anforderungen an Testverfahren umfassen, dass relevante Unfallszenarien repräsentativ widergespiegelt werden, dass sie wiederholbar (der gleiche Versuch führt mit den selben Messmitteln im selben Labor zu ähnlichen Ergebnissen) und reproduzierbar sind (der gleiche Versuch führt in unterschiedlichen Laboren zu ähnlichen Ergebnissen). In Folge dieser Anforderungen stellen sie einen Kompromiss zwischen Sicherheit und Praktikabilität dar. Für dieses Projekt sind insbesondere die sich ergebenden Anforderungen an die Auslösung von aktiven Elementen des Insassenschutzsystems (Airbag, Gurtstraffer etc.) relevant. Hierbei spielt auf der einen Seite die Entscheidung ob überhaupt ausgelöst wird und andererseits der Auslösezeitpunkt eine wichtige Rolle. In Bezug auf den Auslösezeitpunkt ist es wichtig, dass der Gurt gestrafft wurde, bevor die zu schützende Person Kräfte auf den Gurt aufbringt und dass der Airbag entfaltet ist, bevor der Insasse den Entfaltungsbereich erreicht. Des Weiteren ist es wichtig zu berücksichtigen, ob die Rückhaltesysteme (hier insbesondere Airbags) relevante Bereiche abdecken.

Im Weiteren werden die Testverfahren nach den Aufprallrichtungen Frontal- und Seitenaufprall getrennt und hinsichtlich ihrer Anforderungen an das Rückhaltesystem analysiert.

### 3.5.1 Frontalaufpralltestverfahren

Beim Frontalaufpralltest gemäß UNECE R94 wird das zu testende Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 56 km/h mit 40 % Überdeckung auf der Fahrerseite gegen eine deformierbare Barriere gefahren, siehe Bild 3-11. Auf beiden vorderen Sitzplätzen werden Hybrid III 50ste Perzentile Dummies eingesetzt.



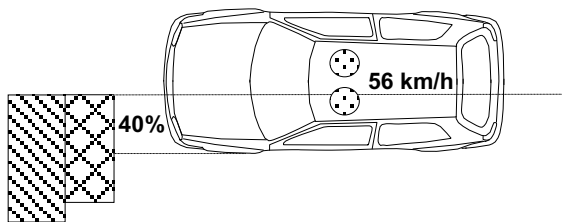


Bild 3-11: Frontalaufpralltestverfahren gemäß UNECE R94 [JOHANNSEN, 2013]

Im Rahmen von Euro NCAP wird ein vergleichbarer Test mit anderen Bewertungskriterien, einer anderen Dummybesetzung auf den hinteren Sitzplätzen sowie einer Testgeschwindigkeit in Höhe von 64 km/h durchgeführt. Zusätzlich zu den beiden Hybrid III 50ste Perzentile Dummies werden ein Q6- und ein Q10 Kinderdummy auf den hinteren Sitzplätzen bewertet.

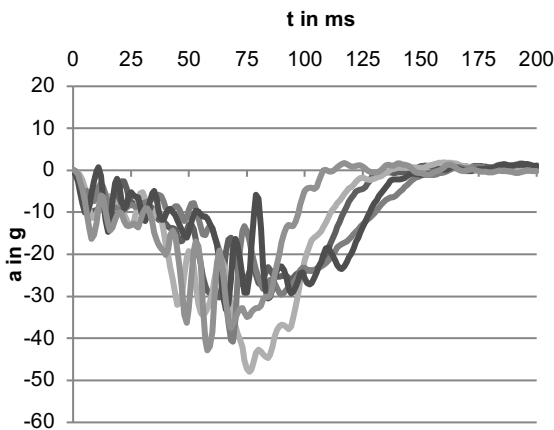


Bild 3-12: Beschleunigungsverläufe aus Euro NCAP Tests mit Fahrzeugen mit Markteinführung zwischen 2003 und 2009 (die unterschiedlichen Grautöne dienen lediglich der Möglichkeit einzelne Verläufe zu unterscheiden und haben keine weitere Bedeutung)

In Bezug auf die Auslösung von aktiven Elementen des Insassenschutzsystems zeigen diese Tests einen Beschleunigungsverlauf und eine Insassenkinematik, die eine relativ späte Entscheidung in Bezug auf die Aktivierung zulassen, da die Fahrzeugbeschleunigung, die im Airbagsteuergerät ausgewertet wird, anfangs zu gering ist, um eine Airbagzündung auszulösen. Beispielsweise bleibt bei den Euro NCAP Tests die mittlere Verzögerung bis etwa 40 ms bei 5 bis 10 g, siehe Bild 3-12. Dieses relativ gleiche Verhalten unabhängig vom Fahrzeug ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass das Kraftniveau des Testfahrzeugs in der Regel schon bei geringen Eindringtiefen höher ist, als das der deformierbaren Barriere. Hierdurch wird der Beschleunigungsverlauf bis zum vollständigen Durchfahren der Barriere hauptsächlich von den Eigenschaften

der Barriere beeinflusst. Der Dummy beginnt, sich zwischen 20 und 40 ms zu bewegen, siehe Bild 3-13. Bei den langsameren UNECE R94 Tests verschieben sich die Zeiten etwas nach hinten, sodass hier noch mehr Zeit zur Verfügung steht.

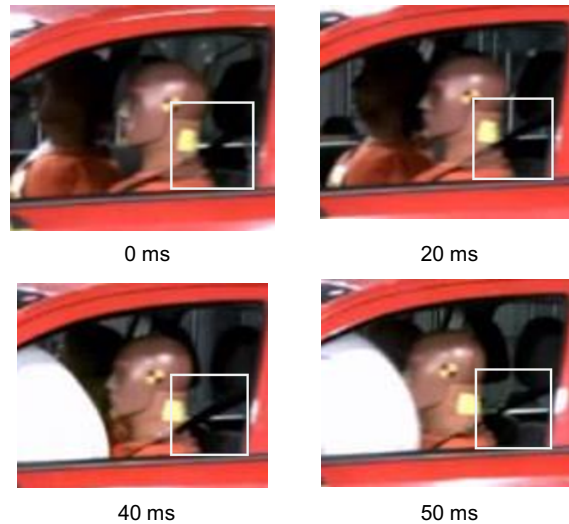


Bild 3-13: Dummykinematik beim Euro NCAP Test, das weiße Viereck hebt den Markierungspunkt am Dummykopf hervor zur Verdeutlichung der Vorverlagerung und dessen zeitlichen Verlaufs

In Folge der durch die einseitige Krafteinleitung hervorgerufenen Rotation des Testfahrzeugs, wurde bei einigen Euro NCAP Versuchen ein Abgleiten des Kopfes vom Airbag festgestellt.

Mit der UNECE R137 wird in Europa ein verbindlicher Test mit voller Überdeckung eingeführt, siehe Bild 3-14. Hierbei beträgt die Testgeschwindigkeit 50 km/h und die Barriere ist undeformierbar. Auf dem Fahrerplatz wird ein Hybrid III 50ste Perzentile Dummy und auf dem Beifahrerplatz ein Hybrid III 5te Perzentile Dummy eingesetzt. Die Sitzposition auf dem Beifahrerplatz soll sich in etwa zwischen der vordersten und der mittleren Sitzeinstellung befinden.

Beim Euro NCAP Test mit voller Überdeckung wird auf dem Fahrerplatz ein Hybrid III 5te Perzentile Dummy eingesetzt. Der Beifahrerplatz bleibt unbesetzt, dafür wird hinter dem Beifahrerplatz ebenfalls ein Hybrid III 5te Perzentile Dummy verwendet.

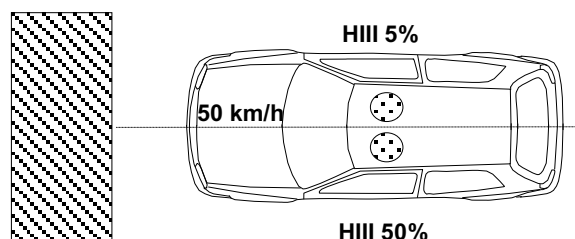


Bild 3-14: Frontalaufpralltestverfahren gemäß UNECE R137 [JOHANNSEN, 2013]

In Bezug auf die Aktivierung von aktiven Elementen des Rückhaltesystems zeichnet sich dieser Test auf der einen Seite dadurch aus, dass eine sehr frühe Auslösung erforderlich ist, da die Personen im Fahrzeug bereits kurz nach dem Aufprall belastet werden. Auf der anderen Seite ermöglicht der sehr steile Anstieg der Fahrzeugbeschleunigung eine frühe Entscheidung, siehe Bild 3-15. Aufgrund der besseren Verfügbarkeit von Testergebnissen wurde hier auf US NCAP Tests zurückgegriffen, die mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 56 km/h durchgeführt werden. Im Grundsatz sind diese Beschleunigungsverläufe aber mit den Beschleunigungsverläufen von Crashtests gemäß UNECE R137 vergleichbar. Der Dummykopf beginnt sich, zwischen 20 und 40 ms, zu bewegen, siehe Bild 3-16.

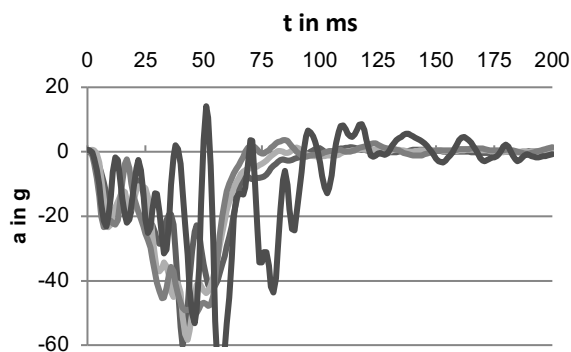


Bild 3-15: Beschleunigungsverläufe aus US NCAP Tests (die unterschiedlichen Grautöne dienen lediglich der Möglichkeit einzelne Verläufe zu unterscheiden und haben keine weitere Bedeutung)

Im Rahmen des EU-Projekts FIMCAR wurde die Verwendung eines Testverfahrens mit voller Überdeckung gegen eine deformierbare Barriere (FWDB) mit 50 km/h vorgeschlagen [THOMSON et al., 2013], siehe Bild 3-17. Das deformierbare Element wurde hierbei unter anderem als vorteilhaft in Bezug auf die Anforderungen an die Aktivierung von aktiven Elementen des Rückhaltesystems bezeichnet [JOHANNSEN et al., 2012].

In einigen Fahrzeugen wurde eine bemerkenswert späte Aktivierung im Testverfahren gegen diese deformierbare Barriere beobachtet.

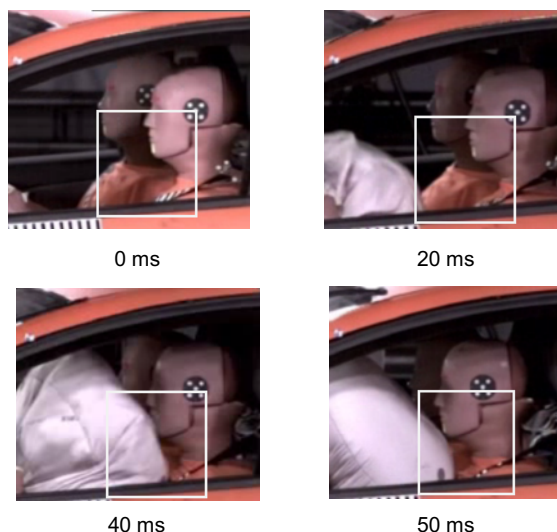


Bild 3-16: Dummykinematik beim US NCAP Test, das weiße Viereck hebt den Markierungspunkt am Dummykopf hervor zur Verdeutlichung der Vorverlagerung und dessen zeitlichen Verlaufs

US-amerikanische Unfallstudien zeigten Probleme, dass es in bestimmten Unfällen dazu kommt, dass der Kopf von vorne sitzenden Personen zwischen seitlichem Kopfairbag und Frontalaufprallairbag durchrutscht [WHARTON, 2016]. Als Gegenmaßnahme wurde vom Insurance Institute for Highway Safety (von IIHS) ein Testverfahren mit 25 % Überdeckung eingeführt (sog. small overlap), siehe Bild 3-18. Die US-amerikanische Verkehrssicherheitsbehörde NHTSA arbeitet hierzu an einem Testverfahren bei dem eine bewegliche, deformierbare Barriere schräg und mit kleiner Überdeckung gegen die Front des Testfahrzeugs fährt. Dieses Testverfahren ist noch in Entwicklung und wird daher nicht weiter thematisiert.

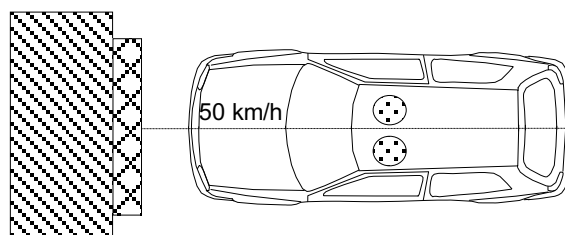


Bild 3-17: Frontalaufpralltestverfahren gemäß FIMCAR Vorschlag [JOHANNSEN, 2013]

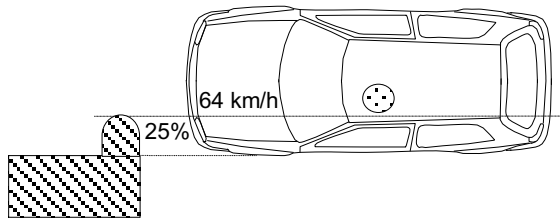


Bild 3-18: IIHS Testverfahren mit geringer Überdeckung [JOHANNSEN, 2013]

### 3.5.2 Seitenaufpralltestverfahren

Beim Seitenaufpralltestverfahren gemäß UNECE R95 wird das zu testende Fahrzeug seitlich im 90°-Winkel mit einer mobilen, deformierbaren Barriere mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 50 km/h beaufschlagt, siehe Bild 3-19. Beim Euro NCAP Seitenaufpralltest wird ein ähnliches Testverfahren durchgeführt. Es wird eine andere Dummybesetzung und strengere Bewertungskriterien verwendet. Seit 2016 wird das Seitenaufpralltestverfahren bei Euro NCAP jedoch mit einer schwereren und steiferen Barriere durchgeführt.

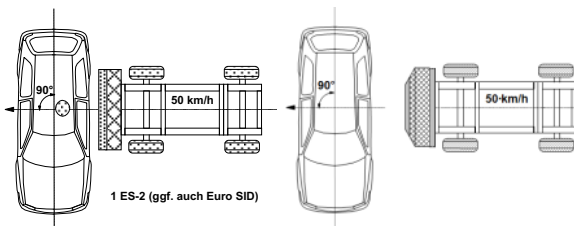


Bild 3-19: Seitenaufpralltestverfahren, links: gemäß UNECE R95, rechts: gemäß Euro NCAP seit 2016 [JOHANNSEN, 2013]

Obwohl aufgrund der Platzverhältnisse schnellere Zündzeiten der Seitenairbags als der Frontairbags erforderlich sind, sind keine Diskussionen bezüglich zu späten Auslösungen bekannt. Dies kann beispielsweise daran liegen, dass Seitenaufprallsituationen, in denen Seitenairbags benötigt werden, deutlich seltener auftreten, als Frontalaufprälle, bei denen Frontairbags benötigt werden. Auch wäre es denkbar, dass durch die nur beim Seitenaufprall mögliche Druckmessung in der Tür eine frühere Entscheidung getroffen werden kann ob eine gewisse Unfallschwere erreicht wurde.

Zusätzlich zum Barrierentest wurde beim Euro NCAP Testverfahren ein seitlicher Pfahlaufpralltest eingeführt, sofern das Testfahrzeug mit einem Kopfschutzsystem für den Seitenaufprall ausgestattet ist, siehe Bild 3-20 rechts. Im Rahmen der UNECE R135 wurde ein verbindlicher

seitlicher Pfahlaufpralltest eingeführt, der sich am US-amerikanischen Test orientiert, siehe Bild 3-20 links.

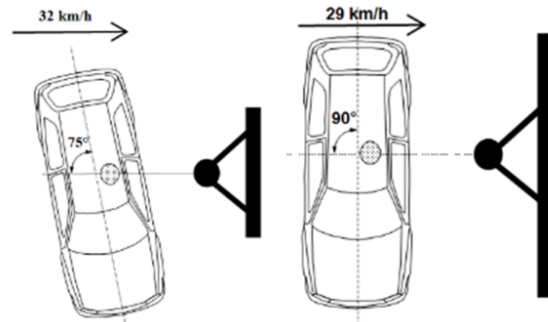


Bild 3-20: Seitlicher Pfahlaufpralltest, links: gemäß UNECE R135 und Euro NCAP seit 2015, rechts: gemäß Euro NCAP bis 2014 [JOHANNSEN, 2013]

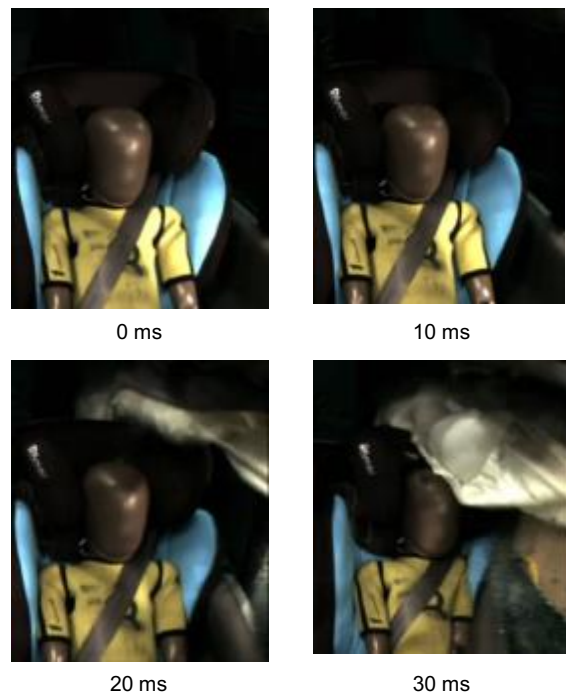


Bild 3-21: Dummykinematik bei Nachstellung eines seitlichen Baumunfalls mit 56 km/h

Im Rahmen des EU-Projekts Child Advanced Safety Project for European Roads (CASPER) wurde ein Unfall nachgestellt, in dem ein Van seitlich mit einem Baum mit großem Durchmesser kollidierte. Das im Bereich der Eindringung sitzende Kind wurde bei dem Unfall schwer verletzt. Die Aufprallgeschwindigkeit betrug über 55 km/h. In dem Rekonstruktionsversuch wurde der seitliche Kopfairbag nach 10 ms gezündet. Dieser Zündzeitpunkt wurde in Diskussionen mit einem Airbaghersteller, im Falle eines Realun-

falls, als optimistisch bewertet. Die Dummykinematik zeigt, dass der seitliche Kopfairbag es nicht schafft, sich zwischen Kopf und Pfahl zu positionieren (Bild 3-21). Dies kann einerseits auf die Kopfstütze des Kindersitzes aber andererseits insbesondere auf die bereits deutlich vor der Entfaltung des Airbags eingesetzte Dummybewegung in Richtung Airbag zurückgeführt werden.

### 3.6 Expertinnen- und Experteninterviews

Auf Basis der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln wurde ein Fragebogen entwickelt, um Interviews mit Expertinnen und Experten zum Thema Airbag durchzuführen. Die Interviews sollen vor allem die gewonnenen Erkenntnisse aus den vorherigen Untersuchungen absichern, Einblicke in zukünftige Entwicklungsziele geben und ggf. weitere Problemstellungen offenlegen.

Ziel war es, die persönliche Meinung des jeweiligen Interviewpartners zu erfragen. Die Interviews wurden mit offenen Fragen geführt, die teilweise viel Diskussionspotential boten. Der Fragebogen (siehe Anhang) diente dem Interviewer als Leitfaden und wurde den Interviewteilnehmenden nicht im Voraus zur Verfügung gestellt. Insgesamt gab es vier thematische Schwerpunkte: Airbagtechnologie, fehlerhaftes Verhalten von Airbags, Verletzungen durch Airbags und zukünftige Entwicklungsschwerpunkte.

Als Interviewpartner standen Fachleute von Fahrzeugherstellern und Zuliefererfirmen von Rückhaltesystemen zur Verfügung. Insgesamt wurden fünf Interviews durchgeführt. Die Ergebnisse wurden anonymisiert, sodass kein Rückschluss auf die Interviewteilnehmenden und deren Firmenzugehörigkeit möglich ist. In Vorbereitung der Interviews kam es aus firmenpolitischen Gründen auch zu Absagen von einigen potentiellen Interviewpartnern. Eine Übersicht der durchgeführten Expertinnen- und Experteninterviews ist in Tab. 3-4 gelistet.

	Geplant	Abgelehnt	Durchgeführt
<b>Zulieferer</b>	4	2	2
<b>OEM</b>	5	2	3
<b>Summe</b>	9	4	5

Tab. 3-4: Übersicht der Expertinnen- und Experteninterviews

Nach subjektiver Meinung der Interviewenden wurde in den Interviews die persönliche Meinung

des jeweiligen Interviewpartners widergespiegelt. Die Ergebnisse zeigen, dass die in der Literatur gefundenen Äußerungen auch hier widergespiegelt werden: Die Schutzwirkung von Airbags ist auf einem sehr hohen Niveau und hat sich stetig verbessert, insbesondere durch mehrstufige Airbags und die daraus resultierende Adaption des Rückhaltesystems an die zu schützende Person. Dies wurde einerseits durch ein gestiegenes Schutzniveau für die Insassen bei einem Verkehrsunfall und andererseits durch das geringere Verletzungsrisiko durch den Airbag durch Weiterentwicklung dieser Schutzvorrichtungen umgesetzt. In den Interviews wurde auch gesagt, dass es zwischen Europa- und US-Airbags immer weniger Unterschiede gibt. Es gibt Fahrzeughersteller, die alle Anforderungen in einem Airbag vereinen oder nur durch kleine Änderungen im Luftsack (beispielsweise zusätzliche Nähte) die Gesetzgebung für den US-amerikanischen Markt erfüllen. Allerdings unterscheiden sich die Zündalgorithmen vor allem bei den Zündzeitpunkten.

Auch das Thema Unfallanalyse durch die Firmen der Interviewteilnehmenden wurde erfragt, die zusätzlich zu den GIDAS-Abfragen der Firmen durchgeführt wird. Hier traten airbaginduzierte Verletzungen in Bezug auf moderne Airbagsysteme kaum auf, in seltenen Fällen kam es zu Schürf- oder Brandverletzungen aufgrund der hohen Entfaltungsgeschwindigkeit und zu Hörschäden, da der Gasgenerator für Vorhangairbags meist im oberen Teil der B-Säule sitzt.

Bei dem Thema Haltbarkeit von Airbags kam die Diskussion schnell zum Thema der Umweltsimulationen, die im Detail nicht den realen Alterungsprozess nachbilden können. Artefakte von solchen Simulationen sollten identifiziert werden, um diese in zukünftige Entwicklungsarbeit zu integrieren. Ein Austausch der Airbags ist aber in der gesamten Laufzeit und den geplanten Wartungsarbeiten bei Fahrzeugen nicht vorgesehen und wurde auch für ältere Fahrzeuge nicht in Betracht gezogen, da diese kein Gefährdungspotential aufzeigten.

Umfangreich wurde auch kurz- und langfristige Entwicklungsziele und Wünschen diskutiert. Wichtig wird weiterhin die integrale Sicherheit sein, das heißt die Verknüpfung von passiver und aktiver Fahrzeugsicherheit, wodurch ein Unfall vor dem eigentlichen Aufprall durch Umfeldsensoren detektiert werden kann. Einerseits kann dadurch der Insasse in eine bessere Position für die Rückhaltung gebracht werden und andererseits können Airbags vor dem Aufprall gezündet

werden. Somit kann die Zeit, die der Airbag benötigt, um sich zu entfalten, erhöht und damit durch geringere Entfaltungsgeschwindigkeiten das Risiko von Schürfwunden gesenkt werden. Dieses Thema wird auch in Zukunft weiter intensiv verfolgt, so dass mit Hilfe der Sensorik der Fahrerassistenzsysteme für die Zündung von Airbags mehr Informationen zur Verfügung stehen. In naher Zukunft wird der Fokus auch auf die Fondinsassen gerichtet, das heißt, dass die Ausstattungsquoten an Gurtstraffern und Gurtkraftbegrenzern weiter steigen wird und auch an Airbags für Fondinsassen wird weiter geforscht werden.

Die durchgeführten Interviews mit Expertinnen und Experten zum Thema Airbag zeigten ähnliche Tendenzen in den Antworten und der diskutierten Schwerpunkte.

### 3.7 Fazit zum Stand der Technik

Es konnte anhand von verschiedenen Quellen gezeigt werden, dass sich die Airbag- und Rückhaltetechnologie stetig weiterentwickelt. So konnten einige Probleme und Verbesserungsvorschläge die im BAST Bericht F53 erkannt wurden, adressiert werden.

Beispielsweise sind mehrstufige Rückhaltesysteme, teils adaptive Rückhaltesysteme und Pre-Crash-Sensoren bereits in Fahrzeugen verbaut. Die Sitzbelegungserkennung ist aufgrund der Euro NCAP Bewertung, die einen Warnton bei nicht angelegtem Gurt fordert, in vielen Fahrzeugen verbaut. Dennoch wurden bei der Analyse von Euro NCAP Crashtests Airbagzündungen festgestellt, trotz nichtbesetzten Sitzplatzes. So wurden in 115 Crashtests gegen eine starre Barriere mit Vollüberdeckung bei Euro NCAP bis einschließlich 2017 insgesamt 17 Fälle mit einer Zündung des Beifahrerairbags beobachtet, obwohl dies nicht nötig gewesen wäre. Die Mehrsensortechnik ist in vielen Fahrzeugen verbaut. In den analysierten Veröffentlichungen wurde nicht von Problemen mit Fehlauflösungen berichtet, sodass davon auszugehen ist, dass diese Systeme robust sind.

Die in F53 angesprochenen Probleme wurden teils noch nicht adressiert beziehungsweise sind in der Phase der Marktdurchdringung. So wurde ein Unterfahrtest bisher noch nicht eingeführt. Die Einführung eines Out-of-Position-Tests mit 5%-Dummy in vorderster Sitzposition in der Gesetzgebung wurde bisher nur in den USA durchgeführt. Dies wirkt sich ebenfalls auf den europäischen Markt aus. Die automatische Erkennung

von rückwärtsgerichteten Kindersitzen wurde adressiert beispielsweise durch das COPD-System im Rahmen der ISO TS 22239, allerdings fehlen für dieses System Impulse für eine flächendeckende Marktdurchdringung.

## 4 Analyse von Verkehrsunfällen und Unfallbeteiligten

Im Rahmen des Projektes „Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbags“ wurden Realunfälle und Unfallbeteiligte mittels einer Unfallanalyse berücksichtigt. Ziel war es, Fälle zu identifizieren, bei denen die Rückhaltung nicht optimal war. Zur Analyse wurden GIDAS-Daten (Abzug Dezember 2017, nur fertig rekonstruierte Fälle mit Erstzulassung mindestens eines Pkw Baujahr 2001 oder später, Auswerterrahmen siehe Bild 4-1 für die Frontalaufprallanalysen und Bild 4-14 für die Seitenaufprallanalyse) herangezogen, um Auslöseschwellen, Verletzungen und Einzelunfälle zu analysieren. Zusätzlich zu den GIDAS-Daten wurden zur Auswertung von Zündzeitpunkten US-amerikanische NASS-EDR-Daten herangezogen. Diese haben den Vorteil der großen Fallzahlen, allerdings sind diese nur bedingt auf Europa übertragbar. Die subjektive Wahrnehmung von Unfallbeteiligten wurde mittels einer Onlineumfrage analysiert.

Unfälle ab 2001 insgesamt	n = 33.001
Unfälle auswertbar	n = 29.904
Unfallbeteiligte	n = 57.781
davon Pkw	n = 34.557
Produktionsstart ab 2001	n = 10.135
Frontalkollision	n = 4.291
Fahrer	n = 4.290
Beifahrer	n = 945

Bild 4-1: Auswerterrahmen der GIDAS-Analysen (Mehrfachkollisionen und Überschläge wurden ausgeschlossen, Vehicle Deformation Index 2 wurde mit 1 (Fahrzeugfront) definiert)

Für die Unfallanalyse wird zwischen den Begriffen Unfallschwere und Unfallfolgeschwere unterschieden [JOHANNSEN, 2013]. Die Unfallschwere ist hierbei ein Eingangsparameter für die Unfallfolgeschwere. Die Unfallschwere wird



beim Frontalaufprall in der Regel als kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung Delta-v angegeben. Beim Seitenaufprall sind die Deformationsenergie (EES = Energy Equivalent Speed) und die Geschwindigkeitsänderung durch die Kollision geeignete Parameter. Die Unfallfolgeschwere beschreibt zum Beispiel die Verletzungsschwere oder die Unfallfolgekosten. In diesem Bericht wird nur die Verletzungsschwere genutzt.

#### 4.1 Anzahl der ausgelösten Airbags im Unfallgeschehen

Im Zuge der GIDAS-Auswertung wurde analysiert inwieweit die Anzahl der Airbagzündungen mit der Erstzulassung des Fahrzeugs zusammenhängt. Die in Bild 4-2 dargestellten Ergebnisse zeigen auf, dass in neueren Fahrzeugen tendenziell häufiger mehr Airbags gezündet werden. Unterstützt wird diese Aussage von der Auswertung von Euro NCAP Versuchsvideos, bei denen ein ähnlicher Trend zu sehen ist (Bild 4-3). Ein Grund dafür ist auch die gestiegene Anzahl an verbauten Airbags, allerdings zeigt die Analyse des ODB Crashfalls bei Euro NCAP, dass dies auch vom Zündalgorithmus abhängt, da in allen analysierten Testjahren die Fahrzeuge meist mit Seiten- und Vorhangairbags ausgestattet waren. Eine abschließende Bewertung ob dies abhängig ist von der gestiegenen Zahl an Airbags oder an den Zündalgorithmen, konnte anhand der analysierten Daten nicht vorgenommen werden.

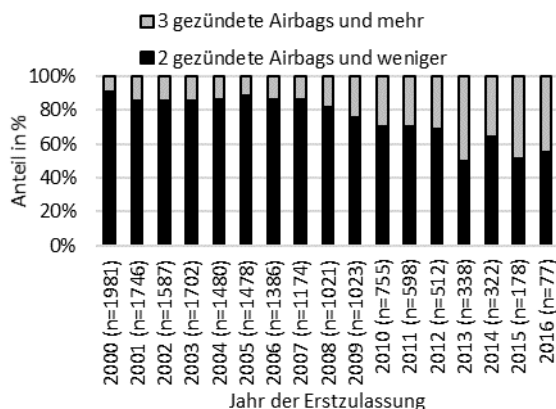


Bild 4-2: Anzahl der Airbagzündung über Erstzulassung aus den GIDAS-Daten

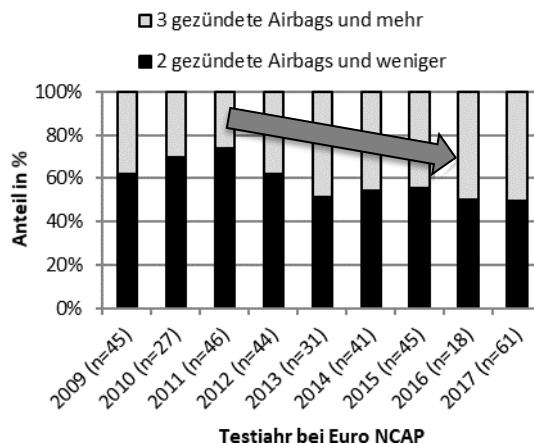


Bild 4-3: Anzahl der Airbagzündung im ODB Crashtest über Euro NCAP Testjahr

Zusätzlich wurde der Zustand der Fenster in den Unfallwagen analysiert, da es für die Belastung der Insassen durch den Schalldruckpegel ein wichtiger Faktor ist. Es zeigt sich, dass in neueren Fahrzeugen seltener die Fenster oder das Dach vor dem Unfall geöffnet waren (Bild 4-4). Grund dafür kann der hohe Ausrüstungsgrad mit Klimaanlage sein.

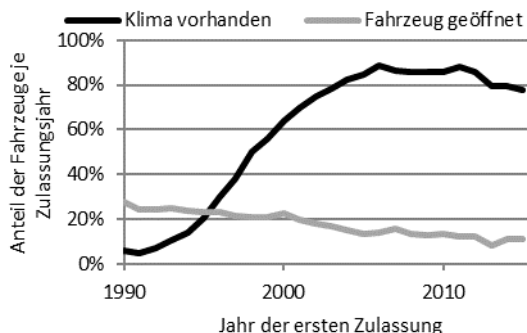


Bild 4-4: GIDAS-Auswertung der Klimaanlageausstattung und Zustand der Fenster (offen vs. geschlossen)

#### 4.2 Airbagauslöseschwelle in GIDAS-Frontalunfällen

Die ausgewerteten Daten zeigen, dass bei einer Geschwindigkeitsänderung von 10 km/h in 10 % der Fälle eine Airbagauslösung beobachtet wurde. Bei ca. 20 km/h Geschwindigkeitsänderung werden die Frontairbags in 50 % der Fälle ausgelöst. Fälle ohne Airbagauslösung konnten bis zu einem Delta-v in Höhe von 34 km/h beobachtet werden, siehe Bild 4-5 und Bild 4-6.

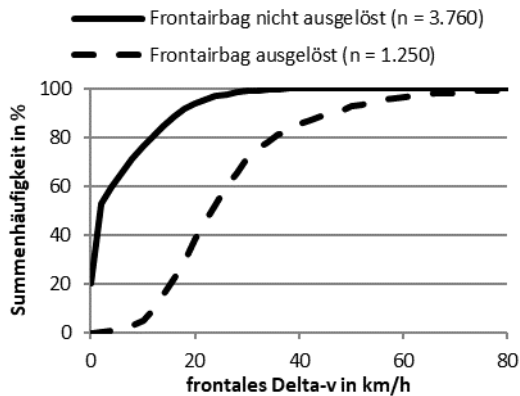


Bild 4-5: Summenhäufigkeit der Airbagauslösungen und Nichtauslösungen über frontales Delta-v

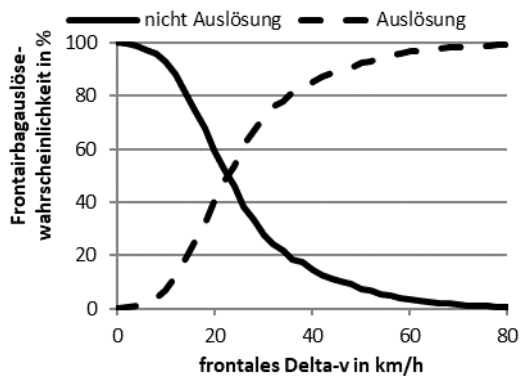


Bild 4-6: Auslösewahrscheinlichkeit von Frontalairbags über frontales Delta-v

Unter bestimmten Umständen ist eine Nichtauslösung der Frontalairbags trotz hoher rekonstruierter Geschwindigkeitsänderung bzw. eine Auslösung trotz niedriger rekonstruierter Geschwindigkeitsänderung aufgrund der äußeren Unfallumstände erklärlich. Beispielhaft werden zwei Fälle aufgeführt.

Beim ersten Beispielfall handelt es sich um einen Frontalaufprall mit kleiner Überdeckung auf der rechten Seite bei dem augenscheinlich der rechte Längsträger nicht oder nur kaum beaufschlagt wurde. Im weiteren Crashverlauf wurde auch das rechte Vorderrad beaufschlagt, siehe Bild 4-7. Der Fahrer verblieb in diesem Unfall unverletzt. Trotz der verhältnismäßig hohen rekonstruierten Geschwindigkeitsänderung von 35 km/h kann die Nichtauslösung des Airbags dadurch erklärt werden, dass die Unfallkräfte nicht über die Strukturen ins Fahrzeug eingeleitet wurden, die von den Sensoren überwacht werden (Längsträger, Mitteltunnel).



Bild 4-7: Unfall mit großer Geschwindigkeitsänderung ohne Airbagauslösung

Das Gegenteil konnte im nächsten exemplarisch vorgestellten Fall beobachtet werden. Ein Pkw kollidierte auf der Autobahn mit einem Fußgänger und die Frontalairbags lösten aus (Bild 4-8). Die Geschwindigkeitsänderung wurde mit 3 km/h rekonstruiert. Der Fußgänger beaufschlagte in diesem Fall direkt den rechten Upfronsensor. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass die Auslösekriterien an die gefahrene Geschwindigkeit angepasst werden und daher aufgrund der hohen Geschwindigkeit auf der Autobahn schon bei kleineren und kürzeren Beschleunigungen ausgelöst wird als es bei geringeren Geschwindigkeiten der Fall wäre.



Bild 4-8: Unfall mit kleiner Geschwindigkeitsänderung und Airbagauslösung

## 4.3 Verletzungen in GIDAS-Frontalunfällen

### 4.3.1 Analyse der Gesamtverletzungsschwere mit und ohne Airbag

Die Auswertung der amtlichen Verletzungsschwere (tödlich verletzt, schwer verletzt mit stationärer Behandlung und leicht verletzt ohne stationäre Behandlung direkt nach dem Unfall) zeigt ein weitestgehend erwartetes Bild. Die Verletzungsschwere ist in Unfällen ohne Airbagauslösung deutlich geringer als in Unfällen mit Airbagauslösung, siehe Bild 4-9. Dies liegt insbesondere daran, dass die Airbagauslösung eine Mindestschwere voraussetzt und daher die Fälle mit Airbagauslösung grundsätzlich schwerer sind als die ohne.

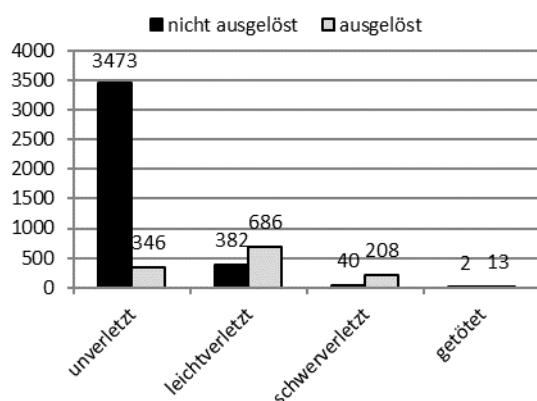


Bild 4-9: Amtliche Verletzungsschwere in Unfällen mit und ohne Airbagauslösung

In der Auswertung fallen insbesondere zwei Fälle mit getöteten Fahrern ohne Airbagauslösung auf. Bei einem der Fälle konnte trotz Obduktion lediglich eine AIS 1 Kopfverletzung und keine andere Todesursache festgestellt werden. Im anderen Fall wurde der Airbagstatus falsch kodiert (die Airbags haben tatsächlich ausgelöst). Die 40 schwerverletzten Beteiligten ohne Airbagauslösung sind bis auf eine ungegurtete Fahrerin und ein Fall mit einer AIS 3 Herzverletzung (minimaler Perikarderguss) Fälle mit MAIS 0 (1 Fall), MAIS 1 (21 Fälle), MAIS 2 (10 Fälle) Verletzungen und sechs Fälle mit unbekannter MAIS-Verletzungsschwere. Die AIS 2 Verletzungen in diesen Fällen sind acht Thoraxverletzungen, zwei Kopfverletzungen, eine Armverletzung und eine Bauchverletzung.

Bezogen auf die Verletzungsschwere gemäß AIS zeigt sich ein grundsätzlich vergleichbares Bild

zu der amtlichen Verletzungsschwere. Insgesamt haben aber nur wenige Fahrzeuginsassen in Fahrzeugen mit Airbags eine Verletzungsschwere von MAIS 3 und höher, siehe Bild 4-10. Bei den drei MAIS 3+ Fällen ohne Airbagauslösung handelt es sich um eine ungegurtete Frau mit Sitzposition weit vorn und schweren Abdominalverletzungen durch das Lenkrad. Ein Airbag hätte hier nicht sicher geholfen, anschnallen hätte jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit die Verletzungen vermieden. Des Weiteren wurde ein Fall mit minimalem Perikarderguss mit einer Geschwindigkeitsänderung von 16 km/h beobachtet und in einen Fall wurde der Airbagstatus falsch kodiert (Airbag hat tatsächlich ausgelöst).

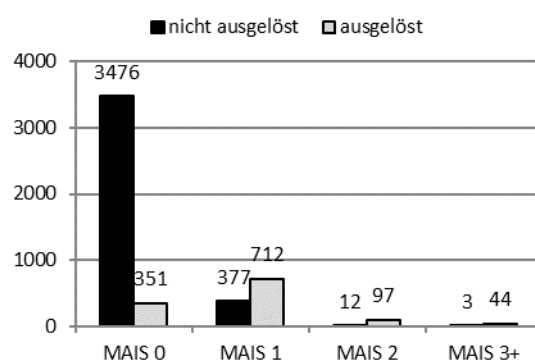


Bild 4-10: MAIS-Verletzungsschwere mit und ohne Airbagauslösung

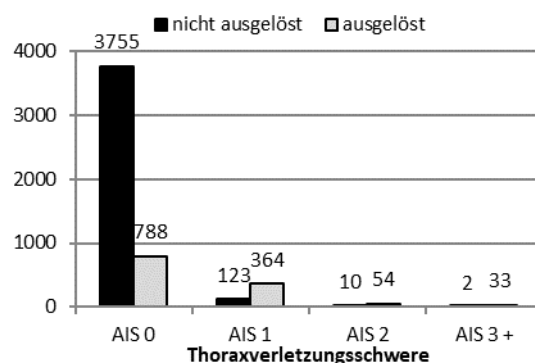


Bild 4-11: Thoraxverletzungsschwere mit und ohne Airbagauslösung

Bei den schwereren Verletzungen (MAIS 2+) fallen insbesondere Brustverletzungen auf, siehe Bild 4-11. Fast alle AIS 2 Verletzten ohne Airbagauslösung hatten eine AIS 2 Brustverletzung. Bei den Fällen mit Airbagauslösung sind 97 MAIS 2 beobachtet worden davon 52 Fälle mit einer AIS 2 Brustverletzung. Bei den 44 MAIS 3+ Fällen mit Airbagauslösung können 31 Fälle auf Brustverletzungen mindestens mitverantwortlich



für die MAIS 3+ Bewertung gemacht werden, siehe Bild 4-11 im Vergleich mit Bild 4-10.

### 4.3.2 Analyse der Einzelverletzungen

Die Schutzwirkung des Rückhaltesystems wird durch das Zusammenwirken von Gurt und Airbag erreicht. Im Gegensatz zur Analyse der Airbagauslösungen und der Gesamtverletzungsschwere werden daher an dieser Stelle nur Einzelverletzungen von gegurteten Frontinsassen, die eine Kollision mit einem Pkw, einem Lkw oder einem Objekt hatten, analysiert siehe Bild 4-12.

Unfälle ab 2001 insgesamt	n = 33.001
Unfälle auswertbar	n = 29.904
Unfallbeteiligte	n = 57.781
davon Pkw	n = 34.557
Produktionsstart ab 2001	n = 10.135
Frontalkollision mit Pkw, Lkw oder Objekt	n = 2.346
Fahrer gegurtet	n = 2.057
Beifahrer gegurtet	n = 533

Bild 4-12: Auswerterahmen für Analyseanalyse der Einzelverletzungen

Gemäß Bild 4-6 ist davon auszugehen, dass die Auslöseschwelle für Frontairbags in der Regel zwischen 20 und 25 km/h liegt. Im Folgenden werden die Einzelverletzungen für Fälle ohne Airbagauslösung mit einer Geschwindigkeitsänderung von mehr als 20 km/h sowie Fälle mit Airbagauslösung mit einer Geschwindigkeitsänderung von bis zu 25 km/h analysiert. Hierbei wird vor allem diskutiert, welche auftretenden Verletzungen durch den Airbag entstanden sein könnten und welche Verletzungen ggf. durch einen Airbag hätten vermieden werden können.

In Fällen mit einer Geschwindigkeitsänderung von 20 km/h oder mehr ohne Airbagauslösung erlitten insgesamt 92 Personen 161 Einzelverletzungen. In Fällen mit Airbagauslösung und einer Geschwindigkeitsänderung von 25 km/h oder weniger wurden bei 390 Personen 771 Einzelverletzungen beobachtet.

Verletzungsart	Delta-v > 20 km/h ohne Airbagauslösung (n=92 Personen)	Delta-v < 25 km/h mit Airbagauslösung (n=390 Personen)
Verletzung o.n.A.	4 (4,5 %)	8 (2,1 %)
Weichteilverletzung o.n.A.	0 (0,0 %)	<b>12 (3,1 %)</b>
Haut-/Weichteilprellung	67 (72,8 %)	<b>363 (93,1 %)</b>
Haut-/Weichteilhämatom	1 (1,1 %)	<b>21 (5,4 %)</b>
Haut-/Weichteilschürfung	5 (5,4 %)	<b>103 (26,4 %)</b>
Haut-/Weichteilquetschung	0 (0,0 %)	1 (0,3 %)
Haut-/Weichteilschnittwunde	3 (3,3 %)	11 (2,8 %)
Haut-/Weichteilrissquetschwunde	3 (3,3 %)	13 (3,3 %)
Verbrennung o.n.A.	0 (0,0 %)	<b>5 (1,3 %)</b>
Verbrennung 1. Grades	0 (0,0 %)	<b>17 (4,4 %)</b>
Verbrennung 2. Grades	0 (0,0 %)	<b>1 (0,3 %)</b>
Fissur	0 (0,0 %)	1 (0,3 %)
Fraktur	<b>14 (15,2 %)</b>	40 (10,3 %)
Rippenfraktur einfach	0 (0,0 %)	1 (0,3 %)
Rippenfraktur 2 – 3 Rippen	1 (1,1 %)	1 (0,3 %)
Rippenserienfraktur >3	1 (1,1 %)	2 (0,5 %)
Luxationsfraktur	1 (1,1 %)	0 (0,0 %)
Distorsion	<b>48 (52,2 %)</b>	145 (37,2 %)
Organverletzung o.n.A.	1 (1,1 %)	3 (0,8 %)
Organprellung	2 (2,2 %)	1 (0,3 %)
Organhämatom	1 (1,1 %)	0 (0,0 %)
Commotio (SHT 1. Grades)	<b>7 (7,6 %)</b>	14 (3,6 %)
Gefäßverletzung o.n.A.	0 (0,0 %)	1 (0,3 %)
Zahndefekt	0 (0,0 %)	1 (0,3 %)

Tab. 4-1: Anzahl der Personen nach Verletzungsart bei Fällen mit Delta-v über 20 km/h ohne Airbagauslösung und Fällen mit Delta-v unter 25 km/h mit Airbagauslösung (Prozentsätze beziehen sich auf die Anzahl der verletzten Personen)

In Tab. 4-1 sind die Verletzungsarten bei Unfällen mit kleiner Geschwindigkeitsänderung (Delta-v unter 25 km/h) und Airbagauslösung sowie bei Unfällen mit verhältnismäßig großer Geschwindigkeitsänderung (Delta-v über 20 km/h) ohne Airbagauslösung dargestellt. Verletzungen, die möglicherweise durch eine Airbagauslösung

bzw. durch Airbagunterdrückung hätten vermieden werden können, sind hervorgehoben. Sofern relevant, werden diese Verletzungsarten im Folgenden näher untersucht. Grundsätzlich ist zu sehen, dass in beiden Fällen die meisten Verletzungen Distorsionen (in der Regel Halswirbelsäulendistorsionen (kurz: HWS-Distorsionen) oder besser als Schleudertrauma bekannt) und oberflächliche Verletzungen sind.

HWS-Distorsionen können erfahrungsgemäß bei allen Unfällen mit und ohne Airbagauslösung auftreten. Eine Differenzierung zwischen Verspannung und ernsthaften Verletzungen ist hier nicht möglich. Insgesamt treten Distorsionen jedoch deutlich seltener in Fällen mit Airbagauslösung trotz relativ hoher Unfallschwere auf, als in Fällen ohne Airbagauslösung bei verhältnismäßig geringer Unfallschwere. Oberflächliche Hautverletzungen treten ebenfalls unabhängig von Kollisionsart und Airbagauslösung sehr häufig auf, jedoch können insbesondere Prellungen und Schürfwunden bei Airbagauslösung deutlich häufiger beobachtet werden.

Verbrennungen treten ausschließlich bei den Fällen mit Airbagauslösung auf. Diese können auf die heißen Airbaggase sowie die Reibung zwischen dem Airbag und dem Insassen zurückgeführt werden und könnten ohne Airbag-auslösung vermieden werden. Die Frage, ob in diesen Fällen andere Verletzungen aufgetreten wären, ist pauschal nicht zu beantworten und muss fallspezifisch betrachtet werden.

Bei Frakturen ist der betroffene Knochen, die Art der Fraktur und die Unfallumstände entscheidend, ob die Verletzung bei veränderter Airbagauslösung hätte vermieden werden können. Auch wenn mit Hilfe der GIDAS-Daten der Airbagzündzeitpunkt nicht ermittelt werden kann, besteht gerade bei geringer Unfallschwere und schlechter struktureller Interaktion das Risiko einer sehr späten Airbagauslösung [JOHANNSEN & OTTE, 2015] und damit ein Risiko für airbaginduzierte Verletzungen im Thorax. Für den Thorax ist davon auszugehen, dass Rippenbrüche durch eine verbesserte Abstimmung der Airbagauslösung vermieden werden können. Ebenso ist davon auszugehen, dass in den dokumentierten Frontalaufprällen ohne Airbagauslösung und Rippenfrakturen, Schlüsselbeinfrakturen und Wirbelkörperfrakturen diese durch eine gut abgestimmte Airbagauslösung hätten vermieden werden können. Auf der anderen Seite werden insbesondere am Lenkrad bedingt durch die Fahraufgabe die Hände und die Unterarme direkt

durch den sich öffnenden Airbag beaufschlagt, was zu entsprechenden Frakturen im ganzen Arm führen kann. Diese können durch eine Unterdrückung eines nicht zum Schutz vor schweren Verletzungen benötigten Airbag vermieden werden. Sternumfrakturen werden wiederum mit und ohne Airbagauslösung in unterschiedlichen Unfallkonstellationen beobachtet. Daher kann davon ausgegangen werden, dass Sternumfrakturen nicht durch die Zündung oder die Unterdrückung des Airbags vermieden werden könnten.

Insbesondere für die Fahrerin oder den Fahrer treten häufig Knochenverletzungen des Unterarms und der Hand bei den Fällen mit Airbagauslösung auf, siehe Tab. 4-2.

	<b>Fälle mit Delta-v &gt;20 km/h ohne Airbagauslösung</b>	<b>Fälle mit Delta-v &lt;25 km/h mit Airbagauslösung</b>
	Fahrer*in (n=189) / Beifahrer*in (n=49)	Fahrer*in (n=599) / Beifahrer*in (n=176)
Nasenbein	1 / 0	0 / 0
Knochen obere Extremitäten	2 / 0	8 / 3
Radius	0 / 0	1 / 0
Mittelhandknochen	0 / 0	3 / 0
Fingerknochen	2 / 0	1 / 0
Handgelenk	0 / 0	1 / 0
Daumengelenk	0 / 0	1 / 0
Sternum	3 / 4	9 / 7
Wirbelkörper Halswirbelsäule	0 / 0	1 / 1
Wirbelkörper Brustwirbelsäule	0 / 0	1 / 2
Wirbelkörper Lendenwirbelsäule	0 / 2	0 / 1
Becken	0 / 1	0 / 2
Untere Extremitäten	1 / 0	5 / 1

Tab. 4-2: Frakturen bei Fällen mit Delta-v über 20 km/h ohne Airbagauslösung und Fällen mit Delta-v unter 25 km/h mit Airbagauslösung

Ein Tinnitus, als einzige nach AIS-Codebook kodierbare Verletzung des Gehörs, wurde insgesamt in acht Fällen kodiert. Diese traten insbesondere bei geringen bis mittleren Geschwindigkeitsänderungen (15 bis 25 km/h) auf, siehe Bild 4-13.

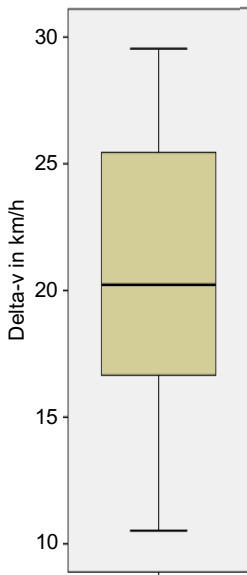


Bild 4-13: Delta-v-Verteilung bei Unfällen mit kodiertem Tinnitus (n=8)

#### 4.4 Verletzungen in GIDAS-Seitenaufprällen

Für die Analyse der Seitenaufprallunfälle wurden ebenfalls Insassen in Fahrzeugen mit Erstzulassung ab 2001 aus dem GIDAS-Abzug Dezember 2017 (nur abgeschlossene Fälle) herangezogen, siehe Bild 4-14. Des Weiteren wurden für die meisten Analysen nur Insassen auf der stoßzugewandten Seite berücksichtigt, da diese sich im Wirkungsbereich der Seitenairbags befinden. Insassen auf der Mittelposition wurden als stoßabgewandte Insassen berücksichtigt.

Unfälle ab 2001 insgesamt	n = 33.001
Unfälle auswertbar	n = 29.904
Unfallbeteiligte	n = 57.781
davon Pkw	n = 34.557
Produktionsstart ab 2001	n = 10.135
Seitenkollision	n = 2.195
Stoßzugewandte Insassen	n = 1.454
Stoßabgewandte Insassen	n = 1.392

Bild 4-14: Auswertrahmen für GIDAS-Unfallanalyse Seitenaufprall (Mehrfachkollisionen und Überschläge wurden ausgeschlossen, Vehicle Deformation Index 2 wurde mit 2 (rechte Seite) oder 4 (linke Seite) definiert)

In den meisten untersuchten Unfällen wurden vorhandene Seitenairbags nicht ausgelöst und die Insassen verblieben unverletzt (Bild 4-15).

Insgesamt wurden an der vorhandenen Sitzposition in 145 Fällen keine Seitenairbags vorgefunden, in 1.022 Fällen löste keiner der vorhandenen Seitenairbags aus. In 92 Fällen löste nur ein Seitenairbag (dachintegriert, türintegriert oder sitzintegriert) aus und in 139 Fällen wurde eine Kombination von zwei Seitenairbags (z.B. dachintegriert und sitzintegriert) ausgelöst.

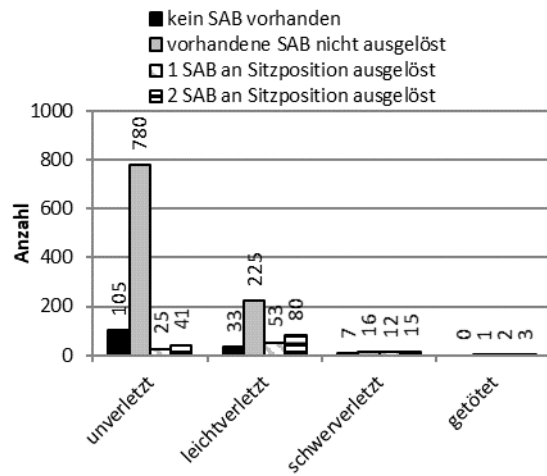


Bild 4-15: Amtliche Verletzungsschwere beim Seitenaufprall

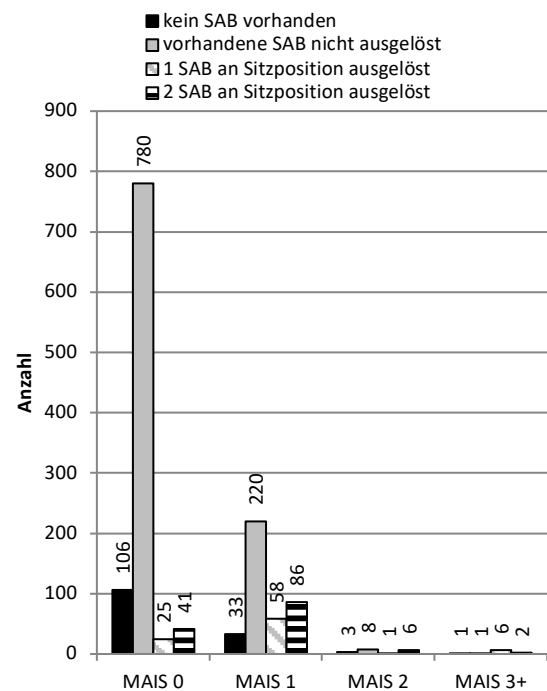


Bild 4-16: MAIS-Verletzungsschwere beim Seitenaufprall

Der tödlich verletzte Insasse ohne Seitenairbagauslösung trotz vorhandener Seitenairbags ist laut Totenschein vermutlich an einem Herz-Kreislaufversagen verstorben und nicht an den direkten Traumafolgen. Gemessen an der großen Anzahl an Insassen bei denen vorhandenen Seitenairbags nicht auslösten, ist der Anteil der Schwerverletzten mit 1,6 % verhältnismäßig klein. Bei der Analyse ist zu berücksichtigen, dass die Auslösung eines Seitenairbags eine Mindestunfall schwere voraussetzt und daher die auf das Fahrzeug wirkende Beschleunigung bzw. die auf den Insassen wirkende Intrusion größer ist, als in den Fällen ohne Seitenairbagauslösung. Dies erklärt, warum in den Fällen mit Airbagauslösung verhältnismäßig mehr Verletzte zu beobachten sind als in den Fällen ohne Airbagauslösung. Interessant ist, dass der Anteil der Schwerverletzten mit nur einem Seitenairbag mit 13 % größer ist als der mit der Kombination von zwei Seitenairbags mit 10,8 %.

Ein vergleichbares Bild liefert die Analyse der MAIS-Verletzungsschwere in Abhängigkeit der Seitenairbagauslösung (Bild 4-16). Bei dem einen MAIS 3+ Fall ohne Seitenairbagauslösung handelt es sich um einen Insassen in der 2. Sitzreihe und einem seitlichen Pfahlaufprall mit Trefferlage hinter der Insassenzone (Bild 4-17). Da die Intrusion hinter dem Insassenbereich stattgefunden hat, ist es technisch erklärbar, dass kein Seitenairbag aktiviert wurde, da in diesem Bereich kein Sensor verbaut ist. Es ist jedoch davon auszugehen, dass ein dachintegrierter Seitenairbag die schweren Kopfverletzungen hätte vermeiden können.



Bild 4-17: Deformationsbild beim Fall mit MAIS 3+ Verletzung ohne Seitenairbagauslösung

Zur weiteren Analyse werden nur die Fälle betrachtet, bei denen an der Sitzposition mindestens ein Seitenairbag aktiviert wurde. Hierbei wird dann untersucht, welcher Seitenairbag sich entfaltet hat (nur Dach, nur Sitz oder Tür sowie Kombination beider), siehe Tab. 4-3. Insbesondere für den Kopf zeigt sich das Schutzpotential durch

den dachintegrierten Seitenairbag (egal ob in Kombination mit einem sitz- oder türintegrierten Seitenairbag oder allein). Der Thorax scheint insbesondere von der Kombination aus beiden Airbags zu profitieren.

Aufgrund der geringen Anzahl an Seitenaufprallunfällen mit Seitenairbagauslösung bietet sich eine Untersuchung der Auslöseschwelle nicht an.

Ein Tinnitus, als einzige nach AIS-Codebook kodierbare Verletzung des Gehörs, wurde insgesamt in 7 Fällen kodiert. Bei 5 Fällen war ein dachintegrierter Airbag in Verbindung mit einem sitz- oder türintegriertem Seitenairbag aktiv (davon war in einem Fall der Beifahrer betroffen und die Airbags auf der Fahrerseite wurden aktiviert). In zwei Fällen waren nur die Frontairbags aktiviert.

Körperregion	Nur Dach (n=38)		Nur Sitz oder Tür (n=54)		Kombination (n=139)	
	MAIS 2+	MAIS 3+	MAIS 2+	MAIS 3+	MAIS 2+	MAIS 3+
<b>Kopf</b>	2,6%	2,6%	7,4%	5,6%	2,2%	1,4%
<b>Hals</b>	2,6%	0,0%	1,9%	0,0%	0,7%	0,7%
<b>Thorax</b>	5,3%	2,6%	7,4%	3,7%	2,2%	1,4%
<b>Abdomen</b>	2,6%	0,0%	1,9%	1,9%	2,2%	0,7%
<b>Becken</b>	0,0%	0,0%	3,7%	3,7%	1,4%	2,9%
<b>Arme</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,2%	0,0%
<b>Beine</b>	2,6%	2,6%	0,0%	0,0%	2,2%	1,4%

Tab. 4-3: Verletzungsschwere der Körperregionen in Abhängigkeit des aktivierten Seitenairbags

## 4.5 GIDAS-Einzelfallanalyse

Mit dem Ziel, Unfälle für die geplanten Rekonstruktionsversuche zu ermitteln, wurden gezielt Unfälle mit auffälligen Verletzungsschweren, das heißt hohe Verletzungsschwere bei niedriger Unfallschwere gesucht. Die verwendeten Suchkriterien und deren Begründung sind in Tab. 4-4 aufgelistet. Aufgrund von Voruntersuchungen wurde der Fokus auf Frontalunfälle gerichtet, da in diesen keine für diese Untersuchung relevanten Seitenaufprälle identifiziert wurden.

Zusätzlich wurden in einem nächsten Schritt gezielt nach Unfällen mit der Kodierung Über-/Unterfahren gesucht, da dieses Problem bereits in F53 diskutiert wurde und dies als wichtiger Aspekt für die Weiterentwicklung von Airbags angesehen wurde.

Kriterium	Begründung für Kriterium
<b>Delta-v kleiner als 49 km/h</b>	Bei größerer Unfallschwere können unabhängig von der Qualität des Rückhaltesystems schwere Verletzungen auftreten
<b>Nur Frontalaufprallkollisionen für das betrachtete Fahrzeug</b>	Voruntersuchung ergab keine Fälle mit Seitenairbags
<b>Alter des betrachteten Frontinsassen zwischen 18 und 64 Jahren</b>	Bei älteren und jüngeren Frontinsassen spielt das Alter eine übergeordnete Rolle bei der Verletzungsbewertung
<b>Nur ECE-94 homologierte Fahrzeuge</b>	Ausschluss von alten Fahrzeugen, die nicht dem Stand der Technik entsprechen (in Bezug auf die Fahrzeughomologation)
<b>Keine Einschränkungen in Bezug auf den Kollisionspartner</b>	Airbaginteraktionen können bei allen Kollisionspartnern auftreten

Tab. 4-4: Suchkriterien der GIDAS-Einzelfallanalyse

Nach der Identifikation der potentiell relevanten Fälle durch diese Kriterien, wurden im zweiten Schritt die Ergebnisfälle einzeln analysiert, um die für die Studie relevanten Fälle zu erhalten. Durch eine möglichst grobe Wahl der Filterkriterien im ersten Schritt konnten auch gegebenenfalls fehlerhaft codierte Fälle bei der manuellen Auswahl als relevant identifiziert werden. Die Recherche der GIDAS-Datenbank lieferte 14 Einzelfälle.

**4.5.1 Fall 1: Frontalkollision mit Renault Scenic**



Bild 4-18: Beschädigungen Fall 1 Renault Scenic

Aufgrund von Unachtsamkeit gerät der Fahrer eines Nissan Primera (Erstzulassung 1990) bei einer leichten Fahrbahnverschwenkung nach rechts auf die Gegenfahrbahn und kollidiert frontal mit einem entgegenkommenden Renault Scenic (Erstzulassung 2003). Die Geschwindigkeitsänderung des Renault (Fallauto) wurde mit 25 km/h und die EES mit 23 km/h rekonstruiert. Der 38 Jahre alte Fahrer des Renault sowie der 15 Jahre alte Mitfahrer hinten links erlitten eine Sternumfraktur. Des Weiteren erlitten Beifahrer und Mitfahrer hinten rechts ein Schleudertrauma.

**4.5.2 Fall 2: Frontalkollision Nissan Micra**

Der Fahrer eines Nissan Micra (Erstzulassung 2004) kommt auf in die Straße eingelassenen Schienen ins Schleudern und prallt frontal gegen eine Häuserwand. In diesem Fall wurde die Geschwindigkeitsänderung mit 25 km/h und die EES mit 16 km/h rekonstruiert. Der 20 Jahre alte Fahrer des Nissan erlitt eine Sternumfraktur sowie eine Brustwirbelkörperfraktur.



Bild 4-19: Beschädigungen Fall 2 Nissan Micra

**4.5.3 Fall 3: Frontalkollision Daihatsu Cuore**

Der Fahrer eines Daihatsu Cuore (Erstzulassung unbekannt, Modell L251, Markteinführung 2003) wollte an einer Kreuzung nach links abbiegen. Dabei missachtete er die Vorfahrt des Seat Arosa (Erstzulassung unbekannt) und es kam zur Kollision. Der Seat kam auf dem Dach liegend in die Endposition. Die Geschwindigkeitsänderung des Daihatsu wurde mit 46 km/h rekonstruiert bei einer EES von 25 km/h. Der 38 Jahre alte Fahrer des Daihatsu erlitt eine Sternumfraktur.





Bild 4-20: Beschädigungen Fall 3 Daihatsu Cuore

#### 4.5.4 Fall 4: Baumaufprall Seat Cordoba

Aufgrund von Unachtsamkeit kommt der Fahrer eines Seat Cordoba (Erstzulassung 2003) nach links von der Fahrbahn ab und kollidiert dort mit einem im Seitenraum befindlichen Baum. Delta-v und EES wurden mit 24 km/h und 26 km/h rekonstruiert. Der 62-jährige Fahrer erlitt bei dem Unfall eine Sternumfraktur sowie Prellungen am Becken und Knie.



Bild 4-21: Beschädigungen Fall 4 Seat Cordoba

#### 4.5.5 Fall 5: Baumaufprall Seat Leon



Bild 4-22: Beschädigungen Fall 5 Seat Leon

Der Fahrer eines Seat Leon (Erstzulassung 2009) wurde plötzlich ohnmächtig, kam daraufhin nach rechts von der Fahrbahn ab und kollidierte mit einem Baum. Das Delta-v wurde mit 63 km/h rekonstruiert, die EES wurde mit 55 km/h abgeschätzt. Der 52 Jahre alte Fahrer erlitt bei dem Anprall ein Schädelhirntrauma 1. Grades, eine linksseitige Schlüsselbeinfraktur (original ist rechtsseitig kodiert, der Erhebungsbeleg zeigt aber linksseitig an), eine beidseitige Rippenserienerfraktur, eine Wirbelkörperfraktur sowie Milz- und Leberkontusionen.

#### 4.5.6 Fall 6: Laternenkollision Nissan Micra

Aufgrund plötzlichen Unwohlseins kam die FahrerIn eines Nissan Micra (Erstzulassung 2003) nach links von der Fahrbahn ab und kollidierte dort mit einem Laternenmast, der durch den Aufprall abknickte. Die Unfallrekonstruktion lieferte eine Geschwindigkeitsänderung von 30 km/h bei einer EES von 33 km/h. Die 61-jährige FahrerIn erlitt bei dem Aufprall eine Sternumfraktur. Die weiteren Insassen erlitten ein Schleudertrauma, Schürfwunden und eine Thoraxkontusion (9-jähriger Beifahrer), Thoraxkontusion (5 Jahre alter Insasse hinten links) sowie Thoraxkontusion und Nackenhämatom (5 Jahre alter Insasse hinten rechts).



Bild 4-23: Beschädigungen Fall 6 Nissan Micra

#### 4.5.7 Fall 7: Laternenkollision VW Golf



Bild 4-24: Beschädigungen Fall 7 VW Golf

Ohne ersichtlichen Grund kam der Fahrer eines VW Golf (Erstzulassung 2008) nach rechts von der Fahrbahn ab und kollidierte mit einem Oberleitungsmast. In der Unfallrekonstruktion wurde eine Geschwindigkeitsänderung von 51 km/h mit einer EES von 36 km/h ermittelt. Der 34 Jahre alte Fahrer erlitt ein Schädelhirntrauma 1. Grades und Handfrakturen. Der 3-jährige Insasse hinten links erlitt einen Zungenbiss sowie eine Hüftprellung.

#### 4.5.8 Fall 8: Laternenkollision Fiat Stilo

Aufgrund eines späten Überholmanövers erkannte der Fahrer eines Fiat Stilo (Erstzulassung 2005) eine Ampel zu spät. Er bremste stark und kam ins Schleudern. Dabei kollidierte er mit einem Ampelmast im rechten Seitenraum. Als Geschwindigkeitsänderung wurden 43 km/h bei einem EES von 35 km/h rekonstruiert. Der 19-jährige Fahrer erlitt eine Sternumfraktur, eine Rippenfraktur rechts sowie eine Handgelenksprellung.



Bild 4-25: Beschädigungen Fall 8 Fiat Stilo

#### 4.5.9 Fall 9: Kollision mit Laderampe Ford Focus



Bild 4-26: Beschädigungen Fall 9 Ford Focus



Bild 4-27: Fall 9 Kollisionspartner: Laderampe

Um einem entgegenkommenden Pkw auszuweichen, kommt der Fahrer eines Ford Focus (Erstzulassung 2011) nach rechts von der Fahrbahn ab und kollidiert dort mit einer Laderampe. Das Delta-v wurde in dem Fall mit 37 km/h und die EES mit 20 km/h rekonstruiert. Der 51 Jahre alte Fahrer des Ford erlitt durch den Aufprall eine Sternumfraktur sowie eine Prellung der rechten Hand. Der Kollisionspartner in diesem Fall war eine parallel zur Fahrtrichtung aufgebaute Betonladerampe, die vom Ford teilweise unterfahren wurde.

#### 4.5.10 Fall 10: Unterfahren Mercedes E-Klasse

Der Fahrer eines Mercedes E420 CDI (Erstzulassung 2008) befuhr die rechte Spur einer Autobahn. Aufgrund einer Blendung durch Sonneneinstrahlung übersah der Fahrer den vor ihm stehenden Lkw und fuhr ungebremst auf den Anhänger auf. Die Geschwindigkeitsänderung wurde mit 71 km/h bei einer EES von 60 km/h rekonstruiert. Der 61 Jahre alte Fahrer des Mercedes E 420 CDI erlitt eine Sternumfraktur, ein Schleudertrauma sowie eine Brustprellung (MAIS 2).

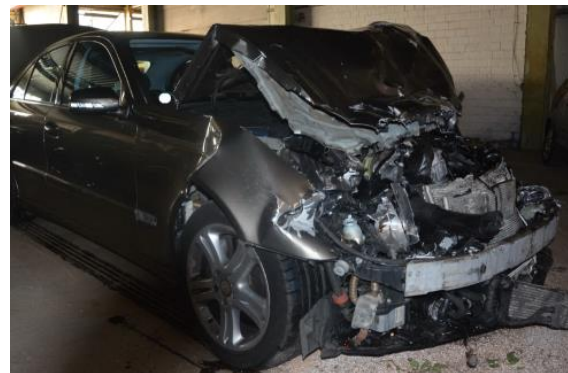


Bild 4-28: Beschädigungen Fall 10 Mercedes E-Klasse



#### 4.5.11 Fall 11: Unterfahren Fiat 500

Der Fahrer eines Skoda Fabia (Erstzulassung 2014) muss verkehrsbedingt halten, die nachfolgenden Fahrzeuge Fiat 500 (Erstzulassung 2008) und BMW 3er bremsen, um einen Unfall zu vermeiden. Hierbei stößt jedoch der BMW zunächst leicht gegen den Fiat und beschleunigt den Fiat. Anschließend stößt der Fiat gegen den Skoda. Hierbei wurden die Insassen im Skoda und Fiat verletzt. Die Geschwindigkeitsänderung bei dem Stoß gegen den Skoda wurde für den Fiat mit 8 km/h rekonstruiert. Der 20 Jahre alte Fahrer des Fiat 500 erlitt eine Wirbelsäulenprellung, eine Thoraxprellung, eine Gehirnerschütterung sowie eine Läsion des Plexus brachialis (MAIS 2).



Bild 4-29: Beschädigungen Fall 11 Fiat 500

#### 4.5.12 Fall 12: Unterfahren Skoda Yeti

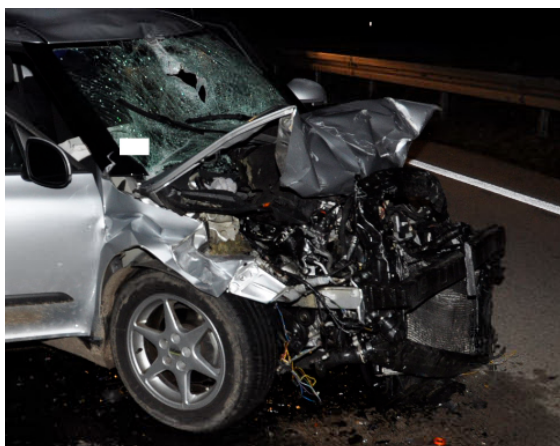


Bild 4-30: Beschädigungen Fall 12 Skoda Yeti

Der Fahrer eines Skoda Yeti (Erstzulassung 2010) fuhr auf der Autobahn auf das Heck eines Lkw. Die Geschwindigkeitsänderung wurde mit einem Delta-v von 72 km/h rekonstruiert. Es ist denkbar, dass der Fahrer des Skoda bei der

Kollision Kontakt zu Anbauteilen des Lkw hatte. Der 70 Jahre alte Fahrer des Skoda erlitt eine Oberarmfraktur, eine Schlüsselbeinfraktur, eine Sternumfraktur, eine Lungenkontusion sowie Hautverletzungen an den Beinen (MAIS 3).

#### 4.5.13 Fall 13: Unterfahren VW Polo

Der Lkw des Typs Mercedes Benz 1846 befuhr den rechten Hauptfahrstreifen einer Autobahn. Von hinten näherte sich der VW Polo und fuhr ungebremst auf das Heck des Aufliegers. Dadurch geriet der Pkw ins Schleudern, touchierte die rechte Leitplanke, schleuderte über alle Fahrspuren, kollidierte mit der Mittelleitplanke, wurde wieder zurückgeworfen und kam mit der Front an der rechtsseitigen Leitplanke zum Stehen. Die Geschwindigkeitsänderung bei der Kollision mit dem Lkw wurde mit einem Delta-v von 71 km/h rekonstruiert. Im Auslauf gab es weitere Kollisionen seitens des VW Polo (Erstzulassung 2004). Der 71 Jahre alte Fahrer des Polos erlitt beidseitige Rippenfrakturen, einen Pleuraerguss beidseitig, sowie eine Sternumfraktur (MAIS 3).

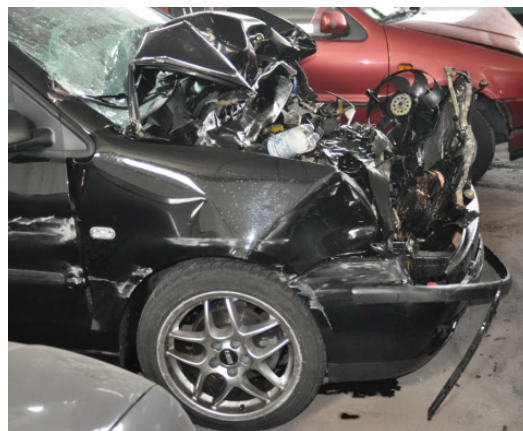


Bild 4-31: Beschädigungen Fall 13 VW Polo

#### 4.5.14 Fall 14: Unterfahren BMW X5

Die Fahrerin eines BMW X5 verliert die Kontrolle über ihr Fahrzeug, als sie einen epileptischen Anfall erleidet. Ihr Fahrzeug streift zunächst einen Ford Fusion und kollidiert dann frontal mit einem Lkw. Hierbei kommt es zum teilweisen Unterfahren des BMW unter die Front des Lkw. Die 43 Jahre alte Fahrerin des BMW X5 erleidet ein Schädelhirntraum 1. Grades, ein Thoraxtrauma und eine Schürfung des linken Daumens.





Bild 4-32: Beschädigungen Fall 14 BMW X5

#### 4.5.15 Zusammenfassung Einzelfallanalyse

In der Einzelfallanalyse wurden insgesamt 14 Fälle analysiert. Auffällig ist, dass elf der analysierten Fälle Unfallkonstellationen mit geringer struktureller Interaktion sind (fünf zentrale Stöße, fünf Unterfahrfälle und ein Stoß außerhalb der Längsträger). Nur in drei Fällen kam es zu einer Beaufschlagung der Längsträger.

### 4.6 Patientinnen- und Patientendaten der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH)

Im Rahmen des Projekts sollten Patientinnen und Patienten der Zentralen Notaufnahme der MHH und des Deutschen Hörzentrums, die bei einem Unfall als Fahrzeuginsasse beteiligt waren befragt werden, um die Zahl möglicher Fälle weiter zu erhöhen. Hierbei stellte sich heraus, dass dieser Ansatz zu einer geringen Anzahl an Fällen führte. Daher wurden als Alternative die automatische Arztbriefsuche der Unfallchirurgie sowie die Suche nach Gutachten für Knalltraumapatientinnen und -patienten geprüft.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Folgenden dargestellt.

#### 4.6.1 MHH Zentrale Notaufnahme

Die Zentrale Notaufnahme der MHH wurde gebeten im Rahmen dieser Studie Personen zu melden, die in einem Verkehrsunfall eine Airbagauslösung erlebten bzw. die sich fragten, warum der Airbag in ihrem Auto nicht ausgelöst hat. Es wurden insgesamt drei Personen gemeldet, die im weiteren Verlauf nicht berücksichtigt wurden, da eine ausreichende Berücksichtigung des Datenschutzes nicht gewährleistet werden kann.

Die Studie konnte aufgrund der internen Arbeitsprozesse nicht besser von der Zentralen Notaufnahme der MHH unterstützt werden.

#### 4.6.2 Arztbriefauswertung der Unfallchirurgie

Für die Arztbriefauswertung wurden Arztbriefe nach Schlagworten durchsucht, um die Patientinnen und Patienten bei relevanten Fällen gezielt anschreiben zu können. Für dieses Projekt wurden die Arztbriefe des Jahres 2016 nach dem Stichwort Airbag durchsucht. Die Suche ergab 124 Treffer von 10.669 analysierten Arztbriefen der zentralen Notaufnahme der MHH. Die Daten wurden mit den entsprechenden GIDAS-Unfalldaten abgeglichen, um zu prüfen, ob dieses Vorgehen zielführend ist, bevor die Patientinnen und Patienten angeschrieben wurden. Der Abgleich der Trefferliste mit den entsprechenden von der MHH Unfallforschung erhobenen Daten aus dem Jahr 2016 ergab, dass 18 Fälle der Trefferliste auch in GIDAS aufgenommen wurden. Dieser Abgleich kann während der Bearbeitungszeit der Fälle von der MHH Unfallforschung durchgeführt werden, da die Namen der unfallbeteiligten Personen in diesem Zeitraum intern zur Verfügung stehen. Die Prüfung der GIDAS-Daten zeigte, dass bei einem Großteil der Treffer kein Airbag auslöste, sodass davon auszugehen ist, dass häufig in den gefundenen Arztbriefen angegeben wird, dass kein Airbag ausgelöst hat. Die Fälle teilen sich wie folgt auf:

- 11 Fälle ohne Airbagauslösung
- 4 Fälle mit Frontairbagauslösung
- 3 Fälle mit Frontairbag und Curtairauslösung

Gleichzeitig zeigte die Analyse der GIDAS-Daten, dass 33 Patientinnen und Patienten mit Airbagauslösung in der MHH behandelt wurden, wovon nur 7 Personen ein Arztbrief mit entsprechendem Eintrag zugeordnet werden konnte.

Da das Vorgehen zeigte, dass viele relevante Patientinnen und Patienten wahrscheinlich nicht identifiziert werden konnten, dafür aber viele für diese Studie irrelevante Fälle zu Treffern führte, wurde diese Vorgehensweise nicht weiterverfolgt.

Die automatisierte Untersuchung der Arztbriefe nach dem Stichwort „Airbag“ und das ursprünglich geplante spätere Anschreiben der „Treffer“ wurde durch den Datenschutzbeauftragten der MHH und dem Leiter der Unfallchirurgie vor Durchführung genehmigt. (Ein Votum der Ethikkommission ist nicht erforderlich.)

### 4.6.3 Ansprache von Patienten des Deutschen Hörzentrums

Im Rahmen dieser Studie wurden Patientinnen und Patienten des Deutschen Hörzentrums angesprochen, ob deren Hörprobleme auf einen Autounfall zurückzuführen seien. Von allen behandelten Patientinnen und Patienten zwischen Mai 2016 und April 2017 gaben insgesamt zwei Personen an, dass ihre Hörprobleme auf eine Airbagzündung zurückzuführen sei. Diese Fälle wurden im Folgenden nicht weiter betrachtet, da eine ausreichende Berücksichtigung des Datenschutzes nicht gewährleistet werden konnte, da die Wahrung der Anonymität eine ausreichend große Menge an Personen (z.B. mindestens zehn) erfordert und eine Reidentifizierung ohne großen Aufwand möglich zu sein scheint.

### 4.6.4 Gutachtenfälle des Deutschen Hörzentrums

Von 103 Gutachten des Deutschen Hörzentrums, die sich mit Hörschädigung bei Autounfällen befassen, konnte in nur einem Fall eine eindeutige Zuordnung zwischen Airbagauslösung und Hörschädigung erfolgen. In diesem Fall geschah eine Airbagauslösung (Fahrerairbag) im stehenden Fahrzeug durch einen im Fahrzeuginnenraum arbeitenden Mechaniker, der nach Aktenlage durch einen Fehler in einem elektronischen Prüfgerät den Airbag auslöste. Der Fahrerairbag streifte dabei den Kopf des Mechanikers und verursachte einen unverzüglich einsetzenden, deutlich wahrnehmbaren Hörverlust mit Schwindel. Ein anschließend sofort durchgeführtes Audiogramm in der Klinik zeigte eine erhebliche Hörschädigung, welche sich nach Gabe von Kortison über mehrere Tage wieder etwas zurückbildete.

In fünf der 103 Fälle wurde das Gutachten aufgrund der subjektiven Einschätzung der Geschädigten durchgeführt, dass Airbagzündung und Hörschädigung sich bedingen. Bei diesen Fällen konnte kein Zusammenhang zwischen Airbagzündung und Hörstörung nachgewiesen werden. Da das Audiogramm keine Anzeichen für ein Knalltrauma zeigte, konnte keine Verknüpfung zwischen Airbagzündung und Hörschaden hergestellt werden. Außerdem fehlten Vergleichswerte und die Audiometrie wurde nicht binnen weniger Stunden nach dem Knallereignis durchgeführt.

## 4.7 Online-Umfrage

Zusätzlich zur Analyse der GIDAS-Unfalldaten wurde eine Online-Umfrage durchgeführt, mit dem Ziel Verletzungen durch eine Airbagauslösung zu analysieren. Hierbei wurden Unfallbeteiligte in Fahrzeugen mit Airbags gebeten an der Umfrage teilzunehmen. Auf die Umfrage wurde von verschiedenen Webseiten verwiesen, um eine möglichst hohe Zahl von Teilnehmenden zu erzielen.

Die Umfrage wurde auf den Internetseiten der Projektbeteiligten (TU Berlin, MHH und BAST) platziert. In Foren, in denen sich Nutzende über Automobiltechnik bzw. Foren in denen sich Unfallopfer austauschen, wurden eigens Themen eröffnet in denen die Nutzenden der Plattformen um die Teilnahme gebeten wurden. Zusätzlich wurden auf Facebook-Seiten mit automobilen Bezug und großer Reichweite Beiträge mit dem Link zur Umfrage gesetzt.

### 4.7.1 Inhalt der Umfrage

Die Umfrage beinhaltete zunächst Fragen in denen Informationen über das Fahrzeug, in dem der Unfallbeteiligte sich befand, gesammelt wurden. Beispielsweise allgemeine Informationen zu Fahrzeugtyp, Hauptanstoßrichtung, Schäden am Fahrzeug sowie Mitfahrende im Fahrzeug wurden erhoben. In einem zweiten Schritt wurde nach Vorhandensein von Airbags und deren Auslösung bei der Kollision gefragt. Ferner wurden u.a. persönliche Daten wie Alter, Geschlecht und Verletzungsschwere erfragt sowie ob ein Airbag die jeweilige Person geschützt hat, ob ein Airbag die jeweilige Person verletzt hat und ob ein Airbag nicht gezündet hat, der vor einer Verletzung bewahrt hätte. Im letzten Schritt wurde dem Umfrageteilnehmenden ermöglicht Daten zur Verfügung zu stellen beispielsweise Fotos oder Unfallberichte. Die Daten konnten direkt hochgeladen oder per E-Mail oder postalisch an die MHH geschickt werden.

### 4.7.2 Analyse der Umfrageergebnisse

Teilgenommen haben 45 Fahrerinnen und Fahrer von Fahrzeugen mit Airbags, 20 Beifahrerinnen und Beifahrer sowie 18 Personen, die im Fond des verunfallten Fahrzeugs saßen.

Die Analyse der Umfrageergebnisse wurde differenziert nach Hörschäden und nach anderen Verletzungen sowie nach Sitzposition im Fahrzeug durchgeführt.

Von den insgesamt 45 Fahrerinnen und Fahrern waren 16 Fälle mit Airbagauslösung. Davon gaben zehn an keine Hörschäden nach der Auslösung eines Airbags erlitten zu haben (Tab. 4-5). Bei einem Fall gab der Teilnehmende an, einen dauerhaften Hörschaden durch die Auslösung des Frontairbags erlitten zu haben. Sieben Fahrerinnen und Fahrer gaben an einen vorübergehenden Hörschaden erlitten zu haben, wobei dieser in sechs Fällen durch den Frontairbag und in einem Fall durch den Seitenairbag verursacht wurde.

Hörschäden	Vorübergehend	Dauerhaft	Keine
<b>Keine Airbags</b>	0	0	6
<b>Nur Frontairbags</b>	6	1	6
<b>Nur Seitenairbags</b>	1	0	2
<b>Front- und Seitenairbags</b>	0	0	2
<b>Gesamt</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>16</b>

Tab. 4-5: Hörschäden bei Fahrerinnen und Fahrern nach Airbagauslösung

Bei den elf Beifahrerinnen und Beifahrern in der Umfrage (Tab. 4-6) gaben acht Umfrageteilnehmende an, keinen Hörschaden durch eine Airbagauslösung erlitten zu haben. Zwei Teilnehmende erlitten einen vorübergehenden Hörschaden als einmal nur der Frontairbag und einmal nur der Seitenairbag auslöste.

Hörschäden	Vorübergehend	Dauerhaft	Keine
<b>Keine Airbags</b>	0	0	1
<b>Nur Frontairbags</b>	1	0	8
<b>Nur Seitenairbags</b>	1	0	0
<b>Front- und Seitenairbags</b>	0	0	0
<b>Gesamt</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>9</b>

Tab. 4-6: Hörschäden bei Beifahrerinnen und Beifahrern nach Airbagauslösung

Betrachtet man die Verletzungsschwere von Fahrerinnen und Fahrern (Bild 4-33) zeigt sich, dass bei den Umfrageteilnehmenden, bei denen der Frontairbag nicht auslöste, eine geringere Verletzungsschwere (mehr Unverletzte, keine Schwerverletzten) zu verzeichnen war als bei den Fahrerinnen und Fahrern, bei denen der Airbag auslöste. Dies konnte bereits in der Unfalldatenanalyse in Kapitel 4.3 gezeigt werden.

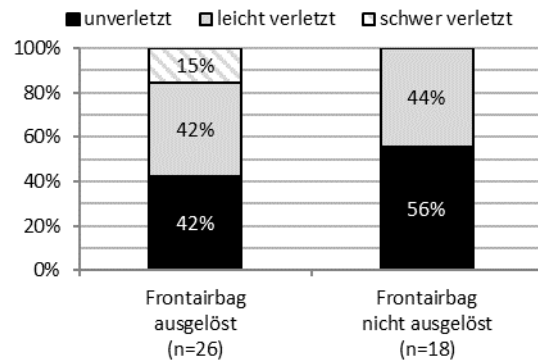


Bild 4-33: Verteilung der Verletzungsschwere bei Fahrerinnen und Fahrern aus der Online-Umfrage

Eine detaillierte Analyse der verletzten Körperteile bei Fahrerinnen und Fahrern, die durch eine Airbagauslösung beeinflusst werden könnten, ist in Tab. 4-7 dargestellt. Verletzungen durch den Frontairbag sind überwiegend an der Haut an den folgenden Körperteilen zu erwarten: Gesicht, Arm und Hand. Die Analyse zeigt, dass bei den 26 Fällen bei denen der Frontairbag auslöste, häufig Verletzungen der Haut im Gesicht und an den oberen Extremitäten zu verzeichnen waren, in drei Fällen auch durch Verbrennungen. Bei den 18 Fahrerinnen und Fahrern, bei denen der Airbag nicht auslöste, sind diese Verletzungsmuster erkennbar seltener zu beobachten. Hier scheint die Frontairbag-auslösung durchaus Verletzungen der Haut an Gesicht, Armen und Händen verursacht zu haben.

Verletzung Körperteil/Art	Anzahl der Verletzungen bei ausgelöstem Fahrerairbag (n=24 Teilnehmende)	Anzahl der Verletzungen bei nicht ausgelöstem Fahrerairbag (n=21 Teilnehmende)
<b>Gesicht: Verbrennungen</b>	2	0
<b>Gesicht: Andere Hautverletzungen</b>	3	1
<b>Arm: Verbrennungen</b>	0	0
<b>Arm: Andere Hautverletzungen</b>	3	1
<b>Hand: Verbrennungen</b>	1	0
<b>Hand: Andere Hautverletzungen</b>	2	1

Tab. 4-7: Verletzte Körperteile bei Fahrerinnen und Fahrern aus der Online-Umfrage mit und ohne Airbagauslösung.

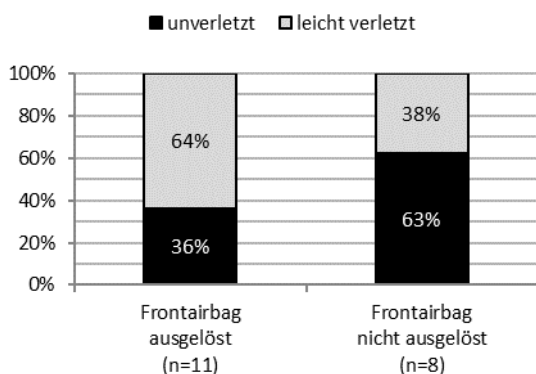


Bild 4-34: Verteilung der Verletzungsschwere bei Beifahrerinnen und Beifahrern aus der Online-Umfrage

Verletzung Körperteil/Art	Anzahl der Verletzungen bei ausgelöstem Beifahrerairbag (n=11 Teilnehmende)	Anzahl der Verletzungen bei nicht ausgelöstem Beifahrerairbag (n=8 Teilnehmende)
<b>Gesicht: Verbrennungen</b>	0	0
<b>Gesicht: Andere Hautverletzungen</b>	0	0
<b>Arm: Hautverletzungen</b>	0	1
<b>Arm: Andere Hautverletzungen</b>	0	0
<b>Hand: Verbrennungen</b>	0	0
<b>Hand: Andere Hautverletzungen</b>	0	0

Tab. 4-8: Verletzte Körperteile bei Beifahrerinnen und Beifahrern aus der Online-Umfrage mit und ohne Airbagauslösung.

Eine vergleichbare Analyse wurde ebenfalls für die Beifahrerinnen und Beifahrer durchgeführt, die an der Umfrage teilgenommen haben. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die Verletzungsschwere bei den Fällen bei denen der Airbag nicht auslöste, geringer ist (Bild 4-34). Bei Fällen mit Airbagauslösung blieben 36 % der Beifahrerinnen und Beifahrer unverletzt, wohingegen bei Fällen ohne Airbagauslösung 63 % der Beifahrerinnen und Beifahrer unverletzt blieben. Betrachtet man die Unfallverletzungen, die auch durch eine Airbagauslösung hervorgerufen sein könnten, so zeigt sich auf Seiten der Beifahrerinnen und Beifahrer kein erkennbarer Einfluss durch

das Auslösen eines Airbags. In Tab. 4-8 ist zu erkennen, dass es nur in einem Fall für den Beifahrer Hautverletzungen im Gesicht und den oberen Extremitäten berichtet worden sind (in diesem Fall ohne Airbagauslösung).

## 4.8 Analyse von NASS Unfalldaten

Die US-amerikanische Unfalldatenbank National Automotive Sampling System Crashworthiness Data System (NASS CDS) beinhaltet eine größere Unfalldatenmenge als GIDAS und aufgrund des Abschleppkriteriums (mindestens eins der beteiligten Fahrzeuge muss aufgrund des Unfalls abgeschleppt worden sein) auch tendenziell schwerere Unfälle als in GIDAS. Allerdings muss beachtet werden, dass die Fahrzeuge für den amerikanischen Markt anderen Zulassungskriterien unterliegen und Ergebnisse nur bedingt auf europäische Verhältnisse übertragen werden können.

Für dieses Projekt wurden Daten der Unfalljahre 2014 und 2015 von Insassen mit bekannter Verletzungsschwere ausgewertet. Hierbei standen Fälle von 308 Frontinsassen in Fahrzeugen mit Erstzulassungsjahr 2001 oder später in Frontalaufprallunfällen zur Verfügung (Hauptaufprallrichtung zwischen 11 und 1 Uhr). Aufgrund der vergleichbarkeit zu den GIDAS-Daten wurden nur Frontalaufprallunfälle analysiert.

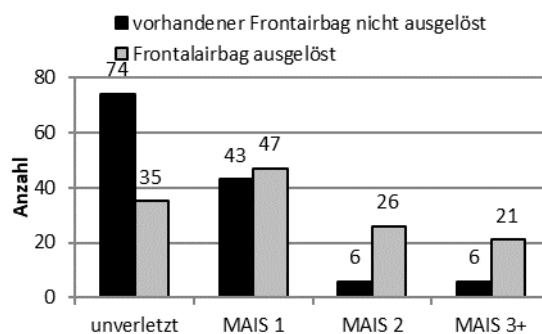


Bild 4-35: Maximale Verletzungsschwere in Abhängigkeit der Frontalairbagauslösung NASS CDS

Die Auswertung der Verletzungsschwere in Abhängigkeit der Airbagauslösung der NASS CDS Frontalaufpralldaten zeigt ein ähnliches Bild wie bei den GIDAS-Daten, vergleiche Bild 4-10 und Bild 4-35. Allerdings fällt auf, dass der Unterschied in der Verletzungsschwere bei Unfällen mit und ohne Airbagauslösung weniger stark ausfällt, als dass es in den GIDAS-Daten beobachtet wurde. Dies lässt sich mit dem bei der NASS-Erhebung angewandten „Tow-away“ Kriterium be-

gründen. Hierdurch werden nur Unfälle aufgenommen, bei dem mindestens ein Fahrzeug aufgrund des Unfalls abgeschleppt werden musste. Hierdurch wird die Stichprobe in Richtung schwerer Unfälle verschoben. Im Zusammenhang mit der Anforderung, dass der Airbag den Insassen auch ohne Gurt schützen soll, ist davon auszugehen, dass die Airbags in den USA bereits bei geringerer Unfallschwere auslösen, als es in Europa der Fall ist. Leider ist nur bei 167 Fällen eine Geschwindigkeitsänderung in den verwendeten NASS CDS angegeben, sodass eine entsprechende Auswertung der Auslöseschwellen nicht sinnvoll erscheint.

### 4.9 Analyse NASS EDR-Daten

Um reale Auslösezeiten von Frontairbags im Unfallgeschehen zu ermitteln, sind NASS Daten von Unfällen mit verfügbaren EDR Daten (Event Data Recorder) der Unfalljahre 2014 und 2015 ausgewertet worden. Hierbei stand ein Kollektiv von 775 Frontairbagauslösungen (503 Fahrer-airbags und 272 Beifahrerairbags) für die Auswertung zur Verfügung.

Die ausgewerteten Airbagzündzeitpunkte nach  $t_0$  zeigen einen Mittelwert von etwa 32 ms. Die Auslösezeit wird kürzer bei höheren Unfallschweren, siehe lineare Trendlinie basierend auf allen Messpunkten in Bild 4-36. Zündzeiten bis zu über 400 ms kamen vor. In 78 Fällen war der Zündzeitpunkt über 50 ms. Diese Anzahl an Zündzeitpunkten über 50 ms entspricht nicht dem aus den Literaturwerten erwarteten Horizont von einer frühestmöglichen Zündung des Airbagsystems. Insgesamt erfolgte in 650 Fällen eine Airbagauslösung innerhalb von 40 ms und in 125 Fällen nach mehr als 40 ms.

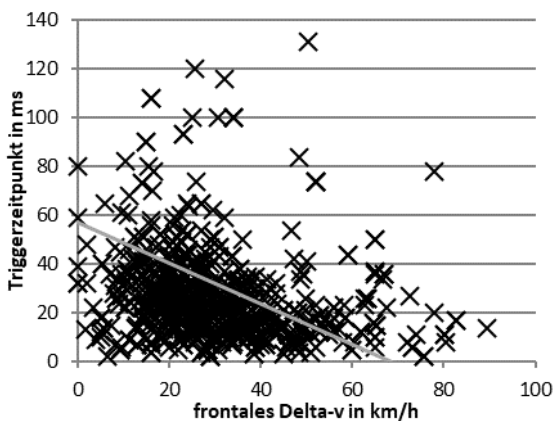


Bild 4-36: Airbagzündzeitpunkte in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsänderung

Ein Vergleich der Verletzungsschwere über alle Fälle in Abhängigkeit der Airbagauslösezeit zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen Auslösezeiten kürzer oder länger als 40 ms, siehe Bild 4-37. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass Fälle mit langer Auslösezeit häufig auch Fälle mit geringer Unfallschwere sind. Sofern nur Fälle mit einem Delta-v von mindestens 40 km/h berücksichtigt werden, steigt das MAIS 3+-Verletzungsrisiko stark an, siehe Bild 4-38.

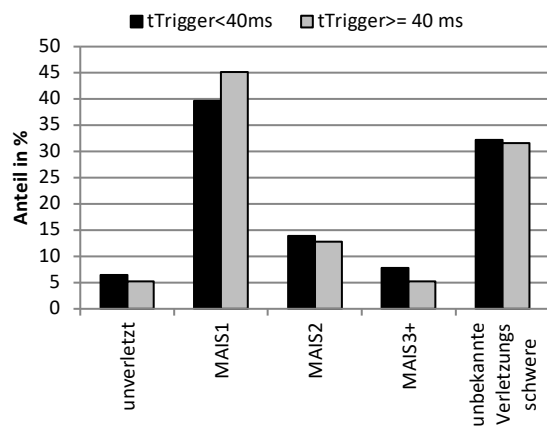


Bild 4-37: Verletzungsschwere in Abhängigkeit der Auslösezeit

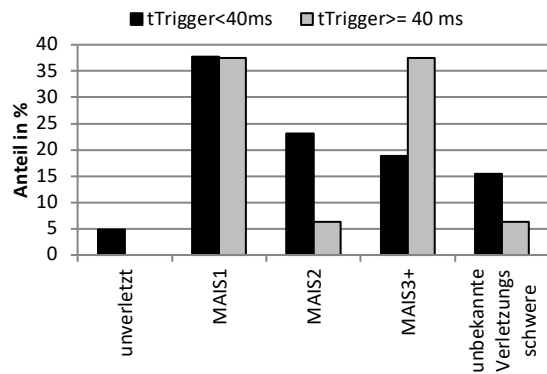


Bild 4-38: Verletzungsschwere in Abhängigkeit der Auslösezeit bei  $\Delta v > 40 \text{ km/h}$

### 4.10 Fazit zur Analyse von Verkehrsunfällen und Unfallbeteiligten

Die Anzahl der im Fahrzeug vorhandenen und ausgelösten Airbags ist in neueren Fahrzeugen größer als in älteren Fahrzeugen. Ab dem Jahr der Erstzulassung 2007 steigt der Anteil der Unfälle, bei denen mehr als zwei Airbags ausgelöst haben, an.

Frontalaufprallairbagauslösungen sind in Einzelfällen bereits bei Geschwindigkeitsänderungen von unter 5 km/h beobachtet worden. Ca. 20 % der ausgelösten Airbags in der GIDAS-Analyse wurden bereits bei Geschwindigkeitsänderungen von unter 17 km/h beobachtet. Während eine generelle Wirksamkeit für die Vermeidung von schweren Verletzungen nachgewiesen werden konnte, zeigt sich ein höheres Verletzungsrisiko für Hautverletzungen (insbesondere Schürfwunden, Prellungen und Verbrennungen an Armen und Händen) sowie Frakturen der Unterarme und Hände in Fällen mit Airbagauslösungen. Insofern ist es wichtig, Airbags nur auszulösen, wenn die Unfallschwere ein entsprechendes Potential zur Verletzungsvermeidung erwarten lässt und nicht die durch den Airbag induzierten Verletzungen überwiegen. Sofern in seltenen Fällen hohe Verletzungsschwere ohne Airbag-auslösung beobachtet wurden, handelte es sich entweder um Fehlkodierungen, unangeschnallte Insassen oder hoher Verletzungsschwere trotz geringer Unfallschwere. Insofern kann basierend auf den aktuellen Daten davon ausgegangen werden, dass eine schädliche Nichtauslösung der Airbags wenn überhaupt, nur in einer kleinen Anzahl von Fällen relevant ist. Basierend auf US-amerikanischen Unfalldaten mit vorhandenen EDR-Protokollen konnte nachgewiesen werden, dass bei Unfallschweren mit einer Geschwindigkeitsänderung von mehr als 40 km/h eine späte Airbagaktivierung zu einem erhöhten MAIS 3+-Verletzungsrisiko führt.

Hörschädigungen wurden in einer sehr kleinen Anzahl von Fällen berichtet. Basierend auf den GIDAS-Daten traten diese insbesondere bei geringer Unfallschwere auf.

In Bezug auf den Seitenaufprall deutet sich an, dass eine Kombination aus Thoraxairbag und Curtainairbag das höchste Schutzpotential insbesondere für Kopf und Thorax bieten.

## 5 Unfallrekonstruktion und akustische Messungen

### 5.1 Unfallrekonstruktion

Auf Basis der Einzelfallanalyse (siehe Kapitel 4.5) aus den GIDAS-Unfalldaten wurden zwei Unfälle mittels Vollfahrzeugversuchen nachgestellt. Folgende Parameter wurden bei der Auswahl berücksichtigt:

- Insassen waren gegurtet

- Insassen waren jünger als 55 Jahre
- Verletzungen der Insassen können durch Messungen mit Hybrid III Dummy dargestellt werden
- Unfallszenario ist versuchstechnisch umsetzbar mit Crashanlage der TU Berlin
- Fahrzeuge sind verfügbar auf deutschem Markt
- Die gewählten Unfälle sind nicht vom gleichen Typ

Es wurden zwei Unfälle gewählt in denen die Fahrzeuge mit ihren jeweiligen Unfallpartnern eine schlechte strukturelle Interaktion hatten. Der erste Fall ist ein frontaler Baumaufprall (siehe Kapitel 4.5.5), bei dem ein Seat Leon mit 50 km/h mit einem Baum kollidierte. Der Baum wurde ca. 10 cm links außerhalb der Mitte getroffen, sodass beide Längsträger nicht beuschlagt wurden (Bild 5-1). Dieser Fall wurde gewählt, da der Insasse eine Rippenserienfraktur erlitt (AIS 5). Im Gegensatz dazu zeigen die Ergebnisse der Euro NCAP Bewertung dieses Fahrzeugtyps, dass die Brustbewertung eine gute Bewertung erzielt hat [EURO NCAP, 2005].



Bild 5-1: Unfallfahrzeug des analysierten Unfalls für die erste Unfallrekonstruktion

Der zweite rekonstruierte Unfall ist ein Auffahrunfall mehrerer Beteiligten, bei dem der Frontalaufprall eines Fiat 500 auf einen Skoda Fabia interessant ist (siehe Kapitel 4.5.11). Bei dem Unfall fuhr der Fiat mit einer Geschwindigkeit zwischen 15 und 30 km/h auf den Skoda auf. Durch das Bremsnicken beider Fahrzeuge kam es zu einer Unterfahrsituation, sodass der vordere Querträger des Fiat den hinteren Querträger des Skodas unterfuhr und diese keine Energie umsetzen konnten. Interessant ist der Fall, weil trotz der geringen Geschwindigkeit die Airbags auslösten und der Fahrer ein Schädel-Hirn-Trauma erlitt.



Bild 5-2: Unfallfahrzeuge des analysierten Unfalls für die zweite Unfallrekonstruktion

Die Unfälle werden im ersten Schritt nah am eigentlichen Unfallgeschehen rekonstruiert, d.h., dass das Rückhaltesystem vom fahrzeugeigenen Steuergerät ausgelöst wird. Nach dem ersten Versuch wurden die Ergebnisse analysiert und mittels veränderter Zündstrategie des Rückhaltesystems die kritischen Dummymesswerte oder Airbaginteraktionen zu minimieren.

Im Folgenden werden die durchgeführten Unfallrekonstruktionen vorgestellt und die Ergebnisse mit initialer und optimierter Zündstrategie gegenübergestellt.

### 5.1.1 Unfallrekonstruktion mit Seat Leon Unfallbeschreibung

Basis der durchgeführten Unfallrekonstruktion ist ein Unfall bei dem ein Seat Leon (2009) frontal mit einem Baum kollidiert. Das Fahrzeug kam vor einer Linkskurve nach rechts von der Fahrbahn in den Seitenstreifen ab und kollidierte schließlich frontal mit dem im Bereich der Linkskurve rechts am Fahrbahnrand befindlichen Baum. Spuren die darauf hinweisen, dass der Fahrer das Fahrzeug wieder auf die Straße zurückführen wollte, wurden nicht festgestellt. Die Aufprallgeschwindigkeit wurde von mehreren Experten auf 45 bis 50 km/h eingeschätzt.

Der Fahrer erlitt schwere Verletzungen (MAIS 4). Folgende Verletzungen traten auf:

- Schädel- / Hirntraum 1. Grades (AIS 1)
- linksseitige Schlüsselbeinfraktur (AIS 2)
- beidseitige Rippenreihenfraktur (AIS 5)
- Fraktur im 3. Lendenwirbelkörper (AIS 3)
- Milzkontusion (AIS 2)
- Leberkontusion (AIS 2)

#### Versuchsaufbau Unfallrekonstruktion Seat Leon

Es wurde ein baugleiches Fahrzeug für den Versuch verwendet mit den Eigenschaften laut Tab. 5-1. Bei dem Fahrzeug wurde der Beifahrersitz ausgebaut, um ein Kameragestell zu installieren. Alle Seitenairbags wurden mittels Widerständen elektronisch ersetzt, allerdings nicht ausgebaut. Der Beifahrerairbag wurde mittels Schlüsselschaltung deaktiviert. Die Sitzerk-

nungsmatte aus dem Beifahrersitz musste weiterhin im Fahrzeug bleiben. Somit wird sichergestellt, dass nur der Fahrerairbag vom fahrzeugeigenen Airbagsteuergerät gezündet wird. Im Gegensatz zu den Unfalldaten wird in der Rekonstruktion die Zündung des Beifahrerairbags unterdrückt, da im Entfaltungsbereich des Airbags Messtechnik und eine Kamera installiert wurde, außerdem kann so bei der akustischen Messung (siehe Kapitel 5.2) der Pegel des Fahrerairbags isoliert betrachtet werden.

Hersteller	Seat
Modell	Leon
Typ	1P
Erstzulassung	2008
Hubraum	1798 cm <sup>3</sup>
Leistung	118 kW
Motorcode	BZB
Kraftstoffart	Benzin
Getriebe	Schaltgetriebe
Masse (Versuchsfertig <sup>2</sup> )	1370 kg
Radlast vorne links in	431 kg
Radlast vorne rechts in	409 kg
Radlast hinten links in	267 kg
Radlast hinten rechts in	263 kg

Tab. 5-1: Fahrzeugdaten des Seat Leon für die Unfallrekonstruktion

Die Aufprallgeschwindigkeit des Fahrzeugs wird auf 50 km/h gesetzt, dies ist die obere Grenze der befragten Unfallrekonstruktionsexperten. Der Baum (37 cm gemäß GIDAS-Kodierung und 42 cm in Aufprallhöhe gemäß Nachvermessung des Laserscans der Unfallstelle) wird dargestellt durch ein Stahlrohr mit dem Außendurchmesser von 40 cm. Der Offset des Pfahles beträgt 9,5 cm.

Im Fahrzeug wurden drei dreiaxiale Beschleunigungssensoren eingebaut um die Verzögerung der Fahrgastzelle zu messen. Einer wurde auf dem Tunnel vor der Rücksitzbank und die beiden anderen jeweils auf dem Schweller vor der B-Säule platziert. Auf dem Fahrersitz wurde ein Hybrid III 50ste Perzentile Dummy platziert.

<sup>2</sup> Inkl. Messtechnik, Dummy, Kamera, Betriebsflüssigkeiten abgelassen, div. Verkleidungsteile und Zubehör ausgebaut



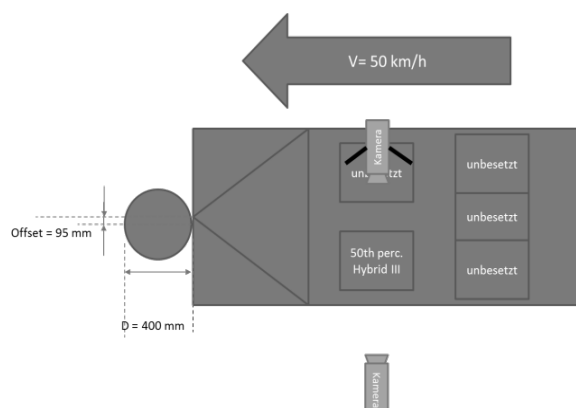


Bild 5-3: Versuchsaufbau Unfallrekonstruktion Seat Leon

Zusätzlich zu den üblichen Messungen für Crashversuche wurden noch akustische Messungen durchgeführt. Einerseits wurde eine Innenraummessung mit einem NTI Audio Analyzer XL2 mit Mikrofon M4216 und eine Außenmessung mit einem Brüel & Kjaer 2250 mit Mikrofon 4189 durchgeführt. Das Mikrofon der Innenraummessung wurde auf den Lenkradmittelpunkt gerichtet ausgehend von dem Kameragestell welches anstatt des Beifahrersitzes installiert war (Bild 5-4).



Bild 5-4: Aufbau der akustischen Innenraummessung

Die Sitzposition des Dummies wurde anhand der Bilder und den Messdaten des Unfallautos vorgenommen. Die Werte in Tab. 5-2 wurden für die Dummypositionierung auf dem Fahrersitz aufgenommen.

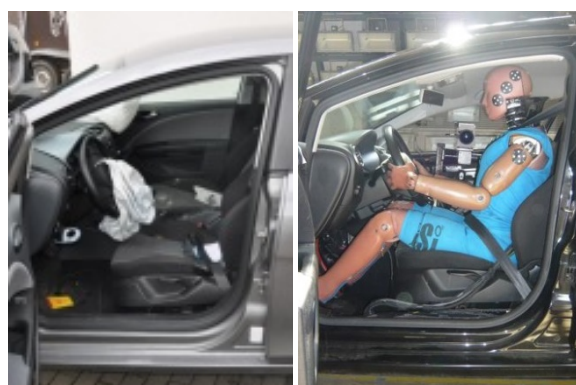


Bild 5-5: Sitzposition des Dummies im Vergleich zum Unfallfahrzeug

Abstand Rückenlehne zu Rücksitzlehne (waagrecht)	75,0 cm
--	---------

Abstand Rückenlehne Rücksitzbank (waagrecht)	27,9 cm
--	---------

Abstand Rückenlehnenoberkante Fahrzeugboden	83,9 cm
---	---------

Sitzschiene Drehrad für Lehnenwinkeleinstellung (senkrecht)	20,0 cm
---	---------

Lehnenwinkel (hintere Kante, oben, außen)	12,9°
---	-------

Sternumwinkel	9,3°
---------------	------

Abstand Sternum Lenkradmitte (Waagrecht)	28,4 cm
--	---------

Abstand Nasenspitze Lenkradmitte	38,6 cm
----------------------------------	---------

Abstand Nasenspitze Lenkradkranz oben	39,4 cm
---------------------------------------	---------

Lenkradneigung	36,1°
----------------	-------

Lenkradposition	Maximal entfernt
-----------------	------------------

Tab. 5-2: Maße für Sitzeinstellung und Dummypositionierung in den Unfallrekonstruktionen mit Seat Leon

## Ergebnisse

Das Fahrzeug der ersten Unfallrekonstruktion hat den Pfahl an der vorgesehenen Stelle getroffen. Die Aufprallgeschwindigkeit lag bei 50,26 km/h. Die Türen des Fahrzeugs ließen sich ohne zusätzlichen Kraftaufwand öffnen, mit Ausnahme der Fahrertür, die nur durch einen erhöhten Kräfteinsatz aufgrund des verbogenen Kotflügels geöffnet werden konnte. Im Fußraum der vorderen Sitzplätze und an anderen Stellen der Fahrgastzelle konnten keine bleibende Deformation festgestellt werden.

Der Vergleich zwischen dem Unfallfahrzeug und dem Fahrzeug der ersten Unfallrekonstruktion zeigt, dass der generelle Unfallablauf vor allem im Hinblick auf die strukturelle Interaktion mit dem Baum bzw. Pfahl gut getroffen wurde. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Rückhaltesystemauslösung ebenfalls den Unfallbedingungen entspricht. Im Vergleich beider Fahrzeuge zeigt sich allerdings, dass der Offset in der Rekonstruktion etwas zu klein eingestellt wurde (Bild 5-6). Empfehlenswert wäre eine Erhöhung um 5 cm um den Unfall besser darzustellen, allerdings wird auf eine Veränderung des Versuchsaufbaus aufgrund der Vergleichbarkeit der Ergebnisse abgesehen.

Das Zerstörungsbild der Fronten im Vergleich zwischen Unfallfahrzeug und Fahrzeug der Unfallrekonstruktion zeigt, dass die gemessene Auf-



prallgeschwindigkeit von 50,26 km/h in der Unfallrekonstruktion zu einer guten Übereinstimmung führte (Bild 5-7).



Bild 5-6: Vergleich der Schadensbilder zwischen Unfallfahrzeug und Fahrzeug nach der Unfallrekonstruktion (Frontansicht)



Bild 5-7: Vergleich der Schadensbilder zwischen Unfallfahrzeug und Fahrzeug nach der Unfallrekonstruktion (Schrägansicht)

Der Zusammenhalt beider Längsträger durch den Querträger konnte in Folge des Unfalls nicht gewährleistet werden. Am linken Längsträger wurde der Querträger herausgerissen. Dies wurde sowohl bei dem Unfallfahrzeug, als auch bei dem Rekonstruktionsfahrzeug beobachtet (Bild 5-8).



Bild 5-8: Querträger wurde vom Längsträger auf der Fahrerseite abgerissen

Der Vergleich zwischen erster und zweiter Unfallrekonstruktion mit dem Seat Leon zeigt, dass der Pfahl bei der zweiten Rekonstruktion etwa 3 bis 7 cm zu weit mittig getroffen wurde (Bild 5-9). Der Vergleich der Beschleunigungskurven zeigt allerdings, dass der Einfluss gering ist und die Ergebnisse beider Versuche vergleichbar sind (Bild 5-10). Die Kurvenverläufe der Fahrzeugbeschleunigung zeigen deutlich die Problematik bei Unfällen mit geringer struktureller Interaktion:

Erst nach 40 ms nach  $t_0$  steigt die Fahrzeugbeschleunigung auf über 20 g und unterhalb von 30 ms ist diese geringer als 10 g. Dies zeigt, dass zu Beginn des Unfalls wenig strukturelle Teile Energie umsetzen und erst mit der Blockbildung der Puls innerhalb von 5 ms von 15 auf über 40 g ansteigt. Dementsprechend spät wird der Unfall vom Steuergerät detektiert und der Airbag gezündet. Nach Auswertung der Videodaten reißt der Airbag die Abdeckung bei 44 ms auf, auch der Gurtstraffer wirkt erst ab der 43. Millisekunde. Für den zweiten Versuch wurde auf Basis der Dummy-Airbag-Interaktion, die im Folgenden analysiert wird, ein Zündzeitpunkt von 15 ms für den Gurtstraffer und 20 ms für den Fahrerairbag festgelegt.



Bild 5-9: Vergleich der Schadensbilder beider Seat Leon nach der Unfallrekonstruktion

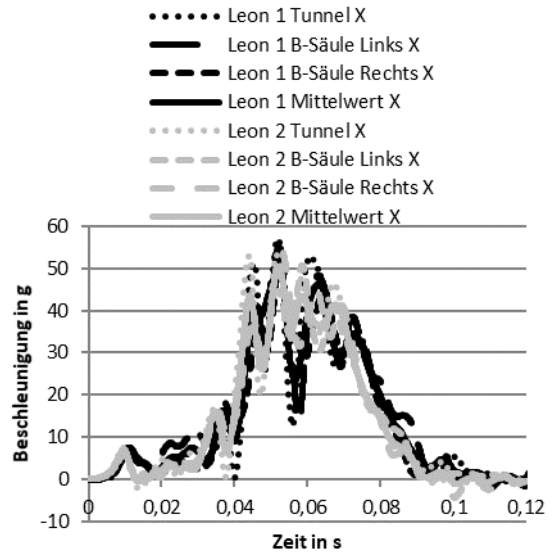


Bild 5-10: Fahrzeugverzögerung vergleichend zwischen beiden Versuchen mit Seat Leon

Aus den Videodaten lässt sich erkennen, dass die Relativbewegung zwischen Dummy und Fahrzeug bei 20 ms einsetzt. Bei Versuch 1 reißt der Airbag bei 44 ms die Abdeckung auf und bei Versuch 2 bei 23 ms. Durch die frühere Zündung steht der Airbag im Versuch zwei bei 45 ms und hat während seiner Entfaltungsphase keinen Kontakt mit dem Dummykopf und nur kurzzeitigen Kontakt mit der Brust des Dummys. Durch die späte Zündung im Versuch 1 entfaltet sich der Airbag in die Vorverlagerungsbewegung des Dummys und der Kontakt zwischen Dummy und Airbag bleibt während der Entfaltung erhalten.

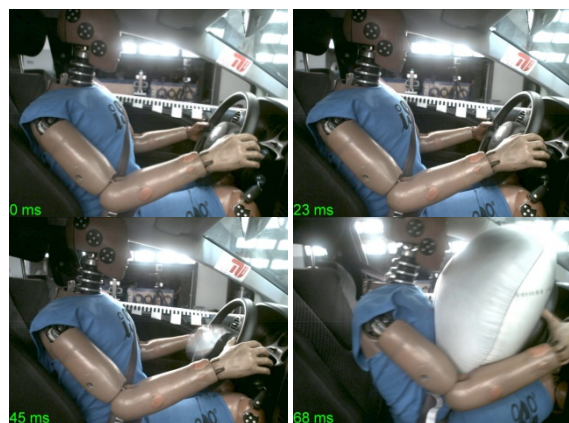






Bild 5-11: Vergleich der Interaktion zwischen Dummy und Airbag bei der Unfallrekonstruktion mit dem Seat Leon bei unterschiedlichen Zündzeitpunkten (oben: Zündzeitpunkt vom fahrzeugeigenem Steuergerät bei ca. 40 ms, unten: Zündung des Airbags bei 20 ms getriggert)

Bei den Dummybelastungen zeigt sich, dass nur vereinzelt Werte die zum Vergleich herangezogenen *Higher Performance Limits* nach EURO NCAP (2015) verletzt wurden. In Tab. 5-3 sind die analysierten Verletzungskriterien vergleichend aufgelistet. Bei dem Versuch 1 wurde die Halskraft in Zugrichtung überschritten mit einem Wert von 1,9 kN. Hervorzuheben ist die Brusteindrückung, die mit 53 mm auch das *Lower Performance Limit* von 42 mm verletzt. Bei Verletzung des *Lower Performance Limits* steigt das Risiko einer Verletzung  $\geq$  AIS 4 auf 25 % [EURO NCAP, 2015].

	Leon 1	Leon 2	Euro NCAP higher performance Limit [EURO NCAP, 2015]
<b>Kopf <math>a_{3ms}</math> (res.)</b>	54,6 g	48,40 g	72 g
<b>HIC<sub>15</sub></b>	291	234	500
<b>Halskraft X (max.)</b>	-510 N	-722 N	1,1 kN @ 45 ms
<b>Halskraft Z (max.)</b>	1882 N	1228 N	1,1 kN @ 60 ms
<b>Halsmoment Y (max.)</b>	35,5 Nm	48,1 Nm	42 Nm
<b>Brust <math>a_{3ms}</math> (res.)</b>	53,1 g	47,8 g	n/a
<b>Brusteindrückung (max.)</b>	53,0 mm	45,6 mm	22 mm

<b>Becken <math>a_{3ms}</math> (res.)</b>	62,1 g	63,2 g	n/a
<b>Femurkraft Links (max.)</b>	-0,905 kN	1,362 kN	3,8 kN
<b>Femurkraft rechts (max.)</b>	-2,077 kN	-3,876 kN	3,8 kN

Tab. 5-3: Auswertung der Verletzungskriterien beider Versuche mit Seat Leon vergleichend zu den Euro NCAP Higher Performance Limits

Der Vergleich zwischen Versuch 1 und 2 zeigt eine leichte Verbesserung bei den Kopfwerten. Bei den Halswerten steigt das maximale Moment auf 48,1 Nm über das *Higher Performance Limit*. Die Brustbelastung sinkt leicht, allerdings verletzt der Wert der Brusteindrückung mit 45,6 mm noch immer das *Lower Performance Limit*. Die Beckenbelastung bleibt annähernd gleich. Die Femurkräfte zeigen eine Verschlechterung, die beim rechten Femur über das *Higher Performance Limit* steigt. Es ist anzunehmen, dass die unteren Extremitäten interagiert haben mit dem Armaturenbrett oder der Pedalerie und sich beispielsweise verkantet haben.

Bei der Analyse des Verlaufs der Kopfbeschleunigung zeigt sich, dass bereits ab 25 ms im Versuch 2 Beschleunigungen in X- und Z-Richtung auftreten, diese entstehen wahrscheinlich durch die Wirkung des Gurtstrafers (Bild 5-12). Ab ca. 70 ms beginnt bei beiden Versuchen die Rückhaltung durch den Airbag. Der Maximalwert der resultierenden Kopfbeschleunigung ist im zweiten Versuch geringer. Aus den Unfalldaten ist bekannt, dass der Insasse ein Schädelhirntrauma 1. Grades erlitt, anhand der Versuchsdaten konnte dieser weder bestätigt, noch entkräftigt werden.

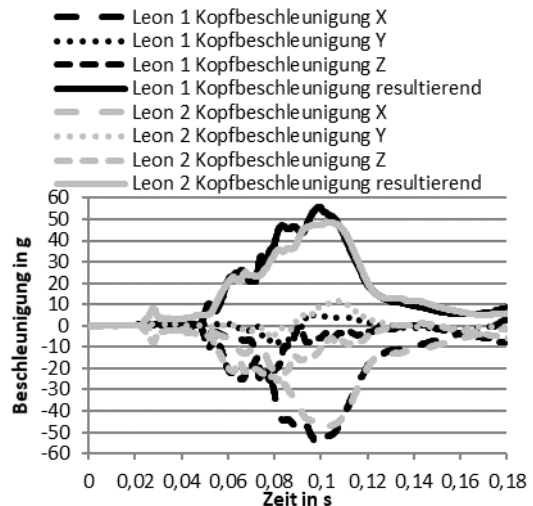


Bild 5-12: Kopfbeschleunigungsverläufe beider Versuche mit Seat Leon

Der Verlauf der Brusteindrückung zeigt ebenfalls deutliche Unterschiede. Hier steigt bei dem zweiten Versuch die Brusteindrückung zwischen 20 und 25 ms auf 8 mm durch die Wirkung des Gurtstraffers (Bild 5-13). Bei dem ersten Versuch bleibt die Brusteindrückung bis zu 40 ms bei null und steigt danach an. Zwischen 50 und 70 ms haben die Brusteindrückungsverläufe ähnliche Verläufe, da hier nur der Gurt an der Rückhaltung beteiligt ist. Danach zeigt sich ein flacherer Anstieg bei Versuch 2 durch die bessere Interaktion mit dem Airbag.

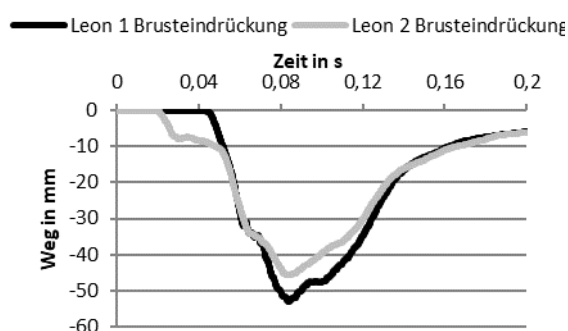


Bild 5-13: Brusteindrückungsverläufe beider Versuche mit Seat Leon

## Fazit zur 1. Unfallrekonstruktion

Die Brustverletzungen des Unfallbeteiligten konnten mit den Versuchen bestätigt werden. Es wurde festgestellt, dass die Auslösung des Rückhaltesystems bei dem untersuchten Unfall sehr spät geschah. Anhand des zweiten Versuchs mit veränderten Zündzeitpunkten konnte die Brusteindrückung verringert werden, trotzdem blieb die Brusteindrückung auf einem Niveau mit hohem Verletzungsrisiko.

### 5.1.2 Unfallrekonstruktion mit Fiat 500

#### Unfallbeschreibung

Basis der zweiten Unfallrekonstruktion ist der Einzelfall aus Kapitel 4.5.11, bei dem ein Fiat 500 dem bremsenden Skoda Fabia auffuhr. Die Aufprallgeschwindigkeit lag laut verschiedener Unfallrekonstruktionsexperten zwischen 15 und 30 km/h. Bei dem Unfall lösten Fahrer-, Beifahrer- und Knieairbag des Fahrers aus. Auf der Beifahrerseite war kein Knieairbag verbaut. Fahrer- und Beifahrerairbag sind im Fiat 500 zweistufig ausgelegt.



Bild 5-14: Unfallfahrzeug Fiat 500

Durch das Bremsnicken beider Fahrzeuge kam es zu einer Unterfahrsituation, sodass der vordere Querträger des Fiat den hinteren Querträger des Skodas unterfuhr und die Querträger beider Fahrzeuge keine Energie umsetzen konnten.

Der 20 Jahre alte Fahrer des Fiat 500 erlitt folgende Verletzungen:

- Wirbelsäulenprellung (AIS 1)
- Thoraxprellung (AIS 1)
- Gehirnerschütterung (AIS 1)
- Läsion des Plexus brachialis (AIS 2)

#### Versuchsaufbau

Für die Unfallrekonstruktion wurden baugleiche Fahrzeuge für die Versuche verwendet mit den Eigenschaften laut Tab. 5-4. Bei dem Fiat wurden alle Seitenairbags mittels Widerständen elektronisch ersetzt, allerdings nicht ausgebaut. Somit wird sichergestellt, dass nur der Fahrerairbag, Knieairbag des Fahrers und Beifahrerairbag vom fahrzeugeigenen Airbagsteuergerät gezündet wird.

Die Fahrzeuge fuhren ohne Offset mittig aufeinander. Der Skoda stand mit angezogener Handbremse und wurde von dem Fiat mit 35 km/h angefahren. Da dieser Unfall nah an der Airbagauslöseschwelle stattfand, wurde eine höhere Geschwindigkeit gewählt, um die Zündung der Airbags sicherzustellen. Das Bremsnicken und daraus resultierende Unterfahren wurde durch Fahrwerksmanipulation am Skoda realisiert. Das Fahrwerk des Fiats blieb unverändert, da die Fahrhöhe des Fiats durch den Antrieb der Fahrzeuge auf der Crashanlage nicht verringert werden durfte. Durch die Fahrwerksmanipulation konnte die Unterkante des Querträgers des Skoda Fabia auf eine Höhe von 52,5 cm über dem Boden gebracht werden. Die Oberkante vom Querträger des Fiat 500 hatte eine Höhe von 52 cm (Bild 5-15).

Hersteller	Fiat	Skoda
Modell	500	Fabia
Typ	312	5J
Erstzulassung	2008	2009

Hubraum	1242 cm <sup>3</sup>	1198 cm <sup>3</sup>
Leistung	51 kW	44 kW
Kraftstoffart	Benzin	
Getriebe	Schaltgetriebe	
Masse (Versuchsfertig)	1121kg	1201 kg
Radlast vorne links	349 kg	351 kg
Radlast vorne rechts	320 kg	366,5 kg
Radlast hinten links	225,5 kg	260,5 kg
Radlast hinten rechts	226,5 kg	223 kg

Tab. 5-4: Fahrzeugdaten der Versuchsfahrzeuge für die Unfallrekonstruktion mit Fiat 500



Bild 5-15: Fahrwerksmanipulation am Skoda Fabia zur Darstellung des Bremsnickens beider Fahrzeuge

Im Fahrzeug wurden drei dreiaxiale Beschleunigungssensoren eingebaut um die Verzögerung der Fahrgastzelle zu messen. Einer wurde auf dem Tunnel vor der Rückbank und die beiden anderen jeweils auf dem Schweller vor der B-Säule. Auf den vorderen Sitzplätzen wurde jeweils ein Hybrid III 50ste Perzentile Dummy platziert.

Auch bei der Unfallrekonstruktion mit dem Fiat wurden akustische Messungen vorgenommen. Die gleichen Mikrofone wie in der Unfallrekonstruktion mit dem Seat Leon wurden genutzt, allerdings wurde das Mikrofon M4216 mit dem NTI Audio Analyzer XL2 an einem Gestell an der Fahrertür befestigt (Bild 5-16).



Bild 5-16: Gestell zur Aufnahme des Akustikmessgerätes an der Fahrertür des Fiat 500

Die Sitzposition des Dummies wurde anhand der Bilder und den Messdaten des Unfallautos vorgenommen (Bild 5-17). Die Werte in Tab. 5-5 wurden für die Dummypositionierung aufgenommen.



Bild 5-17: Sitzeinstellung und -position der Dummies im Vergleich zu Bildern vom Unfallfahrzeug

## Ergebnisse

Das Fahrzeug der ersten Unfallrekonstruktion hat den Skoda Fabia an der vorgesehenen Stelle getroffen. Die Aufprallgeschwindigkeit lag bei 35,63 km/h. Die Türen des Fahrzeugs ließen sich öffnen ohne zusätzlichen Kraftaufwand. Die Fahrgastzelle und der Fußraum des Fiat zeigten keine bleibende Deformation.

Der Vergleich zwischen dem Unfallfahrzeug und dem Fahrzeug der ersten Unfallrekonstruktion zeigt, dass die Beschädigungen an den Fahrzeugen aus der Rekonstruktion größer sind, was darauf schließen lässt, dass die Kollisionsgeschwindigkeit im Unfall geringer als 35 km/h war (Bild 5-18). Trotz dieser Differenz wird der zweite Versuch ebenfalls mit 35 km/h durchgeführt, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.



	Fahrersitz	Beifahrersitz
<b>Abstand Rückenlehne zu Rücksitzlehne (waagrecht)</b>	52,1 cm	43,8 cm
<b>Abstand Rückenlehne Rücksitzbank (waagrecht)</b>	19,7 cm	15,0 cm
<b>Lehnenwinkel (hintere Kante, oben, außen)</b>	70°	71°
<b>Abstand Sternum Lenkradmitte / Markierungspunkt I-Tafel</b>	40,3 cm	81,1 cm
<b>Abstand Nasenspitze Lenkradmitte / Markierungspunkt I-Tafel</b>	50,7 cm	37,0 cm
<b>Lenkradneigung</b>	Oberste Position	n/a

Tab. 5-5: Maße für Sitzeinstellung und Dummypositionierung in den Unfallrekonstruktionen mit Fiat 500

Für den zweiten Versuch wurde der Skoda Fabia mit einem neuen hinteren Querträger und einer Stoßstangenverkleidung repariert, wobei die Höhe des Querträgers dadurch nicht verändert wurde. Da der Dummy bei dem ersten Versuch auf der Beifahrerseite keine Interaktion mit dem

Airbag hatte und die Vorverlagerung des Dummys auf der Fahrerseite eine Interaktion mit dem Lenkrad bei unterdrückter Airbagzündung nicht zu erwarten war, wurde bei der zweiten Rekonstruktion mit dem Fiat 500 die Zündung der Airbags unterdrückt und nur die Gurtstraffer bei 20 ms gezündet. Die Schadensbilder beider Fiat 500 zeigen, dass die bei dem Versuch 1 der Querträger des Fiat geknickt ist, während bei dem Versuch 2 dies nicht der Fall war. Bei dem Unfallfahrzeug ist kein Knicken zu erkennen, allerdings lag hier die Aufprallgeschwindigkeit niedriger. Die Auswertung der Beschleunigungssensoren am Fahrzeug hat gezeigt, dass der Einfluss durch das unterschiedliche Querträgerverhalten gering ist und die Ergebnisse vergleichbar sind (Bild 5-20). Aus dem Verlauf des Beschleunigungssignals zeigt sich, dass die maximale Fahrzeugbeschleunigung mit 17 g gering ist.

Aus den Videodaten in Bild 5-19 des ersten Versuchs mit dem Fiat 500 geht hervor, dass der Airbag erst spät im Unfallgeschehen gezündet wird



Bild 5-18: Vergleich der Schadensbilder zwischen den Fahrzeugen aus dem 1. Versuch (links), 2. Versuch (mitte) und Unfall (rechts)

und bei 67 ms der Fahrerairbag die Lenkradabdeckung aufreißt. Der Beifahrerairbag zündet zeitgleich. Die Vorwärtsbewegung beider Dummies setzt etwa bei 35 ms ein. Da beide Insassen großen Abstand zu dem jeweiligen Airbagentfaltungsraum haben, können sich die Airbags ohne Dummyinteraktion entfalten, nur der Fahrerairbag berührt die Brust des Dummy in der Entfaltungsphase. Bei 100 ms hat der Kopf des Dummies Kontakt mit dem entfaltenen Fahrerairbag und die Rückhaltung durch den Airbag beginnt, allerdings taucht der Dummykopf in diesen nur ca. 50 mm ein. Der Dummy auf der Beifahrerseite hat keinen Kontakt mit dem Airbag.

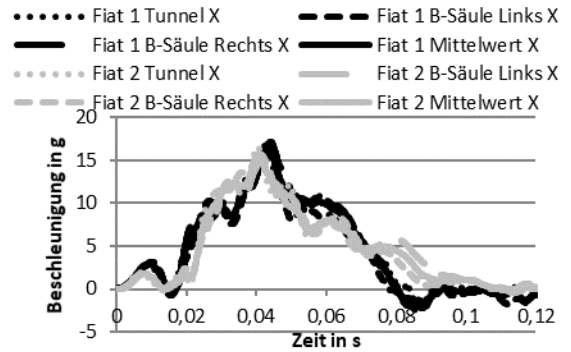


Bild 5-20: Fahrzeugverzögerung aus den Unfallrekonstruktionen mit Fiat 500



Bild 5-19: Versuchsablauf der Unfallrekonstruktionen mit dem Fiat 500: Fahrerseite mit Airbagzündung (links), Beifahrerseite mit Airbagzündung (mitte) und Beifahrerseite ohne Airbagzündung (rechts)



Die Auswertung der Verletzungskriterien zeigt bei den meisten Werten ein geringes Verletzungsrisiko (Tab. 5-6). So sind beispielsweise HIC-Werte zwischen 14 und 22, die Unterschiede zwischen beiden Versuchen und zwischen Fahrer und Beifahrer sind gering, da das Verletzungsrisiko bei den aufgezeigten Größenordnungen sehr gering ist. Gleiches gilt für die Halskräfte. Das Halsmoment ist als einziger Wert bei allen analysierten Fällen mit Werten zwischen 40 und 46 Nm nah an dem *Higher Performance Limit* von 42 Nm. Dieses Phänomen ist zurückzuführen auf die fehlende oder geringe Airbaginteraktion mit dem Dummykopf, sodass der Kopf eine größere Nickbewegung vollziehen kann. Auch hier sind die Unterschiede zwischen den Versuchen und den Sitzpositionen gering. Die Brustbeschleunigung befindet sich ebenfalls auf einem geringen Verletzungsrisikoniveau, allerdings zeigt sich eine Verringerung des  $a_{3ms}$ -Wertes von 21,8 g für Fahrer bzw. 18,4 g für Beifahrer beim ersten Versuch auf 14,9 g für Fahrer und 14,3 g für Beifahrer beim zweiten Versuch. Die Brusteindrückung blieb auf einem ähnlich geringen Verletzungsrisikoniveau bei beiden Versuchen. Bei den  $a_{3ms}$ -Werten der Beckenbeschleunigung und den Femurkräften zeigt sich ein anderes Verhalten bei dem Dummy auf dem Fahrerplatz bei dem ersten Versuch. Während diese Werte bei dem Dummy auf dem Beifahrerplatz und bei dem zweiten Versuch zwischen 0,8 und 1,2 kN Femurkraft und 18 und 22 g Beckenbeschleunigung liegen, ist bei dem ersten Versuch die Beckenbeschleunigung mit 41,8 g doppelt so groß bei dem Dummy auf dem Fahrerplatz und die maximale Femurkraft ist mit -2,4 kN (links) und -1,6 kN (rechts) vom Betrag größer und zeigt mit dem negativen Vorzeichen Druck- anstatt Zugkraft an. Mutmaßlich hat der Dummy auf dem Fahrerplatz im ersten Versuch Kontakt mit dem Knieairbag, dadurch wirkt eine Druckkraft auf den Femur und die Beckenbeschleunigung steigt ebenfalls an. Bei dem Dummy auf dem Beifahrerplatz und dem zweiten Versuch hatten die unteren Extremitäten keinen Kontakt mit dem Armaturenbrett, daher wirkte hier nur eine Zugkraft durch die Trägheit der Beine. Allerdings liegen alle Femurkräfte unterhalb des *Higher Performance Limit* und zeigen somit ein geringes Verletzungsrisiko auf, nach EPPINGER (1999) liegt dieses bei 1 % bei dem höchsten hier gemessenen Wert.

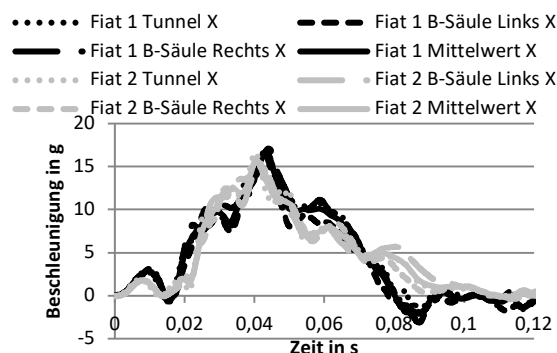


Bild 5-21: Fahrzeugverzögerung aus den Unfallrekonstruktionen mit Fiat 500

	Fiat 1 Fahrer	Fiat 2 Fahrer	Fiat 1 Beifahrer	Fiat 2 Beifahrer
<b>Kopf <math>a_{3ms}</math> (res.)</b>	18,7 g	17,0 g	19,0 g	15,1 g
<b>HIC<sub>15</sub></b>	21	22	16	14
<b>Halskraft X (max.)</b>	495 N	502 N	-515 N	-436 N
<b>Halskraft Z (max.)</b>	576 N	437 N	617 N	704 N
<b>Halsmoment Y (max.)</b>	41 Nm	44 Nm	46 Nm	40 Nm
<b>Brust <math>a_{3ms}</math> (res.)</b>	21,8 g	14,9 g	18,4 g	14,3 g
<b>Brusteindrückung (max.)</b>	16,7 mm	16,8 mm	15,8 mm	20,7 mm
<b>Becken <math>a_{3ms}</math> (res.)</b>	41,8 g	19,1 g	22,1 g	18,1 g
<b>Femurkraft links (max.)</b>	-2,44 kN	0,815 kN	1,26 kN	1,119 kN
<b>Femurkraft rechts (max.)</b>	-1,51 kN	0,834 kN	1,14 kN	0,864 kN

Tab. 5-6: Verletzungskriterien aus den Unfallrekonstruktionen mit Fiat 500

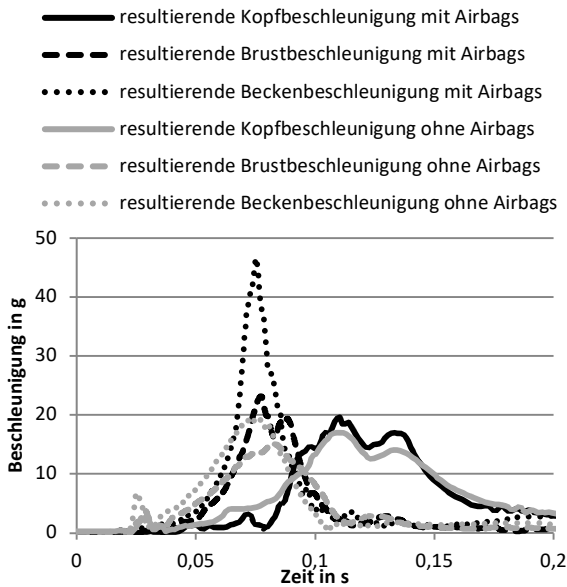


Bild 5-22: Resultierende Beschleunigungen der Dummydaten des Fahrerplatzes beider Versuche mit Fiat 500

In der Analyse der Kurvenverläufe der einzelnen Sensoren zeigt sich vor allem der Einfluss des früher gezündeten Gurtstraffers. In Bild 5-22 sind resultierende Beschleunigungsverläufe von Kopf, Brust und Becken für den Dummy auf der Fahrerseite dargestellt. Der erste Peak von bis zu 5 g bei 25 ms ist nur bei den Kurvenverläufen des zweiten Versuchs vorhanden und ist zeitlich kongruent zu der Wirkung des Gurtstraffers in den Videodaten. Dieses Verhalten ist auch in den Kurvenverläufen der Brusteindrückung zu sehen (Bild 5-23).

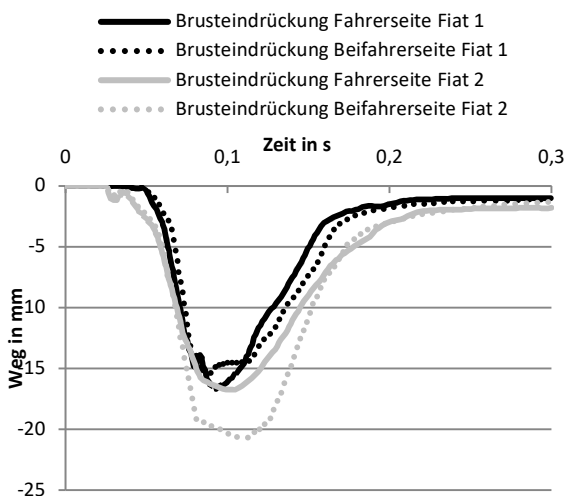


Bild 5-23: Brusteindrückungsverläufe aus den Fiat 500 Unfallrekonstruktionen

## Fazit zur 2. Unfallrekonstruktion

Es konnten mit den durchgeführten Rekonstruktionsversuchen nicht alle Verletzungen des Fahrers des Unfallfahrzeugs durch Dummymessungen bestätigt werden. Trotz höher gewählter Aufprallgeschwindigkeit lassen die Kopfbelastungswerte kein Schädel-Hirn-Trauma (SHT) erwarten. Es wäre denkbar, dass das SHT diagnostiziert wurde, um eine sichere Begründung für eine stationäre Beobachtung des Patienten vorweisen zu können, da eine Vergütung einer stationären Behandlung der Nervläsion möglicherweise durch die Krankenkasse abgelehnt worden wäre. Weitere Nachforschungen bei dem Fahrer ergaben, dass dieser sicher angeschnallt war, jedoch keine eigenen Informationen über das Vorliegen eines Schädelhirntraumas hatte.

Trotz der Divergenz der Unfallschwere zwischen Versuchs- und Unfallfahrzeug und der Unterschiede zwischen Verletzungen und Dummymesswerten konnte durch diese Versuchsreihe gezeigt werden, dass die Zündung der Airbags in diesem Fallbeispiel die Schutzwirkung für die Insassen nicht verbessert hat.

## 5.2 Akustische Messungen

In Kapitel 3.4.2 wurde gezeigt, dass es für das akustische Ereignis der Airbagzündung wenig systematische Versuchsreihen gab. Im Rahmen dieses Projekts werden umfangreiche akustische Messungen bei verschiedenen Airbagzündungen durchgeführt, um das Risiko von Hörschädigungen bewerten zu können.

Einerseits werden bei den Unfallrekonstruktionen zusätzlich zu den üblichen Messungen mit Dummym Mikrofone installiert, um während des Crashes Geräusche aufzunehmen. Andererseits werden die Airbags auch separat vom Crashgeräusch als statischer Versuch analysiert.

### 5.2.1 Ziele der akustischen Messungen

Die in Kapitel 3.4.2 erörterten Probleme und fehlenden systematischen Studien zu Hörschädigungen durch Airbagzündung zeigen, dass folgende gehörbezogene Fragestellung im Rahmen des Projektes beantwortet werden sollte:

- Was ist der Grund für ein bislang nur sporadisches Auftreten von Airbag-Knalltraumata?

In den letzten 10 bis 15 Jahren kommen zunehmend mehrstufige Airbags zum Einsatz, die sich

in ihrer Entfaltung an die Schwere des Unfalls anpassen und somit ggf. andere Pegelspitzen produzieren als Airbags der vorangegangenen Generationen. Ferner haben heutige Fahrzeuge zunehmend eine große Anzahl an Airbags wohingegen in bisheriger Literatur im Wesentlichen nur Fahrzeuge mit 1 bis 2 Airbags untersucht wurden. Hieraus ergaben sich die folgenden Fragestellungen:

- Ist der Schallpegel moderner Airbagsysteme noch vergleichbar mit den Werten früherer Generationen? Wie ist die Innenohrbelastung bei modernen Fahrzeugen mit mehreren Airbags? Wie verändert sich die Innenohrbelastung bei geschlossenen und offenen Fenstern?

Die aufgestellten Fragestellungen sollen mit Hilfe von verschiedenen Versuchen beantwortet werden. Einerseits wurden dynamische Versuche durchgeführt, bei denen ein akustisches Messgerät während des Crashversuchs im Fahrzeug und ein weiteres außerhalb stationär misst. In einer zweiten Versuchsreihe wurden Airbags einzeln und kombiniert im stehenden Fahrzeug gezündet und mittels einer umfangreichen Mikrofonierung die Pegel erfasst – diese Versuche werden im Folgenden als statische akustische Messungen beschrieben. Hierbei sollen vor allem Unterschiede zur dynamischen Messmethode offengelegt und der Pegelunterschied bei geschlossenen und offenen Fahrzeug analysiert werden.

### 5.2.2 Versuchsaufbau der dynamischen akustischen Messungen

Zur Beantwortung der Fragen wurden im Rahmen von Unfallrekonstruktionen auf der Crashbahn der TU Berlin Schallpegelmessungen durchgeführt. Der Versuchsaufbau vergleichend zu Versuchsreihen aus Literaturdaten unterscheidet sich vorrangig durch die dynamische Onboardmessung während den Unfallrekonstruktionen. Zusätzlich wurden diese mit Messungen von Airbagzündungen mit stehenden Fahrzeugen verglichen. Hierzu wurde in allen Versuchen im Innenraum der Fahrzeuge das Messsystem XL2 von NTI Audio verwendet gepaart mit dem Klasse 1 Mikrofon M2215, welches speziell für Messungen von sehr hohen Pegeln entwickelt wurde. Als externes Messgerät außerhalb des Fahrzeugs kam ein Brüel & Kjaer 2250 System zum Einsatz. Die mit dem Pegelmesser ermittelten Werte wurden auf den Abstand des Fahrerkopfes zur Lenkradnabe umgerechnet, im Falle der ersten Unfallrekonstruktion mit dem Seat Leon beispielsweise

ein Abstand von 60 cm zwischen Mikrofon und Lenkrad und 40 cm zwischen Ohrposition des Dummies und Lenkrad.



Bild 5-24: Positionierung des B&K Schallpegelmessers als Kontrollinstrument in 3,5 m Abstand zum Fahrzeug

Im freien Feld ist die Berechnung des Schalldruckpegels in Abhängigkeit der Entfernung zur Schallquelle einfach, d.h. wenn es keine reflektierenden Flächen oder Hindernisse gibt, die die Schallausbreitung beeinflussen, gilt das reziproke Abstandsgesetz mit  $p \sim 1/r$  ( $p$ : Schalldruck,  $r$ : Abstand zur Schallquelle). Somit halbiert sich der Schalldruck bei Abstandsverdopplung. Für kurze Abstandsunterschiede ist dieses Gesetz bedingt auch im Auto anwendbar, für größere Abstände, um Schallpegelabschätzungen etwa vom Fahrerairbag für Personen im Fond zu machen, nur bedingt – vor allem wenn keine direkte Sicht zwischen Schallquelle und Empfänger besteht. Zur Überprüfung wurden in den statischen Versuchen (siehe Kapitel 5.2.5) weitere Mikrofone in der Fahrgastzelle positioniert.

Analysiert wurden alle Aufzeichnungen mit dem seit den späten 80er Jahren von PRICE & KALB (1986) entwickelten Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans (AHAH) in der Version von 2013 [PRICE & KALB, 2013]. Dieses Modell berechnet das Risiko für das menschliche Gehör, welches von impulsartigem Lärm ausgeht, etwa Gewehrschüsse. Das Modell wird laut Aussage von PRICE & KALB (2013) seit 2003 auch von der Autoindustrie zur Bewertung von möglichen

Lärmtraumata durch Airbagauslösung verwendet. Entwickelt wurde es ursprünglich, um das Risiko eines Hörverlustes für Soldaten bei der Benutzung von Schusswaffen abschätzen zu können. Der Algorithmus modelliert Schall- bzw. Druckwellen im Freifeld und die Fortsetzung der Ausbreitung sowie Übertragung im Mittel- und Innenohr. Das hochgradig nichtlineare Verhalten des Mittelohres bei hohen Schalldruckpegeln findet in dem Modell Berücksichtigung. Diese Nichtlinearität ist für die Betrachtung von Schalldruckpegeln oberhalb von 130 dB essentiell, da die Schädigung durch hohe Pegel sonst stark überschätzt wird [PRICE & KALB, 2013]. Details zur Funktionsweise des Innenohres finden sich in LEHNHARDT et al. (2001). Zusammengefasst befindet sich im Innenohr, der Cochlea, das sog. Cortische Organ, welches auf der Basilarmembran angeordnet ist. Zum Cortischen Organ gehören Sinneszellen, die sog. Haarzellen, die mit sehr feinen Härchen (Stereozilien) ausgestattet sind, die wiederum mit einer Deckmembran versehen sind. Wird die Basilarmembran durch Schallwellen in Schwingungen versetzt, so verschiebt sich die Deckmembran gegenüber der Basilarmembran und die Zilien werden gebogen. Dadurch wird ein elektrochemischer Prozess in den Sinneszellen ausgelöst, der von dort mit elektrischen Impulsen über Nervenzellen an weiterführende Verarbeitungsstufen im Gehirn führt. Die Auslenkung der Basilarmembran erfolgt frequenzspezifisch, da die Membran eine unterschiedliche Steifigkeit entlang ihres Verlaufs aufweist. Das AHAH-Modell trägt dem Rechnung und unterteilt die Basilarmembran in 23 Segmente, in denen die Auslenkung der Basilarmembran frequenzspezifisch betrachtet wird. Als Ergebnis liefert das Modell die maximale Auslenkung der Basilarmembran in einem der 23 Segmente in  $\mu\text{m}^2$ , genannt Auditory Risk Units (ARU). Je größer die Auslenkung, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung der Membran. Experimente an Säugetieren, vornehmlich Katzen und Chinchillas, und der Vergleich mit vorhandenen Datenbeständen von menschlichen Versuchspersonen aus den 60er und 70er Jahren wurden benutzt, um eine Formel zur Vorhersage des momentanen bzw. unmittelbaren Hörverlusts (Compound Threshold Shift kurz CTS) in Abhängigkeit der Membranauslenkung empirisch zu bestimmen:

$$\text{CTS} = 26,6 * \ln(\text{ARU}) - 140,1.$$

Die Korrelation des berechneten CTS und dem tatsächlich gemessenen Hörverlust betrug 0,94 in den Experimenten von Price [PRICE & KALB,

2013]. Die von Price festgelegte Schwelle für eine bleibende Hörschädigung beträgt 25 dB CTS, unmittelbar nach Schalleinwirkung gemessen, was sicherlich eine vorsichtige Annahme ist, allerdings klinischen Beobachtungen entspricht. Eine verlässliche Vorhersage eines permanenten Hörverlustes (Permanent Threshold Shift kurz PTS) aus dem unmittelbar nach Lärmeinwirkung gemessenen CTS ist bis dato aufgrund fehlender systematischer Datenerhebung nicht möglich und wahrscheinlich auch mit erheblichen interindividuellen Unterschieden behaftet. Bei Tierversuchen an Chinchillas, einem anerkannten Modell zur Untersuchung von lärminduziertem Hörverlust, stellten LIBERMAN & MULROY (1982) fest, dass sich ein unmittelbar nach Lärmeinwirkung gemessener CTS bis max. 40 dB wieder vollständig zurückbilden kann, aber nicht muss. Weitere aktuellere Betrachtungen zu Zusammenhängen zwischen CTS und PTS, welche die Unsicherheiten jedoch nicht auflösen, finden sich in RYAN et al. (2016). Ein CTS von > 25 dB ergibt sich aus der oben genannten Gleichung bei einem ARU-Wert ab 500, sodass Price diese Schwelle für die Möglichkeit des Auftretens eines permanenten Hörverlusts durch das analysierte Schallereignis festgelegt hat. Legt man 40 dB CTS nach LIBERMAN & MULROY (1982) als sichere Schwelle für einen bleibenden Hörverlust an, so ergäbe sich ein ARU-Wert von 868.

Das Modell unterscheidet ferner zwei unterschiedliche Probandenzustände: gewarnt und ungewarnt. Nach einer Literaturrecherche aus PRICE & KALB (2013) und Erkenntnissen der US Army ist es für das Auftreten einer Hörschädigung in Folge eines Schallereignisses entscheidend, ob der Proband mit dem Knall rechnet, oder ob das Schallereignis völlig unerwartet eintritt. Als Beispiel wird hier ein Schießender genannt, der selbst den Abzug einer Waffe betätigt und sich damit im gewarnten Zustand befindet. Beobachtungen zeigen, dass der Schütze selbst weniger Gefahr läuft, ein Knalltrauma zu erleiden, wenn er die Waffe auslöst, im Gegensatz zu umstehenden Personen im gleichen oder gar größeren Abstand zur Waffe. Hintergrund ist die damit möglicherweise verbundene konditionelle Auslösung des Stapediusreflex', welcher aufgrund von Schallereignissen von etwa 90 dB (Reintöne) bzw. 80 dB (Breitbandrauschen) beim normalhörenden Menschen auslöst [LEHNHARDT et al., 2001]. In Folge derartiger lauter Schallereignisse kontrahiert ein Muskel im Mittelohr, welcher über eine mit der Gehörknöchelchenkette verbundene

Sehne das Trommelfell spannt. Das weniger bewegliche Trommelfell reflektiert daraufhin einen größeren Teil des Schalls, anstelle die Schallwellen vollständig über die Gehörknöchelchen weiterzuleiten, wodurch das Innenohr zu einem gewissen Grad geschützt wird. Dieser Mechanismus hat eine Ansprechzeit von 10 bis 15 ms mit maximaler Wirkung nach etwa 35 ms. In Abhängigkeit der akustischen Frequenz kann die Kontraktion des Muskels im gesunden Ohr über mehrere Sekunden anhalten. Bei einer Frequenz von 500 Hz hält die maximale Wirkung über einen Zeitraum von 10 Sekunden an, während bei einer Frequenz von 4000 Hz der maximale Effekt nach etwa 2 Sekunden nachlässt und nach 10 Sekunden bei nahe Null liegt [LEHNHARDT et al., 2001]. Während die Auslösung des Stapediusreflex' durch laute Schallereignisse seit vielen Jahrzehnten unstrittig ist, wurde die konditionelle Aktivierung des Stapediusreflex' noch immer nicht eindeutig nachgewiesen. Das Modell nach PRICE & KALB (2013) sieht jedoch beide Modalitäten vor. So wäre etwa vorstellbar, dass Fahrzeuginsassen, die einen Unfall kommen sehen, sich unbewusst auf diesen vorbereiten, wozu auch eine Kontraktion des Stapediusmuskels (z.B. getriggert durch die Anspannung der Gesichtsmuskulatur) gehören könnte. Im Rahmen dieser Analysen wurden beide Modalitäten verwendet (gewarnt und ungewarnt).

### 5.2.3 Ergebnisse der dynamischen akustischen Messungen der Unfallrekonstruktion mit Seat Leon

Der grundsätzliche Aufbau und Hintergrund des Versuchs wurde in Kapitel 5.1.1 vorgestellt.

Der Unfall wurde auf der Versuchsanlage der TU Berlin zweimal nachgestellt, da unterschiedliche Auslösezeiten des Fahrerairbags untersucht werden sollten. Die Schallpegelmessungen im Fahrzeug liefen bei beiden Versuchen erfolgreich und wurden vom externen B&K Gerät bestätigt, die Messungen sind kohärent und nicht übersteuert. Interessant ist die unterschiedliche Auslösezeit auch für die mögliche Schädigung des Innenohres: So ist es vorstellbar, dass ein später auslösender Airbag für das Gehör weniger gefährlich ist, da bereits vor der Auslösung auftretende Karosseriedeformationen einen ausreichend lauten Schallpegel produzieren könnten, die eine Auslösung des Stapediusreflex' bewirken.

### Erste Rekonstruktion Versuch 1, Auslösezeiten Werkseinstellung



Bild 5-25: Deutlich sichtbare Deformation der Motorhaube, 18 ms nach Pfahlkontakt. Die Schallpegelmessungen im Fahrzeug zeigen hier bereits Werte oberhalb von 134 dB

Das Fahrzeug trifft nach entsprechender Beschleunigung mit 50 km/h auf den Pfahl. Deutliche Deformationen der Motorhaube treten nach spätestens 18 ms auf, die Videodaten der Hochgeschwindigkeitskamera zeigen eine hochgewölbte Motorhaube (Bild 5-25). Die Crashgeräusche sind zu diesem Zeitpunkt bereits oberhalb von 134 dB, so dass laut AHAH Modell der Stapediusreflex sicher auslöst. Angemerkt sei hier bereits, dass dies ein enorm hoher Schwellwert ist – eine Auslösung kann, schon bei Schalldruckpegeln zwischen 80 und 90 dB erfolgen. Nach ca. 45 ms beginnt sich der Airbag zu entfalten mit entsprechend großer Schall- und Druckemission (Bild 5-26). Der Stapediusreflex hat seine Maximalwirkung, deren Aufbau ca. 35 ms benötigt, zu diesem Zeitpunkt noch nicht ganz erreicht, dennoch ist der Schutz bereits derart ausgeprägt, dass eine bleibende Hörschädigung des Innenohres durch den Airbagknall nicht zu erwarten ist (siehe Bild 5-27), der ARU-Wert liegt bei 276 und damit unter der Schwelle von 500. In Anbetracht der ungewarnten Modalität war dieses gute Ergebnis durch den späten Airbagzündzeitpunkt und den Unfallbegleitgeräuschen begründet. Die gewarnte Modalität ergibt in diesem Fall folglich nur einen kleinen Unterschied, der ARU Wert läge hier bei 256,9.





Bild 5-26: Nach 45 ms erfolgt Auslösung des Airbags, in der Folge entstehen Spitzenpegel von bis zu 160 dB, bezogen auf die Ohrposition des Dummys

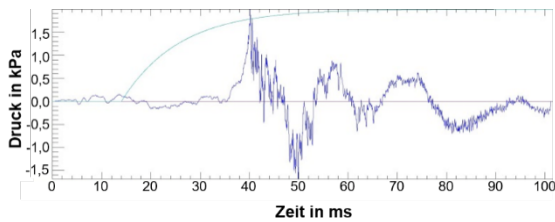


Bild 5-27: Schallpegelverlauf der ersten Unfallrekonstruktion mit Seat Leon. Das Diagramm ist mit einem Offset von 5ms in Bezug auf Bild 5-25 und Bild 5-26 zu lesen

**Erste Rekonstruktion Versuch 2, Zündzeitpunkt bei 20 ms**

Auch das zweite Fahrzeug trifft nach entsprechender Beschleunigung mit 50 km/h wie geplant auf den Pfahl. Deformationen der Frontpartie, welche für einen Schallpegel im Innenraum oberhalb 134 dB ausreichen, treten nach 15 ms auf, die Bilder der Hochgeschwindigkeitskamera zeigen erste Verformungen der Motorhaube. Nach 24 ms bricht der Airbag durch die Abdeckung mit entsprechend großer Schall- und Druckemission. Der Stapediusreflex hat seine Maximalwirkung, deren Aufbau ca. 35 ms benötigt, zu diesem Zeitpunkt etwa erst zur Hälfte erreicht, dennoch besteht ein gewisser Schutz, der eine bleibende Hörschädigung des Innenohres durch den Airbagknall eher unwahrscheinlich macht (Bild 5-30), der ARU-Wert liegt bei 452,6 und damit unterhalb der kritischen Schwelle von 500. Das Ergebnis spiegelt die ungewarnte Modalität des Modells wieder. Geht man von einer gewarnten Situation mit voll kontrahiertem Stapediusmuskel aus, etwa durch eine erhebliche Anspannung der Gesichtsmuskulatur in Erwartung des Unfalls, liegt der ARU-Wert bei 364. Unterschiede in den ARU-Werten für die gewarnte Kondition zwischen der ersten und zweiten Unfallrekonstruktion könnten sich durch die zeitlich unterschiedlichen Airbagauslösungen ergeben,

die in der Folge zu deutlich unterschiedlichen Schallpegelverläufen in der Fahrgastzelle durch Überlagerungen und Auslöschungen mit anderen Crashgeräuschen führen (vergleiche Bild 5-27 und Bild 5-30).



Bild 5-28: 15 ms nach Pfahlkontakt ist eine Deformation der Motorhaube sichtbar, Schallpegel im Innenraum des Fahrzeugs erreicht bereits 134 dB, der Stapediusreflex löst aus



Bild 5-29: Bereits nach 24 ms beginnt die Airbagentfaltung mit Spitzenpegeln von bis zu 160 dB, der Stapediusreflex hatte damit 9 ms Zeit seine Wirkung aufzubauen

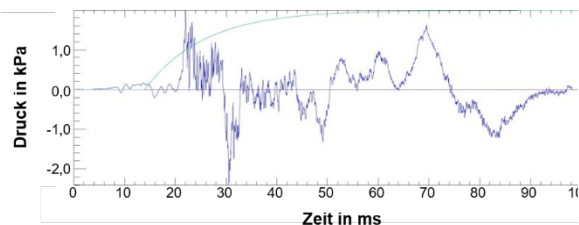


Bild 5-30: Schallpegelverlauf der zweiten Unfallrekonstruktion mit Seat Leon. Das Diagramm ist mit einem Offset von etwa 2 ms in Bezug auf die Bild 5-28 und Bild 5-29 zu lesen

### Fazit zur akustischen Messung der Unfallrekonstruktionen mit dem Seat Leon

Die relativ niedrigen Risikowerte für einen bleibenden Hörschaden bei den durchgeführten Unfallrekonstruktionen mit dem Seat Leon decken sich mit der geringen klinischen Fallzahl ernsthafter Hörschäden durch Airbagauslösung [eigene Beobachtung MHH, SAUNDERS et al., 1998, TRAYNOR, 2012, MCFEELY et al., 1999]. Im Gegensatz existieren Publikationen zu möglichen Hörschädigungen durch Airbags, auch unter Verwendung des AHAH Modells, die eine Schädigung des Innenohrs durch Airbags nahelegen. Allerdings beruhen die meisten dieser Ergebnisse auf Tests mit stehenden Fahrzeugen oder akustischen Simulationen, ohne dass Begleitgeräusche eines Unfallgeschehens berücksichtigt wurden. Dies führt zu einem ungewarnten Zustand des Ohres, da der Stapediusreflex nicht durch vorangegangene Deformationsgeräusche des Fahrzeugs ausgelöst wird und die Schallenergie damit in vollem Umfang durch das Mittelohr ins Innenohr geleitet wird. Eine entsprechende Modellanalyse des Audiosignals aus der ersten Unfallrekonstruktion (analog Bild 5-27) mit fehlendem Crashgeräusch am Anfang findet sich in Bild 5-31, bei der tatsächlich eine permanente Hörschädigung bei entsprechendem Verlauf vorhergesagt wird (ARU-Wert 615).

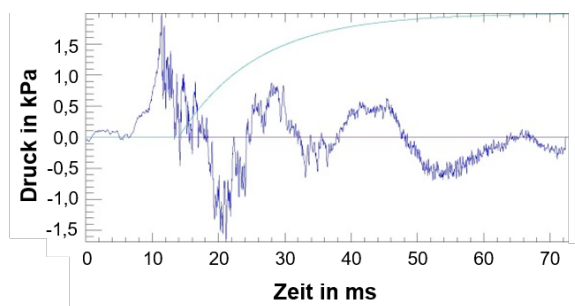


Bild 5-31: Schallpegelverlauf wie Bild 5-30, jedoch mit deutlich verkürzter Vorwarnzeit durch Crashgeräusche vor Airbagauslösung (bis auf wenige Millisekunden), was zu einem ARU Wert von 615 führt.

Mercedes Benz hat aus diesem Grund 2016 das Pre-Safe System eingeführt. Es spielt eine akustische Vorwarnung über die Audioanlage des Fahrzeugs ab, bevor im Falle eines Unfalls eine Airbagauslösung geschieht, wodurch der Stapediusreflex ausgelöst wird und das Trommelfell Teile der Schallenergie reflektiert [MERCEDES BENZ, 2016]. Die durchgeführten Crashversuche deuten an, dass Begleitgeräusche des Unfalls vor der Airbagauslösung ausreichend sind, um den gleichen Effekt zu erzielen, entgegen den

Untersuchungen in ROHM & SCHIMMELPFENIG (2007). In diesem Zusammenhang muss auch die Möglichkeit einer konditionellen Aktivierung des Stapediusreflexes in Erwartung eines unmittelbar bevorstehenden Aufpralls in Betracht gezogen werden, für die es allerdings in der Literatur keine eindeutigen Belege gibt. Denkbar wäre jedoch, dass eine starke Anspannung der Gesichtsmuskulatur auch eine Anspannung des Stapediusmuskels bewirkt [PRICE & KALB, 2013].

Eine generelle Entwarnung kann jedoch keinesfalls gegeben werden. So existieren Daten von systematischen Untersuchungen an Soldaten aus den 60er Jahren, wo im Rahmen von Schießübungen bei etwa 5 % der Teilnehmenden eine dauerhafte Hörstörung durch die Gewehrschüsse festgestellt wurde, während bei den anderen 95 % der durch das Schießen entstandene Hörverlust vorübergehend war [PFANDER, 1975]. Auch in ERNST & LENARZ (1997) wird von sogenannten vulnerablen Ohren gesprochen, die deutlich empfindlicher auf Lärmexposition reagieren und bei 5 bis 10 % der Bevölkerung vorkommen sollen, was sich mit den Daten aus PFANDER (1975) decken würde. Diese Bevölkerungsgruppe wird deutlich empfindlicher auf eine Airbagauslösung reagieren, als Menschen ohne eine derartige Prädisposition. Ebenfalls zu berücksichtigen ist, dass der Stapediusreflex bei bestimmten Krankheitsbildern (neurologisch oder anatomische Missbildungen im Mittelohr) nicht ausgelöst wird. Bei manchen Menschen fehlen auch der Stapediusmuskel oder die zugehörige Sehne, so dass eine Auslösung nicht erfolgen kann und das Innenohr ungeschützt ist gegenüber dem Schallereignis.

### 5.2.4 Ergebnisse der dynamischen akustischen Messungen aus den Unfallrekonstruktionen mit Fiat 500

Der grundsätzliche Aufbau und Hintergrund des Versuchs wurde in Kapitel 5.1.2 vorgestellt. Der Unfall wurde zweimal nachgestellt, da eine Auslösung der drei Airbags im Fahrzeug (Fahrer-, Beifahrer- und Knieairbag) bei der niedrigen Geschwindigkeit von 35 km/h bei den Versuchen keine zusätzliche Schutzwirkung zeigte, wurde der zweite Versuch mit deaktivierten Airbags durchgeführt.





Bild 5-32: Anbringung des Schallpegelmessers, Mikrofonspitze 44 cm von der Lenkradmitte entfernt

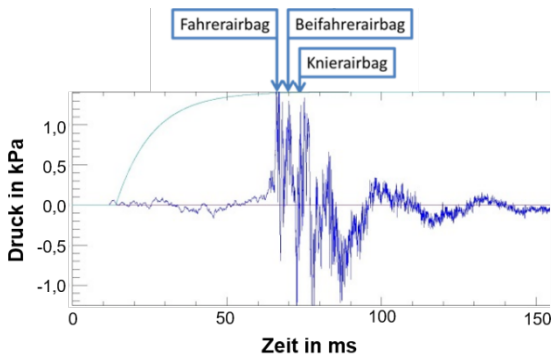


Bild 5-33: Verlauf der Airbagauslösungen: Markante Spitzen sind bei 67 ms (Fahrer), 70 ms (Beifahrer) und 75 ms (Knie) zu erkennen, es folgen Entfaltungsgerausche und Lärm durch Fahrzeugdeformation

Die Schallpegelmessungen im bzw. am Fahrzeug liefen bei beiden Versuchen erfolgreich und wurden vom externen stationären B&K Gerät bestätigt, die Messungen sind kohärent und nicht übersteuert. Das Fahrzeug trifft nach entsprechender Beschleunigung mit 35 km/h wie geplant auf den Skoda Fabia. Deformationen der Frontpartie treten nach spätestens 12 ms auf, der vom Messgerät erfasste Pegel übersteigt schon in diesem Moment die 134 dB Spitzenwert, das AHAH Modell prädiziert die Stapediusreflexauslösung. Aus den Audiodaten lassen sich markante Spitzen den jeweiligen Ereignissen zuordnen im Abgleich mit den Videodaten (Bild 5-33): nach 67 ms durchbricht der Fahrerairbag und nach 70 ms durchbricht der Beifahrerairbag die jeweilige Abdeckung. Aus den Audiodaten geht entsprechend hervor, dass nach 75 ms der Knierairbag zündet und nach 77 ms durchschlägt der Beifahrerairbag die Scheibe, was für zusätzlichen Lärm sorgt.

Die erhebliche Lärmbelastung durch die schnelle Folge der Airbagauslösungen führt nach der Modellberechnung mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem bleibenden Hörverlust und/oder Tinnitus, der ARU-Wert liegt bei 714,4 trotz voll entwickeltem Schutz durch den Stapediusreflex. Um den Einfluss der zusätzlichen Airbags (Beifahrer- und

Knierairbag) im Vergleich zu den Versuchsergebnissen vom Seat Leon auf den ARU-Wert zu ermitteln, wurden die Knalle dieser zwei Airbags aus der Audiodatei herausgerechnet, so dass eine Belastung ausschließlich durch den Fahrerairbag untersucht wird (Bild 5-34). Es zeigt sich, dass in diesem Fall das Risiko für eine bleibende Hörschädigung gering ist, da der ARU-Wert mit 366,1 deutlich unterhalb der kritischen Schwelle bleibt.

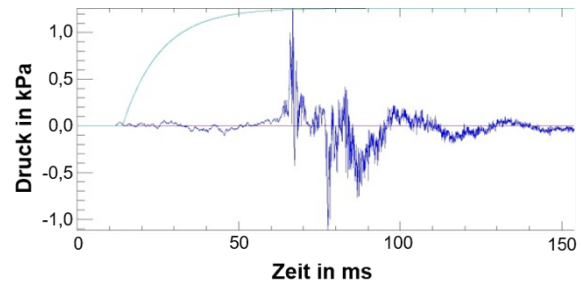


Bild 5-34: Schallpegelverlauf der Fiat 500 Unfallrekonstruktion mit Entfernung des Schallereignisses vom Beifahrer- und Knierairbag

Interessant ist hier die Betrachtung des Schallpegelverlaufs des identischen Unfalls, jedoch gänzlich ohne Auslösung der Airbags (Bild 5-35). Dieser Versuch wurde im Anschluss mit einem zweiten Fahrzeug durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Auslösung der Airbags bei der geringen Geschwindigkeit keine zusätzliche Schutzwirkung entfaltetete (siehe Kapitel 5.1.2).

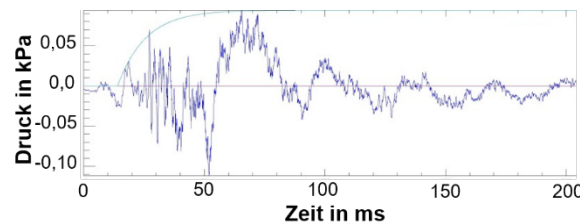


Bild 5-35: Zeitlicher Pegelverlauf beim Auffahrunfall Fiat 500 auf Skoda Fabia mit deaktivierten Airbags

Eine bleibende Hörschädigung durch den Unfall ohne die Airbags ist nach der Analyse des Schallpegelverlaufs durch das AHAH Modell so gut wie ausgeschlossen (ARU-Wert 5,3). Das Beispiel des Fiat 500 zeigt, dass eine unnötige Auslösung der Airbags vermieden werden muss, da für die Insassen das Risiko einer Hörschädigung besteht. In diesem Zusammenhang sollte die Zündung von Seitenairbags bei Frontalaufprällen nach Euro NCAP diskutiert werden, da diese bei einigen Fahrzeugen beobachtet wurden, sowohl beim ODB-Aufprall, als auch bei dem Aufprall auf die starre Wand. So wurden in 358 analysierten Euro NCAP Fällen aus den Jahren 2009 bis 2017

insgesamt in 117 Fällen die Zündung des stoßzugewandten Curtainairbags und in 47 Fällen die Zündung des stoßabgewandten Curtainairbags beobachtet.

Das AHAH Model berechnet das Risiko für einen bleibenden Hörschaden aufgrund der mechanischen Belastung der Basilarmembran in der Cochlea. Wird diese Membran durch zu starke Auslenkung beschädigt, drohen erhebliche Hörverluste, welche bis zur Taubheit in bestimmten Frequenzbereichen (C5-Senke oder Hochtonsteilabfall) gehen können. Die Serie der Auslösung der drei Airbags führt in diesem Fall zu einer hohen Wahrscheinlichkeit bleibender Hörschädigung. Ein Unterlassen der Auslösung der Beifahrer- und Knieairbags hätte hier eine erhebliche Risikominimierung bedeutet. Das Beispiel zeigt, dass selbst die maximal ausgeprägte Schutzwirkung des Stapediusreflexes in diesem Fall laut Modellberechnungen keine Sicherheit für das Ohr bedeutet hätte. Somit wären bei diesem Fahrzeug in dieser Airbagkonstellation auch Systeme wie das Mercedes Pre-Safe in Bezug auf den Gehörschutz nicht ausreichend.

### 5.2.5 Versuchsaufbau der statischen akustischen Messungen

Der Versuchsaufbau der statischen akustischen Messungen entspricht denen der dynamischen akustischen Messungen ergänzt durch weitere Mikrofone. Neben den oben erwähnten Messsystemen kommen für die statischen Versuche zusätzlich eine Brüel & Kjaer Messanlage der BAST mit insgesamt 6 Mikrofonen zum Einsatz mit dem Hintergrund an unterschiedlichen Punkten im und am Fahrzeug weitere Referenzmessungen zu erhalten (Bild 5-36). Gedoppelte Positionen repräsentieren das Messequipment, das bereits in den dynamischen Versuchen an eben jenen Stellen eingesetzt wurde, ergänzt durch weitere Messhardware zwecks unmittelbarer Verifikation der Messungen an diesen Schlüsselpositionen. Weitere Positionen, insbesondere Mikrofon 4 und 5, wurden ausgewählt, um mittels Abstandsgesetz ermittelte Schallpegelwerte in der Fahrgastzelle zu verifizieren (vgl. auch Kapitel 5.2.2). Dabei wurden die in den dynamischen Versuchen genutzten Mikrofonpositionen beibehalten und diese mit dem BAST-Messsystem doppelt mikrofoniert zum Vergleich beider Messsysteme. Die zusätzliche Mikrofonierung dient vor allem zur Bestätigung der bisher verwendeten Messsysteme.

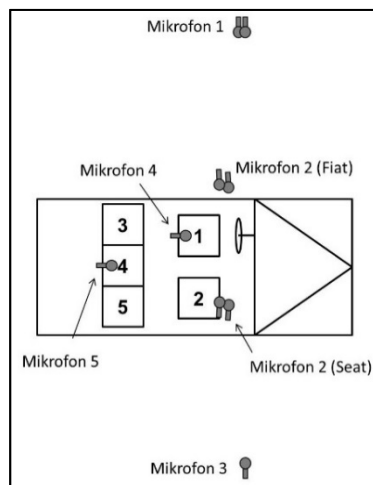


Bild 5-36: Versuchsaufbau für die statischen akustischen Messungen

### 5.2.6 Ergebnisse der statischen akustischen Messungen

Für die Auswertung der statischen akustischen Versuche wurden die Messungen des NTI XL2 Schallpegelmessers herangezogen. Die Messwerte der anderen Mikrofone konnten die berechneten Werte jeweils bezogen auf das Ohr des Fahrers bestätigen.

Beispielhaft werden die Ergebnisse für den Fahrerairbag des Seat Leon verglichen zwischen den statischen und dynamischen Messungen. Auf Basis des Pegelverlaufes in Bild 5-37 konnte ein ARU-Wert von 865,2 berechnet werden, was ein hohes Risiko einer Hörschädigung aufzeigt (vgl. Modellbeschreibung in Kapitel 5.2.2). Im Gegensatz dazu wurde in dem korrespondierenden dynamischen Versuch ein ARU-Wert von 452,6 im schlechtesten Fall berechnet, dies zeigt ein geringes Risiko einer bleibenden Hörschädigung auf. Die gemessenen Schallpegel im Fahrzeug an den verschiedenen Mikrofonpositionen sind konsistent, soweit die Messungen Gültigkeit hatten (Kapitel 5.2.3). So ergab sich im obigen Beispiel des Seat Leon ein Pegel von 160 dB bezogen auf den Kopf des Fahrers, während in 166 cm Entfernung auf der Rückbank ein Pegel von 148 dB gemessen wurde (Mikrofon 5 in Bild 5-36). Diese zwei Werte sind mit Hilfe des Abstandsgesetzes (Kapitel 5.2.2) mit einem Fehler von nur 0,36 dB ineinander umrechenbar. Wesentlich ist hier jedoch mit Sicherheit, dass es eine direkte Sichtverbindung zwischen Mikrofon 5 und Lenkrad gegeben hat.

Der Vergleich der Innenohrbelastung (ARU-Werte) zwischen den statischen und dynamischen Versuchen zeigt die erhebliche Relevanz

eines gewarteten Ohres bei Airbagauslösung. Die von der Fahrzeugdeformation ausgelösten Geräusche initiieren nach den vorliegenden Messungen den Stapediusreflex und schützen damit das Innenohr zumindest teilweise vor dem Knallgeräusch der Airbagauslösung. Dies ist bei stehendem Fahrzeug nicht der Fall, so dass der durch den Knall ausgelöste Innenohrschaden bei statischen Versuchen überschätzt werden könnte.

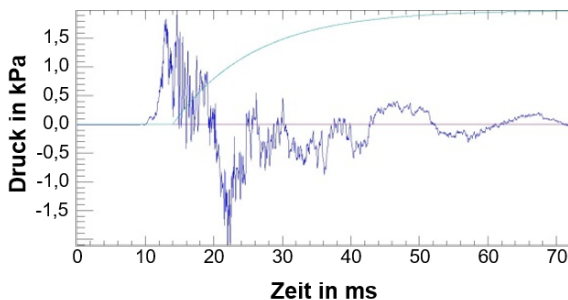


Bild 5-37: Schallpegelverlauf bei geöffnetem Fenster mit deutlichem Risiko (ARU-Wert von 865,2) einer Hörschädigung

### 5.2.7 Vergleich zwischen geschlossenem und offenem Fahrzeug bei statischen Versuchen

In der Literatur finden sich Hinweise, dass es einen Unterschied für das Gehör macht, ob die Airbagauslösung in einem Fahrzeug mit geöffnetem oder geschlossenem Fenster passiert. Während früher die Meinung vorherrschte, dass ein geöffnetes Fenster das Knalltrauma durch den Airbag mindern würde, wird in aktuellen Veröffentlichungen diskutiert, dass ein geschlossenes Fenster eine für das Gehör günstigere Situation darstellt.

Für den Vergleich zwischen geschlossener und offener Fahrgastzelle wurden beim oben beschriebenen Seat Leon zwei weitere Messungen im Stand durchgeführt:

- Fahrerairbagauslösung mit geöffneten Fenstern
- Fahrerairbagauslösung mit geschlossenen Fenstern

Bild 5-37 zeigt den Pegelverlauf der Aufzeichnung mit dem NTI XL2 Schallpegelmessgerät, bestätigt durch Messungen der anderen eingesetzten Systeme. Es zeigt sich im ungewarteten Ohr ein hohes Risiko einer Hörschädigung mit einem ARU-Wert von 865,2, welcher über der Schwelle von 500 liegt.

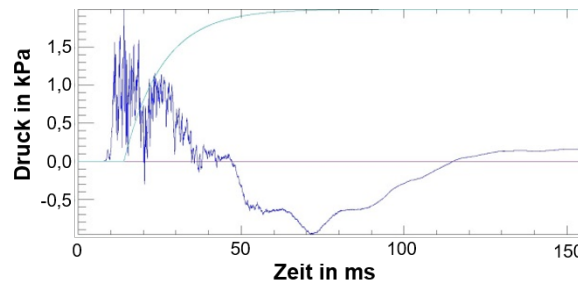


Bild 5-38: Schallpegelverlauf bei geschlossenem Fenster. Die impulshafte negative Auslenkung des Schallverlaufs fehlt im Vergleich zu Bild 5-37, was zu einer vorteilhafteren Risikobewertung von 326,8 ARUs führt (< 500) bei der ungewarteten Modalität.

Bild 5-38 zeigt dagegen einen vorteilhafteren Verlauf, wahrscheinlich hervorgerufen durch die erhebliche Druckzunahme im Fahrzeug während der Airbagauslösung. Deutlich zu sehen ist, dass die negative Auslenkung im Diagramm weniger impulshaft und kleiner in der Amplitude ist. Zu erklären ist dies mit einer Verschiebung der Mikrofonmembran durch den enormen Druckaufbau im Fahrzeug, sodass eine Auslenkung der Membran aufgrund des Schallereignisses nur noch eingeschränkt stattfinden kann. Gleiches kann für das Mittelohr angenommen werden [PRICE & KALB, 2013]. Nimmt der Druck im Fahrzeug durch die Airbagauslösung zu, so wird das Trommelfell derart stark gespannt, dass eine ungehinderte Schallübertragung an das Innenohr nicht mehr stattfinden kann und das Innenohr, ähnlich wie beim Stapediusreflex, vor einem erheblichen Teil der Schallenergie geschützt wird.

### 5.2.8 Fazit aller akustischen Messungen

Es wurden systematische Akustikmessungen an Fahrzeugen durchgeführt während verschiedener Crashereignisse und an Fahrzeugen im Stand mit Airbagzündung. Es konnten Pegel bis zu 160 dB für den Fahrerairbag am Ohr des Fahrers berechnet werden. Allerdings konnte gezeigt werden, dass durch die Wirkung des Stapediusreflex' die Wahrscheinlichkeit eines Hörschadens gering ist, dieser kann bereits durch Begleitgeräusche eines Unfalls ausgelöst werden. Bei der Mehrfachzündung von Airbags (z.B. Fahrer-, Beifahrer- und Knieairbag) konnte ein erhöhtes Risiko eines Hörschadens berechnet werden, trotz ausgelösten Stapediusreflex', durch die Aneinanderreihung kurzer akustischer Ereignisse hohen Pegels. Die Messergebnisse des Vergleichs zwischen offenen und geschlossenen Fahrzeug deuten darauf hin, dass das Risiko eines Hörschadens bei geschlossenen Fenstern geringer ist, da durch den Druckanstieg im Fahrzeug das

Trommelfell mit hoher Wahrscheinlichkeit gespannt wird und dadurch die Übertragung an das Innenohr reduziert wird, ähnlich dem Verhalten der Mikrofonmembran in Bild 5-38. Der Vergleich zwischen statischen und dynamischen Versuchen hat gezeigt, dass eine Untersuchung losgelöst von den Deformationsgeräuschen das Risiko einer Gehörschädigung überschätzt, da durch die Begleitgeräusche des Unfalls der Stapediusreflex ausgelöst werden kann.

### 5.3 Parametervariation durch FEM-Simulationsanalyse

Auf Basis der Rekonstruktionsversuche (beschrieben in Kapitel 5.1) wurden die gemessenen Belastungen numerischer Dummymodelle in einer vereinfachten Fahrzeugumgebung mittels FEM-Simulation ausgewertet. Der Beschleunigungsverlauf der Unfallrekonstruktion mit dem Fiat 500 wurde variiert, um zu analysieren, ab welcher Fahrzeugverzögerung eine Airbagzündung bei dem vorliegenden Fall Vorteile für den Insassen bringt. Die initiale Fahrzeugverzögerung lag bei maximal 15 g. Die Fahrzeugverzögerung wurde skaliert, sodass die jeweiligen Maximalwerte des Verzögerungsverlaufes um 2,5 g erhöht wurden bis zu einem Maximum von 40 g. Alle Varianten wurden mit und ohne Airbagzündung berücksichtigt.

#### 5.3.1 Modellaufbau

Die virtuelle Fahrzeugumgebung wurde als Starrkörper dargestellt, bestehend aus einem Sitz und Instrumententafel mit Windschutzscheibe (Bild 5-39). Der Starrkörperansatz wurde gewählt um den Einfluss von Sitzschaumhärten oder deformierbaren Teile der Instrumententafel zu minimieren, außerdem liegen zu den genannten Bauteilen keine Materialkennwerte vor und diese hätten angenähert werden müssen.

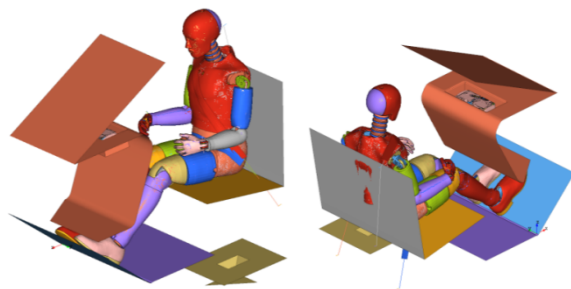


Bild 5-39: Vereinfachte Simulationsumgebung mit Hybrid III Dummy

Auf diese Starrkörper wurden die aus den Versuchen ermittelten Verzögerungsverläufe aufgeprägt. Dabei wurde der Mittelwert der Beschleunigung in X-Richtung beider Versuche jeweils von den Beschleunigungssensoren auf dem Tunnel verwendet.

In das Modell wurde ein vorhandenes Airbagmodul integriert. Als Insasse wurde ein Modell des Hybrid III 50ste Perzentile Dummy verwendet, so kann im Vergleich zu den Messwerten aus der Fiat 500 Unfallrekonstruktion die Abweichung zum Simulationsmodell analysiert werden. Das Gurtmodell war im Kontaktbereich zum Dummy mit 2D-Elementen und an den Anbindungspunkten zum Fahrzeug mit 1D-Elementen modelliert. Ein Retraktor war definiert, allerdings wurde der Gurtstraffer in den Simulationen auf Basis der Fiat 500 Unfallrekonstruktion deaktiviert, da ohne Gurtstraffer die Kinematik des Dummys in der Simulation die Kinematik aus den Versuchen besser widerspiegelt und somit die Validität der Simulationen verbessert wurde.

Die Sitzposition in den Simulationen ist im Vergleich zu den Versuchen mit dem Fiat 500 näher am Armaturenbrett, um eine frühere Airbaginteraktion zu gewährleisten. Die Position ist in Anlehnung an die ECE-R94 Sitzposition gewählt um zu verhindern, dass der Dummy durch den großen Abstand zum Airbag mit diesen keinen Kontakt hat. Der Zündzeitpunkt wurde bei allen Simulationen auf  $t=0$  ms gesetzt um den Airbag vor dem Kontakt mit dem Dummy komplett zu entfalten. Dadurch wird die bestmögliche Rückhaltung durch den Airbag bei allen Variationen sichergestellt.

#### 5.3.2 Parametervarianten der Simulationsmatrix

Im Rahmen der Parametervariation, wurde der Verzögerungsverlauf variiert. Es wurden insgesamt drei verschiedene Basisverzögerungsverläufe herangezogen. Als erster wurde die gemessene Fahrzeugverzögerung aus der Unfallrekonstruktion des Fiat 500 herangezogen. Dieser hatte eine Maximalverzögerung von 15 g. Zusätzlich wurde ein Aufprall auf die starre Wand und ein zentraler Stoß analysiert. Hierfür wurde das generische Kleinwagenmodell aus STEIN (2015) in der Basisversion herangezogen und mit jeweils 30 km/h gegen das entsprechende Hindernis gefahren (Bild 5-40). Die erzeugten Kurvenverläufe wurden ausgehend vom Maximalwert auf 15 g skaliert. Die Verzögerungsverläufe

des Fahrzeug-Fahrzeug-Aufpralls und des Aufpralls auf die starre Wand zeigen ähnliche Verläufe. Im Gegensatz dazu zeigt der Pfahlaufprall einen zeitlichen Verzug im Verzögerungsanstieg ähnlich zu dem Verhalten in der Unfallrekonstruktion aus Kapitel 5.1.1. Die Verzögerungsverläufe sind vergleichend dargestellt in Bild 5-41.

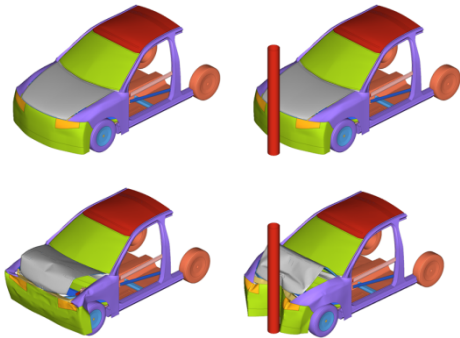


Bild 5-40: Simulationsmodelle der generischen Fahrzeugmodelle im Initial- und Endzustand

Im Folgenden wurden die initialen Verzögerungsverläufe zwischen 15 g und 40 g in Schritten á 2,5 g skaliert. Alle Varianten wurden sowohl mit, als auch ohne Airbag simuliert um anhand der Dummywerte aufzuzeigen, ab welcher Fahrzeugverzögerung in diesem Fall eine Airbagzündung Vorteile bringt und wann darauf verzichtet werden kann. Der Zündzeitpunkt des Airbags wurde jeweils bei  $t=0$  ms konstant gehalten um zu gewährleisten, dass der Airbag vor dem Kontakt mit dem Dummy komplett entfaltet ist.

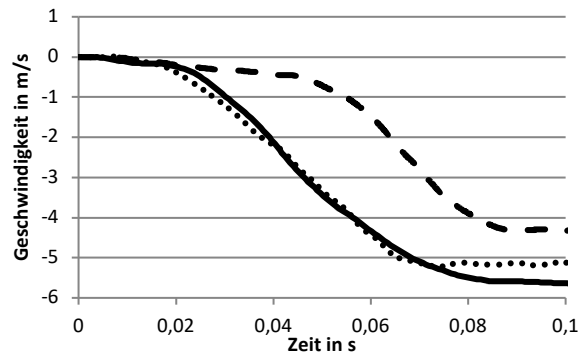
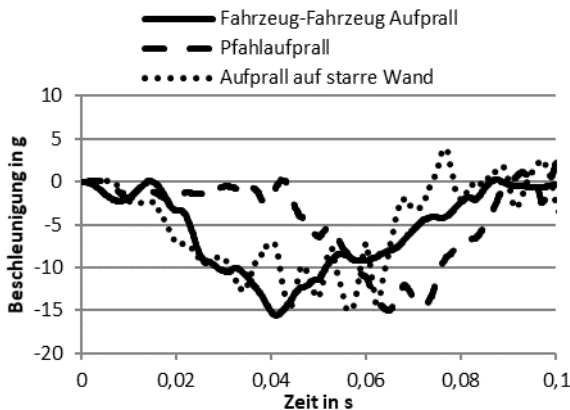


Bild 5-41: Verzögerungsverläufe der Parametervariation (oben: Beschleunigungsverläufe, unten Delta-v)

### 5.3.3 Ergebnisse der Simulationsanalyse

#### Vergleich mit Versuchsdaten

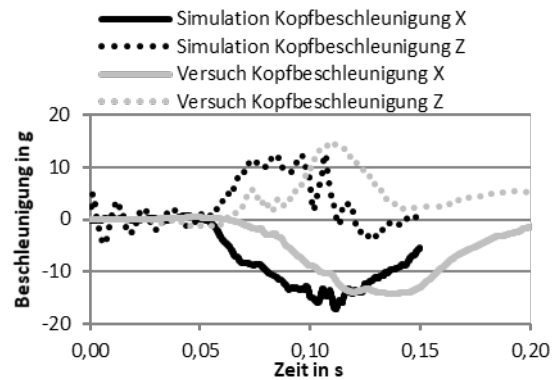


Bild 5-42: Kopfbeschleunigung in X- und Z-Richtung, initialer Puls mit Airbagzündung

Der Vergleich der Simulationen mit Fahrzeugverzögerung aus dem Versuch zeigt, dass die Größenordnung der analysierten Messwerte mit den Simulationsdaten ähnlich ist, aber die Kurvenverläufe durch die Vereinfachung im Simulationsmodell nicht übereinstimmen. Die Unterschiede sind auf die vereinfachte Fahrzeugumgebung und die veränderte Sitzposition zurückzuführen. Dies ist beispielhaft an den Kopfbeschleunigungen, der Brusteingdrückung und den Halsmomenten dargestellt für Fälle mit und ohne Airbagzündung (Bild 5-42 bis Bild 5-47). Das bedeutet, dass kinematische Vorgänge vergleichbar sind und somit der Modellierungsansatz für prinzipielle Analysen geeignet ist.



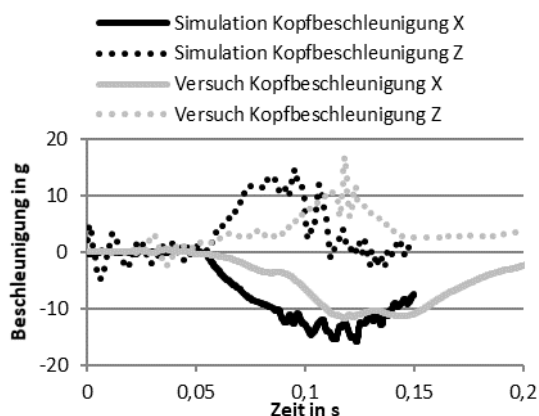


Bild 5-43: Kopfbeschleunigung in X- und Z-Richtung, initialer Puls ohne Airbagzündung

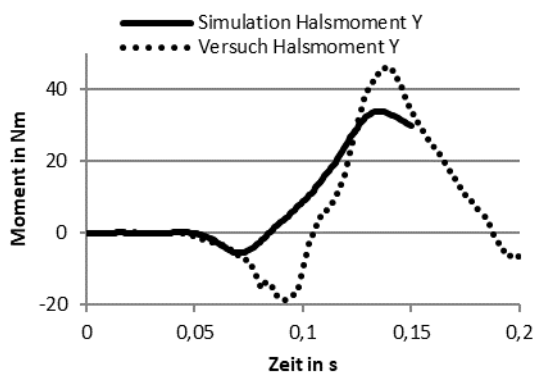


Bild 5-44: Halsmoment um Y, initialer Puls mit Airbagzündung

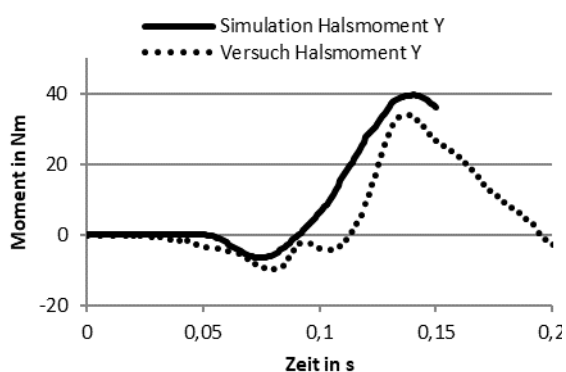


Bild 5-45: Halsmoment um Y, initialer Puls ohne Airbagzündung

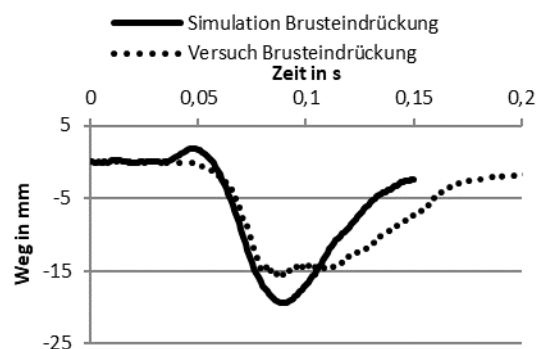


Bild 5-46: Brusteingdrückung, initialer Puls mit Airbagzündung

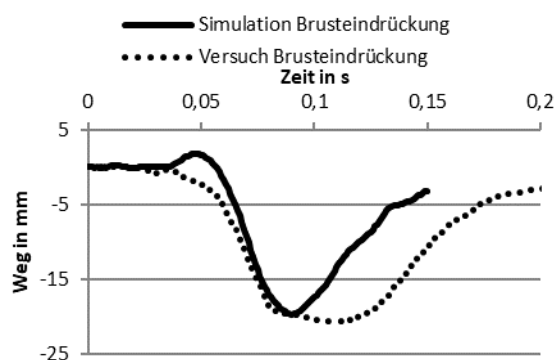


Bild 5-47: Brusteingdrückung, initialer Puls ohne Airbagzündung

## Ergebnisse Parametervariation

Die Analyse der Dummykinematik zeigt bei der initialen Simulation kaum Unterschiede zwischen Simulation mit und ohne Airbag. Auch die ausgewerteten Verletzungskriterien unterstützen diese Aussage. In Tab. 5-7 bis Tab. 5-12 sind die berechneten Verletzungskriterien für alle Simulationen aufgeführt. Bei den nichtaufgeführten Kurvenverläufe kein Wert berechnet werden. Die hervorgehobenen Werte verletzen die in Anlehnung an Euro NCAP definierten Orientierungswerte geringen Verletzungsrisikos. Die Werte entsprechen dem Higher Performance Limit von Euro NCAP bis auf Becken- und Brustbeschleunigung die KRAMER (2013) entnommen wurden (Tab. 5-13).



Max. Verzögerung in g	HIC	a3ms Kopf in g	Halskraft X in N	Halskraft Z in N	Halsmoment Y in Nm	a3ms Brust in g	Brusteindrückung in mm	a3ms Becken in g
15	12	15	430	418	19	17	20	23
17,5	30	21	535	669	23	22	24	29
20	47	26	659	822	28	26	27	34
22,5	55	28	625	852	26	30	30	41
25	69	30	548	876	28	33	33	45
27,5	101	36	552	989	29	37	35	49
30	115	39	562	1066	29	39	35	59
32,5	131	43	584	1111	29	40	35	70
35	138	45	557	1194	32	42	36	76
37,5	172	47	610	1128	36	45	36	87
40	196	49	686	1135	45	47	40	91

Tab. 5-7: Ergebnisse der Parametervariation für Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen mit Airbagzündung

Max. Verzögerung in g	HIC	a3ms Kopf in g	Halskraft X in N	Halskraft Z in N	Halsmoment Y in Nm	a3ms Brust in g	Brusteindrückung in mm	a3ms Becken in g
15	18	18	717	601	39	18	20	25
17,5	31	23	784	849	45	22	24	31
20	47	27	826	1091	45	25	26	37
22,5	61	30	898	1182	44	29	28	42
25	67	28	892	1245	45	31	29	47
27,5	97	38	968	1553	44	32	29	52
30	99	36	812	1525	44	33	29	55
32,5	199	51	992	2207	47	35	29	73
35	246	56	1087	2205	51	38	30	79
37,5	355	62	1248	2451	51	41	32	91
40	7025	102	1819	3990		42	34	92

Tab. 5-8: Ergebnisse der Parametervariation für Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen ohne Airbagzündung

Max. Verzögerung in g	HIC	a3ms Kopf in g	Halskraft X in N	Halskraft Z in N	Halsmoment Y in Nm	a3ms Brust in g	Brusteindrückung in mm	a3ms Becken in g
15	7	12	382	374	14	11	14	14
17,5	13	16	479	457	17	14	18	19
20	25	20	616	648	24	18	21	24
22,5	37	24	652	687	29	21	25	31
25	53	27	765	898	34	25	26	35
27,5	70	31	795	978	39	29	28	40
30	75	32	720	1000	38	32	30	47
32,5	69	32	629	1123	30	33	31	51
35	72	36	609	1267	30	34	32	55
37,5	84	37	573	998	33	36	32	58
40	107	42	459	1306	23	36	36	61

Tab. 5-9: Ergebnisse der Parametervariation für Pfahlaufprall mit Airbagzündung

Max. Verzögerung in g	HIC	a3ms Kopf in g	Halskraft X in N	Halskraft Z in N	Halsmoment Y in Nm	a3ms Brust in g	Brusteindrückung in mm	a3ms Becken in g
15	10	14	552	468	29	11	15	16
17,5	19	18	667	614	37	15	18	20
20	31	22	741	762	42	19	22	26
22,5	42	25	783	869	46	22	24	32
25	51	27	868	991	46	26	26	38
27,5	61	30	880	1169	47	29	28	43
30	61	31	841	1160	45	30	28	49
32,5	69	32	898	1245	45	30	28	53
35	87	34	886	1408	45	31	28	57
37,5	105	36	878	1467	44	32	29	62
40	114	36	859	1562	43	34	30	64

Tab. 5-10: Ergebnisse der Parametervariation für Pfahlaufprall ohne Airbagzündung

Max. Verzögerung in g	HIC	a3ms Kopf in g	Halskraft X in N	Halskraft Z in N	Halsmoment Y in Nm	a3ms Brust in g	Brusteindrückung in mm	a3ms Becken in g
15	11	15	346	456	17	17	19	23
17,5	23	19	428	620	19	22	23	29
20	35	23	475	656	21	27	27	35
22,5	49	26	550	778	23	30	31	41
25	71	31	564	880	25	31	33	46
27,5	93	35	565	922	30	37	35	50
30	112	38	447	1020	25	39	36	52
32,5	126	42	363	1008	22	41	36	56
35	123	43	439	1146	25	40	37	61
37,5	144	45	349	1045	22	41	39	65
40	157	47	365	1021	23	42	41	66

Tab. 5-11: Ergebnisse der Parametervariation für Wandaufprall mit Airbagzündung

Max. Verzögerung in g	HIC	a3ms Kopf in g	Halskraft X in N	Halskraft Z in N	Halsmoment Y in Nm	a3ms Brust in g	Brusteindrückung in mm	a3ms Becken in g
15	14	16	658	540	38	18	18	23
17,5	26	20	740	700	42	22	22	30
20	43	25	782	1003	43	25	25	36
22,5	58	30	909	1235	47	28	28	42
25	53	27	881	1149	46	31	29	46
27,5	59	28	837	1088	44	32	28	51
30	81	32	867	1263	44	33	30	54
32,5	110	38	860	1632	44	33	31	56
35	144	45	815	1844	42	34	32	62
37,5	198	49	903	2088	44	34	34	67
40	7029	99	1268	4116		34	35	68

Tab. 5-12: Ergebnisse der Parametervariation für Wandaufprall ohne Airbagzündung

HIC	a3ms Kopf in g	Halskraft X in N	Halskraft Z in N	Halsmoment Y in Nm	a3ms Brust in g	Brusteindrückung in mm	a3ms Becken in g
500	72	1100	1100	42	60	22	60

Tab. 5-13: Orientierungswerte für relative Auswertung der Parametervariation

Im Folgenden wurden die berechneten Verletzungskriterien in Verhältnis zu den Orientierungswerten gesetzt, dabei entsprechen 100 % dem Orientierungswert. In Bild 5-48 bis Bild 5-50 sind diese Relationen dargestellt. Generell sind die Verläufe im Vergleich mit und ohne Airbagzündung ähnlich, bis auf einige auffällige Sprünge. So ist deutlich der Kopfaufprall an den Kopfbelastungen bei 40 g zu erkennen. Außerdem zeigt die Halskraft in Z-Richtung ab 28 g Vorteile für den Fall mit Airbagzündung. Generell ist zu sagen, dass die Werte des Halsmomentes um die Y-Achse in den Fällen ohne Airbagzündung bis auf die initiale Simulation oberhalb der 42 Nm liegt etwa 10 Nm über den Werten mit Airbagzündung.

Die Simulationsanalyse mit Pulsvariation hat gezeigt, dass bei der analysierten Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision erst ab einer Verzögerung von 26 g der Vorteil für den Airbag eindeutig ist, dieser Puls entspricht einem Delta-v von 36 km/h. Darunter sollten die Airbagauslöseschwellen vor allem in Bezug auf die Halsbelastung diskutiert werden. Bei dem Pfahlaufprall sollte unterhalb von 30 g und bei dem Aufprall auf die starre Wand unterhalb von 27 g die Airbagzündung diskutiert werden.

### Einschränkungen der Parametervariation

Die Simulationsanalyse hat aufgrund der Modellierung diverse Einschränkungen, die zu beachten sind.

Die Analyse wurde ausschließlich für den Beifahrersitzplatz ausgeführt. Für den Fahrersitzplatz sind die Ergebnisse nur begrenzt übertragbar, da aufgrund der Lenkrad-, Fahrerairbag- und Pedalerieinteraktion eine andere Kinematik zu erwarten ist bzw. bei nicht zündendem Airbag eine Lenkradinteraktion zu vermeiden ist. Außerdem wurde für die Analyse nur eine Sitzposition be-

trachtet. Eine Vielzahl von Fahrzeugverzögerungskurven wurde analysiert, allerdings wurden diese generisch hergeleitet und gelten nicht für alle Fahrzeuge, da das Verzögerungsverhalten im Crashfall hochgradig fahrzeug- und unfallspezifisch ist. Durch die vereinfachte Innenraummodellierung mittels Starrkörpern sind die Ergebnisse nur bedingt allgemeingültig. Des Weiteren gelten bei dieser Analyse auch die Einschränkungen der Biofidelität des Hybrid III Dummys.

Für eine weiterführende Simulationsanalyse sollten folgende Punkte für die Aufstellung der Simulationsmatrix betrachtet werden:

- Analyse von Fahrer- und Beifahrersitzplatz in verschiedenen Sitzpositionen
- Zusätzliche Verzögerungsverläufe aus Unfallrekonstruktionen
- Detaillierungsgrad des Fahrzeuginnenraums
- Insassenmodellierung erweitern auf weitere Dummy- und Menschmodelle

### 5.3.4 Fazit zur Simulationsanalyse

Zusammenfassend konnte in der Simulationsanalyse gezeigt werden, dass mit den vorliegenden Modellen eine Airbagzündung unterhalb von einer Schwelle zwischen 26 und 30 g Maximalverzögerung je nach Kollisionstyp für den Insassen nicht eindeutig vorteilhaft ist. Die aufgezeigten Werte sind nur bedingt übertragbar auf andere Fälle, da die Einflussfaktoren fahrzeug- und kollisionspezifisch sind.

Allerdings zeigen die Simulationsergebnisse in Verbindung mit den Ergebnissen aus den Versuchen mit dem Fiat 500, dass die untere Auslöseschwelle für Airbags adressiert werden sollte. Dies sollte kollisionspezifisch geschehen, da gezeigt wurde, dass die Schwelle, ab der eine Airbagzündung einen eindeutigen Vorteil bringt in den analysierten Fällen unterschiedlich ist. Die untere Auslöseschwelle kann vor allem Hörschädigungen und die Unfallfolgekosten adressieren.

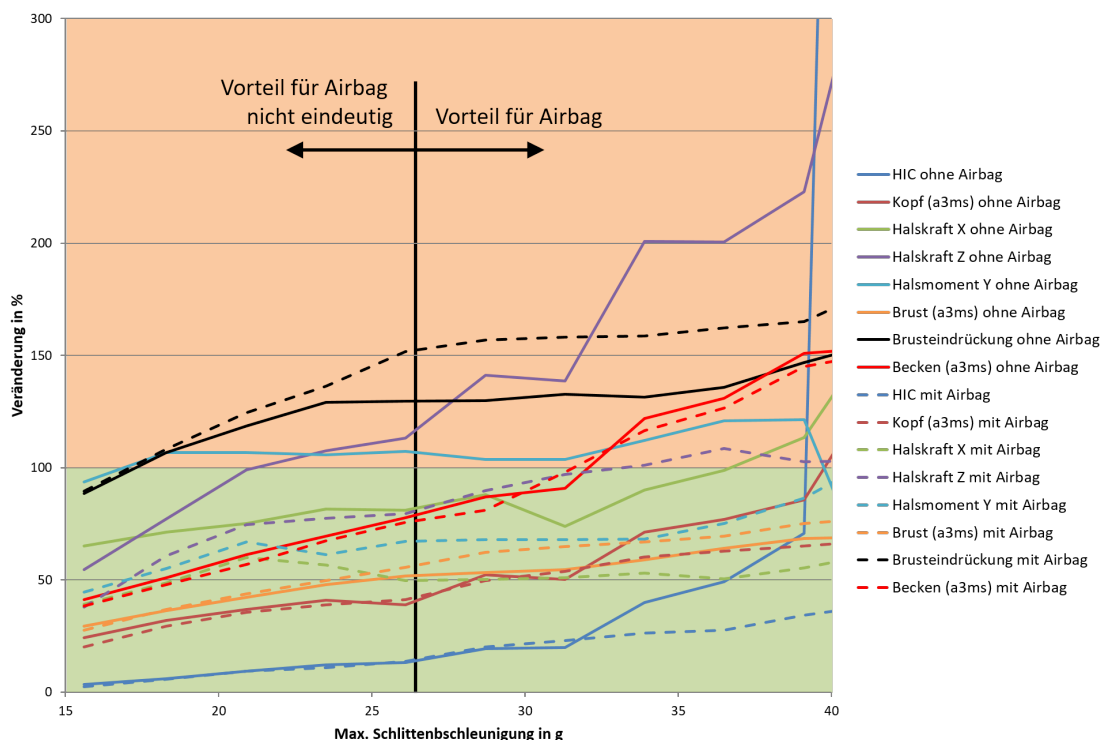


Bild 5-48: Ergebnisse der Parametervariation auf Basis der Fahrzeugverzögerung der Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision

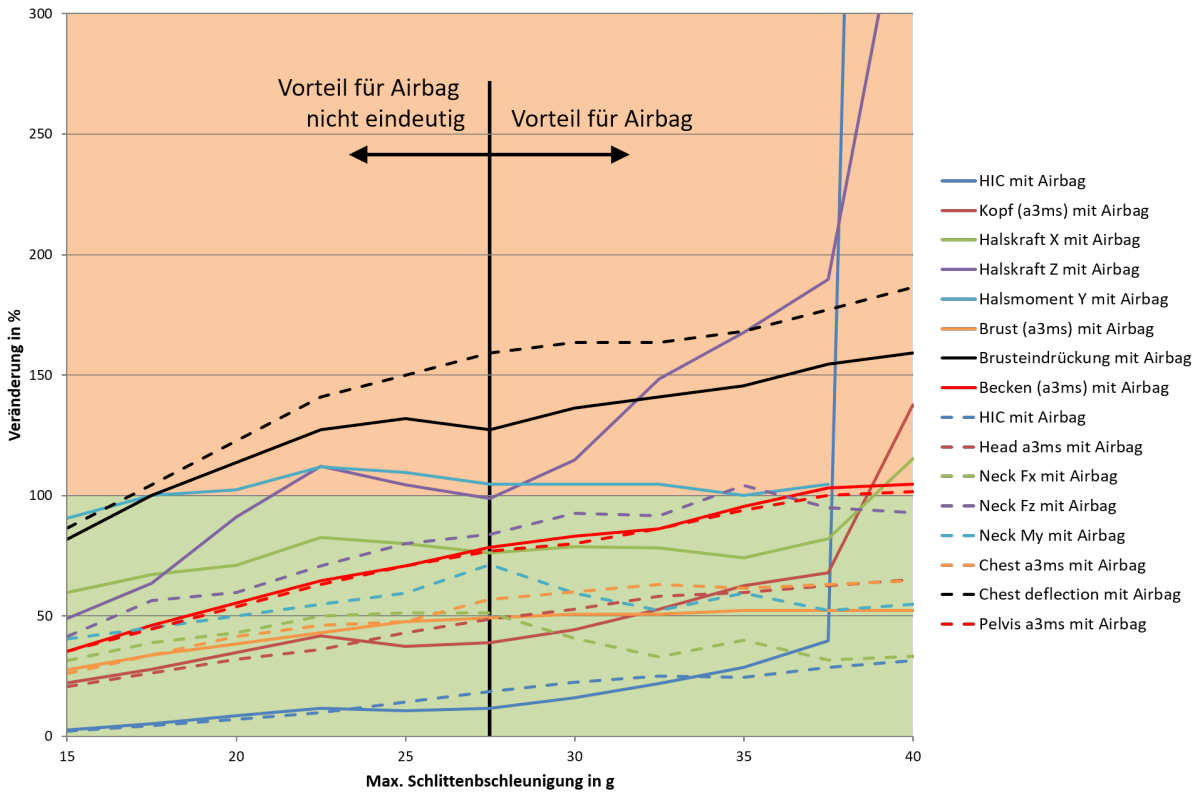


Bild 5-49: Ergebnisse der Parametervariation auf Basis der Fahrzeugverzögerung des Aufpralls auf die starre Wand

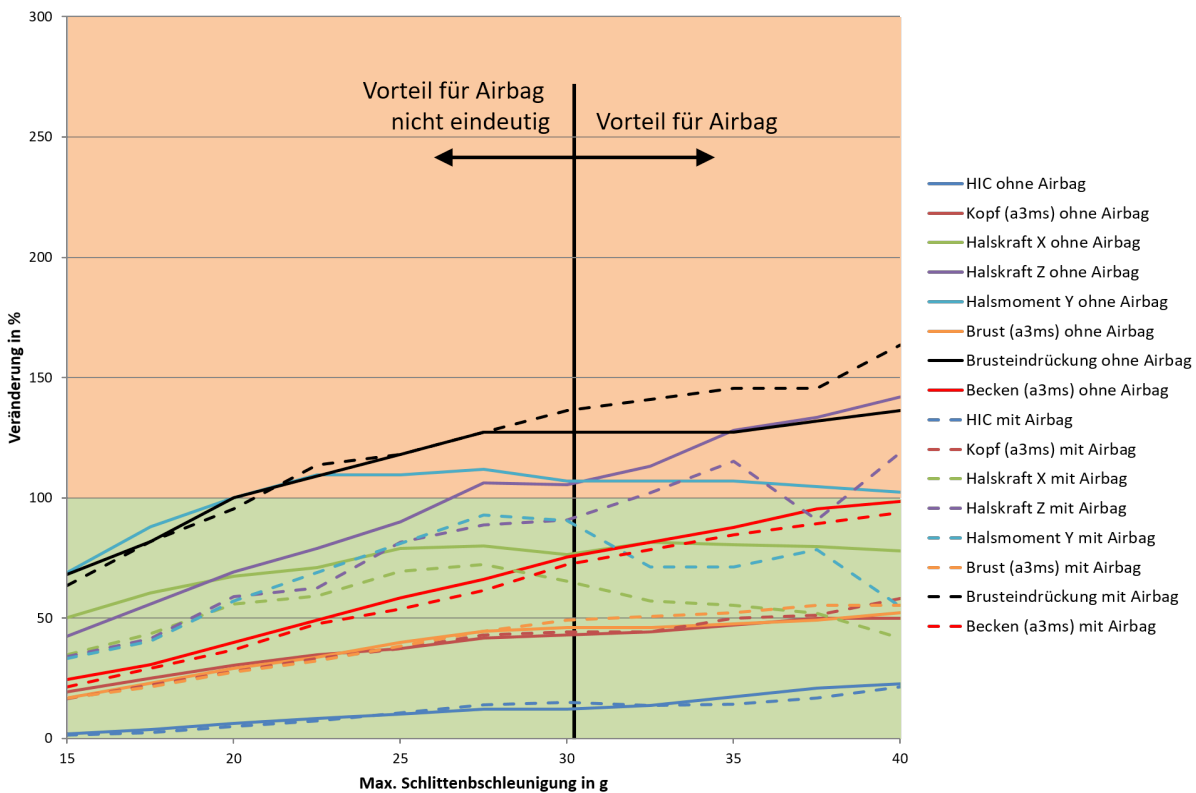


Bild 5-50: Ergebnisse der Parametervariation auf Basis der Fahrzeugverzögerung des Aufpralls auf den Pfahl

## 6 Probleme aktueller Rückhaltesysteme

Die vorgestellten Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst, um themenspezifische Hauptaussagen treffen zu können.

Anhand von wissenschaftlichen Veröffentlichungen und der durchgeführten Unfalldatenanalyse konnte gezeigt werden, dass der generelle Nutzen von Airbags im Falle eines Unfalls das Verletzungsrisiko zu reduzieren, unumstritten ist. Bereits der BAST Bericht F53 [KLANNER et al., 2004] konnte den Nutzen von Frontairbags nachweisen. Auch eine Auswertung von CCIS Daten [FRAMPTON et al., 2000] konnte das bestätigen. Der Nachweis des Nutzens von Seitenairbags ist aufgrund der geringen Fallzahlen statistisch nicht signifikant nachzuweisen. Allerdings konnte in PAGE (2006, BRAVER & KYRYCHENKO (2004) und WALD (2013) der Nutzen von Seitenairbags als Tendenz aufgezeigt werden. Der Nutzen von Seitenairbags in Einzelfällen wurde ebenfalls aufgezeigt.

Frontalairbags können in seltenen Einzelfällen bereits bei sehr geringer Unfallschwere auslösen, z.B. wenn ein leichter Kollisionskontrahent (wie beispielsweise ein Wildschwein) die Upfront-Sensoren trifft. Ebenso konnte mit Hilfe von EDR-Daten gezeigt werden, dass die Airbagzündungsentscheidung in Einzelfällen sehr spät getroffen wird. Insbesondere in Fällen mit schlechter struktureller Interaktion wird hierdurch das Verletzungsvermeidungspotential von Airbags nicht komplett ausgeschöpft.

In der Unfalldatenauswertung konnte gezeigt werden, dass Airbags helfen, schwere Verletzungen zu vermeiden oder diese in der Schwere zu mildern. Allerdings können durch Airbags Verletzungen auftreten, die ohne Airbags unwahrscheinlicher sind. Diese sind Verbrennungen bis 2. Grades, Schürfwunden, in seltenen Fällen Knochenverletzungen und Knalltraumata. Insbesondere unter Berücksichtigung des gesteigerten Verletzungsrisikos für diese Verletzungen ist es wichtig, Airbags nur dann zu aktivieren, wenn ein dem Risiko für airbaginduzierte Verletzungen gegenüberstehendes Potential zur Vermeidung von schwereren Verletzungen gegenübersteht.

### 6.1 Hörschäden

Hörschädigungen durch Airbags sind nur durch Einzelfälle in Fachliteratur dokumentiert. Nach

aktuellen Literaturdaten treten Hörschädigungen in Folge einer Airbagzündung nur selten auf bzw. werden nur selten erkannt oder können dem Unfallereignis nur selten zugeordnet werden.

Im Zuge der Unfalldatenanalyse und der Analyse von Patientinnen- und Patientendaten der MHH konnte nicht gezeigt werden, dass Hörschädigungen ein systematisches Problem darstellen, da nur zufällig durch Analyse eines Einzelfalls ein Hörschaden bemerkt wurde. Die Hörschädigung wurde von dem Betroffenen bestätigt.

#### Schalldruckpegel allgemein

Es konnte bei den durchgeführten Versuchen ein Schalldruckpegel zwischen 126 (Knieairbag Fiat 500) und 155 dB (Fahrerairbag Seat Leon) gemessen werden. Die Messung bei dem Curtain Airbag des Fiat 500 zeigte einen Schalldruckpegel von über 160 dB. Die aufgezeigten Werte befinden sich auf einem Pegelniveau, bei denen es zu Knalltraumata kommen kann.

Die Messung während eines Crashversuches ergab, dass die Unfallgeräusche vor der Airbagzündung bereits bei bis zu 134 dB liegen. Bei diesen Pegelwerten wird der Stapediusreflex ausgelöst. Dieser schützt während der Airbagzündung das Innenohr vor Hörschädigungen trotz nominell hoher Schalldruckpegel. So konnte mittels des AHAH-Modells ein geringes Risiko für eine Hörschädigung berechnet werden. Allerdings sollte beachtet werden, dass frühzeitige Airbagzündungen vor dem Auslösen des Stapediusreflex' oder in der Anschwellphase des Stapediusreflex' ein Risiko für Hörschädigungen darstellen. Des Weiteren sei erwähnt, dass der Stapediusreflex nicht bei jedem Menschen ausgelöst werden kann und die Auslöseschwelle individuell unterschiedlich ist.

#### Mehrfachzündung

Im Zuge der durchgeführten Unfallrekonstruktion mit dem Fiat 500 konnte trotz ausgebildeten Stapediusreflex' eine Hörschädigung mit dem AHAH-Modell berechnet werden. Die Hörschädigung (Tinnitus) wurde durch ein Telefoninterview mit dem Unfallbeteiligten bestätigt. Aufgrund der kurzen Abfolge der Airbagzündungen (drei Airbagzündungen innerhalb von 15 ms) konnte der Stapediusreflex das Innenohr nicht schützen.

Mehrfachzündungen von Airbags werden in zukünftigen Unfalldaten eine steigende Rolle spielen, da die Ausstattungsquote der Fahrzeuge mit Airbags steigt. Die Tendenz von der steigenden Anzahl an Airbagzündungen im Unfallgeschehen



zeigte sich auch bei der Auswertung von GIDAS- und Euro NCAP Daten für die letzten Jahre.

## 6.2 Nicht optimaler Zündzeitpunkt

Die GIDAS-Unfalldatenanalyse von Einzelfällen in Kapitel 4.4 hat gezeigt, dass Fälle auftraten, in denen der Zündzeitpunkt des Airbags nicht optimal war. In den analysierten Fällen war der Zündzeitpunkt zu spät. Da in Unfällen ohne Beaufschlagung der Längsträger der Unfall zu spät detektiert werden kann, wird der Airbag zu spät ausgelöst. Beispiele für solche Fälle sind Unter-/Überfahren, Zentraler Stoß oder Stoß außerhalb der Längsträger. In den hier vorgestellten Einzelfällen waren 11 von 14 Fällen ein Unfall mit geringer struktureller Interaktion.

Am Beispiel der hier durchgeführten Unfallrekonstruktion mit dem Seat Leon konnte im Falle des vorliegenden Pfahlaufpralls gezeigt werden, dass durch die Vorverlagerung des Zündzeitpunktes des Fahrerairbags die Brustbelastung gesunken ist.

Das Problem der zu späten Airbagauslösung in Unfällen mit geringer struktureller Interaktion wurde bereits im BASt Bericht F53 aufgezeigt.

## 6.3 Unnötige Airbagauslösung bei geringer Unfallschwere

Aus der GIDAS-Unfalldatenanalyse geht hervor, dass unterhalb von 10 km/h Geschwindigkeitsänderung in 10 % der Fälle eine Airbagauslösung stattfindet. Diese Fälle sollten hinsichtlich einer unteren Auslöseschwelle diskutiert werden. Beispielsweise konnte die hier durchgeführte Unfallrekonstruktion mit dem Fiat 500 aufzeigen, dass die Airbagzündung in dem vorliegenden Fall keine zusätzliche Schutzwirkung ergab im Vergleich zu der Unfallrekonstruktion ohne Airbagzündung. Zu erwähnen ist außerdem, dass die Unfallschwere für die Rekonstruktion überschätzt wurde.

Zusätzlich zu der Unfallrekonstruktion wurde eine umfangreiche Simulationsmatrix aufgestellt, um die untere Auslöseschwelle zu adressieren. Je nach Kollisionspartner konnte gezeigt werden, dass in dem analysierten Modell erst ab einer max. Fahrzeugverzögerung von 26 bis 30 g der Vorteil der Airbagzündung eindeutig war.

In dem vorliegenden Beispiel hätte die unterdrückte Airbagzündung einen Hörschaden vermieden und das weitere Verletzungsrisiko hätte sich dadurch nicht verändert.

## 6.4 Airbaginduzierte Verletzungen

Mit Hilfe der analysierten GIDAS-Daten konnte gezeigt werden, dass airbaginduzierte Verletzungen meist leichte Verletzungen sind. Diese sind oberflächliche Hautverletzungen (Schürfwunden und Verbrennungen bis 2. Grades) und Arm- und Handfrakturen bedingt durch die Fahraufgabe.

Eine pauschale Aussage ob bei unterdrückter Airbagzündung schwerere Verletzungen aufgetreten wären, kann nicht getroffen werden. Des Weiteren sei zu erwähnen, dass bei steigender Unfallschwere die Abgrenzung zwischen airbaginduzierter und unfallinduzierter Verletzung schwer ist.

## 7 Empfehlung für verbesserte Rückhaltesysteme

Aus den Erkenntnissen und anhand der dargelegten Probleme aktueller Rückhaltesysteme wurden an verschiedene Adressaten Empfehlungen formuliert.

### 7.1 Empfehlung an die Gesetzgebung und den Verbraucherschutz

Die Ergebnisse dieser Projektarbeit haben gezeigt, dass viele technische Lösungen vorhanden sind, die Potential haben, den Schutz der Insassen im Falle eines Unfalls verbessern. Weiterer Forschungsbedarf ist dennoch nötig. Durch gezielte Maßnahmen könnten jedoch Gesetzgebung und Verbraucherschutz die Marktdurchdringung solcher Lösungen forcieren. Beispielsweise wären hier Gurtstraffer und Gurtkraftbegrenzer auf der Rückbank zu nennen. Aber auch eine automatische Erkennung von rückwärtsgerichteten Kindersitzen verspräche ein erhöhtes Sicherheitspotential.

Um das Problem des nicht optimalen Zündzeitpunktes und der unnötigen Airbagauslösung zu adressieren sollte über die Einführung eines physischen oder virtuellen Testverfahrens mit geringer struktureller Interaktion (beispielsweise zent-

raler Stoß oder Unterfahren) oder ein Testverfahren mit geringem Delta-v in entsprechenden Arbeitsgruppen diskutiert werden.

Für die Adressierung von Hörschädigung infolge von Airbagzündung wird eine systematische Datenaufnahme durch Geräuschemessung im Fahrzeug während Crashversuchen empfohlen. Um das Problem von Hörschädigung infolge von Mehrfachzündungen zu adressieren, könnte ein entsprechender Punktabzug für Airbags ohne Dummyinteraktion während des Crashtests eingeführt werden. Beispielsweise wenn bei unbesetzten Beifahrersitzplatz der Beifahrerairbag auslöst. Allerdings ist hierbei zu berücksichtigen, dass Airbags mitunter auch präventiv gezündet werden (insbesondere Curtainairbags), um potentielle weitere Aufpralle abzumildern. Hieraus resultiert die Notwendigkeit weiterer Forschungsarbeit.

Die flächendeckende Marktdurchdringung von adaptiven und integralen Sicherheitssystemen sollte gefördert werden, um den Insassen entsprechend der Unfallsituation personalisiert zu schützen.

## **7.2 Empfehlung an die Rückhaltesystementwicklung**

Durch konstruktive Maßnahmen können vor allem die oberflächlichen Hautverletzungen adressiert werden. Beispielsweise durch geringere Entfaltungsgeschwindigkeit und geringere Temperaturen mittels Kaltgasgeneratoren. Einhergehend mit dieser Empfehlung ist eine frühere Crashsensierung. Hier sollte neben der bestehenden Sensorik auch die Umfeldsensorik der Fahrerassistenzsysteme hinzugezogen werden.

Des Weiteren sollte die Entwicklungsarbeit auch den Schalldruckpegel der Airbagzündung adressieren - einerseits durch leisere Gasgeneratoren und andererseits durch geeignete Schallweiterleitung.

## **7.3 Empfehlung an die Forschung**

Die Ergebnisse dieser Projektarbeit ergaben interessante Erkenntnisse, die wiederum neue Fragen aufwerfen. Vor allem bei dem Thema der Hörschädigung sollten einige Fragestellungen weiter erforscht werden. Um das Problem der Hörschädigungen statistisch gut zu betrachten, wird vor allem eine systematische Hörüberprüfung der Unfallbeteiligten der bei GIDAS erfassten Fälle empfohlen. Des Weiteren kann dadurch

die Airbagzündung mit der Hörschädigung besser verknüpft und als Ursache benannt werden.

Weiterer Forschungsbedarf wurde bei der Auslösung des Stapediusreflex' erkannt. Bei den Analysen wurde davon ausgegangen, dass dieser durch Schallpegel getriggert wird, allerdings stellt sich im Zusammenhang von vorgezogenen Zündzeitpunkten die Frage, ob dieser auch durch Körperanspannung oder in Schrecksituationen auch konditionell ausgelöst werden kann. Dies könnte beispielsweise in Fahrsimulatoruntersuchungen geschehen, bei denen ein Unfallszenario eingespielt wird.

# **8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung**

Die Airbagtechnologie begleitet Serienfahrzeuge seit über 30 Jahren und ist zusammen mit dem Gurt das wichtigste passive Sicherheitssystem in Fahrzeugen. Des Weiteren stellt in modernen Fahrzeugen die steife Fahrgastzelle den Überlebensraum für die Insassen sicher und bietet so dem Airbag und dem Sicherheitsgurt den sicheren Raum um deren Schutzwirkung zu entfalten. Durch die stetige Weiterentwicklung von Airbags ist die Kundenakzeptanz sehr hoch. Dennoch wird in seltenen Fällen in nichtwissenschaftlichen Veröffentlichungen die Meinung vertreten, dass Airbags schwere Verletzungen verursachen. Diese Aussage wurde bereits im BAST Bericht F53 entkräftigt, allerdings sollte in diesem Bericht das Schutzzpotential von Airbags nochmals erörtert werden, um weitere Verbesserungen abzuleiten.

## **Stand der Technik und Marktdurchdringung**

Es konnte anhand von verschiedenen Literaturquellen gezeigt werden, dass sich die Airbag- und Rückhaltetechnologie stetig weiterentwickelt. So konnten einige Probleme und Verbesserungsvorschläge die im BAST Bericht F53 erkannt wurden, adressiert werden.

So sind beispielsweise mehrstufige Rückhaltesysteme, teils adaptive Rückhaltesysteme und Pre-Crash-Sensoren bereits in Fahrzeugen verbaut. Die Sitzbelegungserkennung ist aufgrund der Euro NCAP Bewertung in vielen Fahrzeugen auf allen Sitzplätzen, Teil der Fahrzeugausstattung. Allerdings wurden bei der Analyse von Euro NCAP Crashtests Airbagzündungen beobachtet, trotz nichtbesetzter Sitzplätze. So wurden in 115 Crashtests gegen eine starre Barriere mit

Vollüberdeckung bis einschließlich 2017 insgesamt in 17 Fällen eine Zündung des Beifahrerairbags beobachtet. Die Mehrsensortechnik ist in vielen Fahrzeugen verbaut. Da in den analysierten Daten keine Fehlauflösungen beobachtet wurden, wurde die Robustheit der Mehrsensortechnik nicht weiter analysiert. Der Stand der Technik wurde mittels Expertinnen- und Experteninterviews verifiziert.

Die Marktdurchdringung von Airbags wurde anhand der CSC-Kindersitz-Kompatibilitäts-Datenbank analysiert. In den 633 analysierten Fahrzeugen, die nach ECE-R94 homologiert wurden, hatten alle einen Beifahrerairbag. In neun Fahrzeugen war kein Seitenairbag für die Thoraxinteraktion und in 17 Fahrzeugen kein Airbag für die Kopfinteraktion für den Beifahrersitz verbaut. Die im BASt Bericht F53 angestrebte 100%-Ausstattungsquote wurde für den Fahrer- und Beifahrerplatz für Frontalairbags erreicht und für Seitenairbags mit 97 % annähernd erreicht.

Der Vergleich zwischen Nutzen und Schädigung durch Airbags hat gezeigt, dass die einhellige Meinung der analysierten Literatur den Nutzen der Airbags nicht in Frage stellt, allerdings ein geringes Verletzungsrisiko vorhanden ist. Es wurde aufgezeigt, dass bei den Themen Kindersitzerkennung, Hörschädigung, Verbrennungen und falscher Zündzeitpunkt noch Verbesserungspotential vorhanden ist.

### **Unfalldatenanalyse**

In Einzelfällen lösen Frontalairbags bei sehr geringen Unfallschweren aus und können hierdurch das Verletzungsrisiko gegenüber einer Nichtauslösung erhöhen. Eine ungewünschte Nichtauslösung konnte in der statistischen Auswertung von Unfalldaten nicht nachgewiesen werden, jedoch zeigen die US-amerikanischen EDR-Daten und ein Unfallrekonstruktionsversuch, dass in Einzelfällen eine verspätete Airbagauslösung dazu führt, dass nicht das komplette Verletzungsvermeidungspotential ausgeschöpft wird.

Hörschädigungen wurden in einer sehr kleinen Anzahl von Fällen berichtet. Basierend auf den GIDAS-Daten traten diese insbesondere bei geringer Unfallschwere auf. Ein kausaler Zusammenhang zwischen Unfallschwere und Hörschädigung lässt sich allerdings aufgrund der geringen Datenbasis nicht belegen.

In Bezug auf den Seitenaufprall deutet sich an, dass eine Kombination aus Thorax- und Vordachairbag das höchste Schutzpotential insbesondere für Kopf und Thorax bieten.

### **Patientinnen- und Patientendatenanalyse**

Die systematische Analyse von Patientinnen- und Patientendaten der MHH mittels verschiedener Ansätze ergab keine auswertbare Fallanzahl zur statistischen Auswertung. In der Auswertung von Gutachtenfällen des Deutschen Hörzentrums konnten keine Fälle identifiziert werden, in denen nachgewiesen werden konnte, dass ein Hörschaden durch einen in einem Unfall gezündeten Airbag verursacht worden wäre.

### **Unfallrekonstruktionsversuche**

Anhand der Unfallrekonstruktionsversuche konnte gezeigt werden, dass bei dem vorliegenden zentralen Stoß eine frühere Airbagzündung die Brustbelastung auf den Dummy verringert hätte. Bei dem untersuchten Auffahrunfall konnte gezeigt werden, dass die Airbagauslösung nicht notwendig gewesen wäre, da die Dummybelastungen ohne Airbagzündungen auf dem gleichen niedrigen Verletzungsrisikoniveau waren.

Anhand der untersuchten Beispiele konnte gezeigt werden, dass in Unfallkonstellationen mit geringer struktureller Interaktion oder im niedrigen Geschwindigkeitsbereich Optimierungspotential für die Schutzwirkung besteht. Diese Fälle adressieren vor allem die Sensierung von Unfällen und die Auslösealgorithmen.

### **Schalldruckmessung**

Es wurden systematische Schalldruckpegelmessungen durchgeführt um die Pegel einzelner Airbags separat und im Unfallgeschehen bewerten zu können. Es konnte bei den durchgeführten Versuchen Pegel zwischen 126 (Knieairbag) bis über 160 dB (Curtain Airbag) gemessen werden. Anhand des AHAH konnte berechnet werden, dass durch die Unfallbegleitgeräusche der Stapediusreflex ausgelöst werden kann und somit das Risiko für eine Hörschädigung verringert wird.

Bei der analysierten Mehrfachzündung konnte gezeigt werden, dass trotz ausgelösten Stapediusreflex' durch kurze Aneinanderreihung mehrerer Geräuscheignisse das Risiko einer Hörschädigung hoch ist. Dies konnte durch Patientenbefragung für den vorliegenden Fall bestätigt werden.

Die Schalldruckpegelmessungen haben gezeigt, dass durch den Stapediusreflex das Innenohr vor einer Hörschädigung geschützt werden kann, allerdings kann dieser Schutzreflex bei Mehrfachzündung von Airbags nicht ausreichen oder bei frühen Airbagzündzeitpunkten noch nicht voll ausgeprägt sein.

## Probleme und Empfehlungen

Im Zuge der Auswertung aller Projektbestandteile konnten vier Themen hervorgehoben werden, durch die das Schutzpotential von Airbags weiter erhöht werden kann.

Das Thema Hörschädigung sollte aufgrund der hohen Pegel, Mehrfachzündungen von Airbags und früher Zündzeitpunkte in Zukunft adressiert werden. Vor allem eine systematische Pegelmessung in Crashversuchen und die audiometrische Messung von Unfallbeteiligten sollten forciert werden, um die Problematik statistisch bewerten zu können.

In Unfallkonstellationen mit geringer struktureller Interaktion, beispielsweise beim zentralen Stoß oder beim Über-/Unterfahren ist der Zündzeitpunkt unter Umständen nicht optimal bzw. zu spät, wodurch die Insassen ein höheres Verletzungsrisiko haben. Eine Weiterentwicklung der Sensorik und der Auslösealgorithmen mit Berücksichtigung der Umfeldsensoren für Fahrerassistenzsysteme kann dieses Problem adressieren.

Die Problematik unnötiger Airbagauslösung adressiert Unfälle in niedrigen Geschwindigkeitsbereichen. Hier konnte gezeigt werden, dass es Unfallkonstellationen gibt, in denen die Airbagzündung für das niedrige Verletzungsrisiko der Insassen keinen Mehrwert bringt und im Zuge der Hörbelastung unterdrückt werden sollte. Die Adressierung der unteren Airbagauslöseschwelle ist hochgradig fahrzeug- und unfallspezifisch und sollte umfassend diskutiert werden.

Obwohl der Airbag an sich ein hochentwickeltes technisches System ist, kann es bei einer Auslösung immer noch zu Verletzungen kommen. Es konnten leichte Verletzungen wie oberflächliche Hautverletzungen (Schürfwunden und Verbrennungen bis 2. Grad) und Arm- und Handfrakturen bedingt durch die Fahraufgabe der Airbagzündung als Verletzungsursache zugeordnet werden. Diese Problematik kann vor allem durch langsamere Entfaltung und geringere Temperaturen adressiert werden, was wiederum eine Vorverlagerung des Zündzeitpunktes bedeuten würde.

### Aktueller Stand im Vergleich zu F53

Die im BASt Bericht F53 aufgelisteten Aspekte für die Weiterentwicklung der Airbagtechnologie wurden in Teilen umgesetzt, andere Punkte wurden wiederum noch nicht umgesetzt.

Folgende Aspekte wurden umgesetzt:

- Positionierung der Airbagöffnung, sodass die Auslassöffnungen den Insassen nicht direkt beaufschlagen
- Sitzbelegungserkennung auf dem Beifahrersitz
- Robustheit des Systems zur Vermeidung von Fehlauflösungen

Folgende Aspekte sind in der Phase der Marktdurchdringung:

- Integration von Hybrid-Gasgeneratoren
- Adaptive Rückhaltesysteme durch mehrstufige Airbagauslösung mit Gurtstraffern und -kraftbegrenzern abgestimmt auf die Unfallschwere
- Unfallschwereerfassung durch Mehrensorstechnik
- Pre-Crash-Sensierung

Einzigster nicht adressierter Aspekt aus KLANNER et al. (2004) ist die Einführung eines Unterfahrtests. Die Einführung eines Tests mit 5%-Frau in Europa wurde durch Euro NCAP und die ECE R137 adressiert. Die automatische Erkennung von rückwärtsgerichteten Kindersitzen wurde adressiert beispielsweise durch das COPD-System im Rahmen der ISO TS 22239, allerdings fehlen für dieses System Impulse für eine flächendeckende Marktdurchdringung.

Der Aspekt der frühzeitigen Erkennung von Überschlägen wurde nicht adressiert, da Überschläge aufgrund der flächendeckenden Einführung von elektronischen Stabilitätsprogrammen im aktuellen Unfallgeschehen eine untergeordnete Rolle spielen im Vergleich zum Unfallgeschehen zum Zeitpunkt der Datenerfassung zu F53.

### Fazit

Abschließend kann gesagt werden, dass Airbags im Zusammenwirken mit dem Dreipunktgurt ein effektives und sicheres Rückhaltesystem sind, welches breite Anwendung in Fahrzeugen findet. Voraussetzung für die Entfaltung der optimalen Schutzwirkung ist die ordnungsgemäße Benutzung des Sicherheitsgurtes und eine ordnungsgemäße Sitzposition. Problemfälle, die den Insassen verletzen können, sind selten und resultieren meist in leichten Verletzungen.

Folgende zusammengefasste Aspekte dieser Projektarbeit sollten für zukünftige Entwicklungen berücksichtigt werden:

- Systematische Analyse von Hörschädigung infolge von Airbagzündung und Adressierung dieser mit leiseren Airbags

- Analyse des Auslösungsmechanismus des Stapediusreflex'
- Vorverlagerung des Zündzeitpunktes für Unfallkonstellationen mit geringer struktureller Interaktion
- Unnötige Airbagauslösung im niedrigen Geschwindigkeitsbereich vermeiden
- Entfaltungsgeschwindigkeit und Temperaturen bei der Airbagauslösung herabsetzen
- Pre-Crash-Sensierung erweitern durch Integration von Sensoren der Fahrerassistenzsysteme
- Adaptive Rückhaltesysteme in denen sowohl Airbag und Sicherheitsgurt den Insassen adaptiv entsprechend der Unfallsituation schützen und sich als System gegenseitig ergänzen

Abschließend sei hervorzuheben, dass es viele technische Lösungen gibt, die das Rückhaltesystem und dessen Wirkung weiter verbessern und die Insassen bedarfsgerecht schützen. Allerdings müssen diese Systeme flächendeckend in Fahrzeuge verbaut werden. Diese Marktdurchdringung kann vor allem durch Verbraucherschutzprogramme gefördert werden.



## Literatur

- AAAM ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF AUTOMOTIVE MEDICINE (1998): "The Abbreviated Injury Scale – AIS, version 98", 1998
- ALLEN, C.H., BRUCE, R.D., DIETRICH, C.W., PEARSONS, K.S., (1971): „Noise and inflatable restraint systems: final report“, Cambridge, Massachusetts: Bolt, Beranek, and Newman
- ALLINGER, P., (2010): „AIRBAG-Regel – Sechs Faustregeln für mehr Sicherheit“, <http://www.technische-hilfeleistung.info/2010/05/16/airbag-regel-sechs-faustregeln-fuer-mehr-sicherheit/>
- AUTO.DE, (2008): „Toyota entwickelt ersten Heckairbag“, [auto.de/magazin/toyota-entwickelt-ersten-heckairbag](http://auto.de/magazin/toyota-entwickelt-ersten-heckairbag), Leipzig
- BENDEL, O., HAUSKE, S., (2004): „E-Learning: Das Wörterbuch“, Sauerländer Aarau Verlag, Aarau (CH)
- BIRCH, S., (2008): „Autoliv focuses on pedestrian safety“, <http://articles.sae.org/4682/>
- BRAESS, H.-H., SEIFFERT, U., (2013): „Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik“ Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden
- BRAVER, E.R., KYRYCHENKO, S.Y., (2004): „Efficacy of Side Air Bags in Reducing Driver Deaths in Driver-Side Collisions“, *American Journal of Epidemiology*, Vol. 159, No. 6
- BURCZUK, C., MERZ, U., (2013): „Seat belt airbag (Beltbag) – Increased safety, comfort“, *Auto Tech Review*, Sindelfingen
- BURG, H., MOSER, A., (2007): „Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion“, Springer Verlag, Wiesbaden
- CHIDESTER, A., MYNATT, M., (2015): „Airbag related injuries in NHTSA’s crash database“, *ESV Conference*
- CONTINENTAL AG, (2008): „Crash Impact Sound Sensor (CISS) – Körperschallsensor“, [continental-automotive.de/www/automotive\\_de\\_de/themes/passenger\\_cars/chassis\\_safety/passive\\_safety\\_sensorics/passive\\_sicherheit\\_de/ciss\\_koerperschallsensor\\_de.html](http://continental-automotive.de/www/automotive_de_de/themes/passenger_cars/chassis_safety/passive_safety_sensorics/passive_sicherheit_de/ciss_koerperschallsensor_de.html), Hannover
- CRIADO, A.L., LÓPEZ, P.B., ALONSO, A.G., (2010): “Permanent visual loss secondary to airbag deployment”, *Acta Ophthalmologica* 2010, Volume 88, Issue 8
- DALMOTAS, D.J., GERMAN, A., COMEAU, J.-L., (2009): “Crash Pulse Analysis using Event Data Recorders”, *Proceedings of the 19<sup>th</sup> Canadian Multidisciplinary Road Safety Conference*, Saskatoon, Saskatchewan
- D’ELIA, A., NEWSTEAD, S., SCULLY, J. (2013): “Evaluation of vehicle side airbag effectiveness in Victoria, Australia”. *Accident Analysis and Prevention* 54 (2013) 67– 72
- DERSTANDARD, (2010): “Airbag und Gurt Ursache vieler Verletzungen“, [derstandard.at/1271378307658/Unfall-Studie-Airbag-und-Gurt-Ursache-vieler-Verletzungen](http://derstandard.at/1271378307658/Unfall-Studie-Airbag-und-Gurt-Ursache-vieler-Verletzungen), Wien
- DESTATIS (2017): „Verkehrsunfälle 2016 Fachserie 8, Reihe 7“, 2017
- DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT, (1999): “Sitzbelegungssensor”. Patentnummer DE19812626A1, München
- EDWARDS, M., WISCH, M., PASTOR, C., PRICE, J., BROUGHTON, J., ADOLPH, T., (2013): „XIII – Cost Benefit Analysis. In Johannsen, H. (Editor): *FIMCAR – Frontal Impact and Compatibility Assessment Research*“, Universitätsverlag der TU Berlin, ISBN 978-3-7983-2614-9 (online). Berlin
- EPPINGER, R., (1999): “Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems – II”, *NHTSA*
- ERNST, A., LENARZ, T., (1997): “Otoacoustic emissions in predicting noise induced hearing loss in vulnerable inner ears”, *European commission concerted action – protection against noise*. University College London
- Ernstberger A., Joeris, A., Daigl, A., Kiss, A., Angerpöntner, K., Nerlich, M., Schmucker, U., (2015): “Decrease of morbidity in road traffic accidents in a high income country – an analysis of 24,405 accidents in a 21 year period”. *Injury, Int. J. Care Injured* 46S4 (2015) S135–S143
- EURO NCAP, (2005): “Test Results Seat Leon”

- EURO NCAP, (2015): "Assessment Protocol – Adult Occupant Protection", Version 7.0.3
- EURO NCAP (2017): "FAR SIDE OCCUPANT TEST & ASSESSMENT PROCEDURE", Version 1.0
- FORD MOTOR COMPANY, (2013): „Ford Expands Availability of Rear Inflatable Safety Belt to 2014 Fusion“, [media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2013/08/13/ford-expands-availability-of-rear-inflatable-safety-belt-to-2014.html](http://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2013/08/13/ford-expands-availability-of-rear-inflatable-safety-belt-to-2014.html), Dearborn
- FRAMPTON, R., SFERCO, R., WELSH, R., KIRK, A., FAY, P., (2000): "Effectiveness of Airbag Restraints in Frontal Crashes – What European Field Studies Tell Us", IRCOBI Conference, Montpellier (France)
- FRAWO.DE, "Dezibeltable", <http://joomla3.frawo.de/index.php/diverses/dezibeltable>
- GEHRE, C., KRAMER, S., Schindler, V., (2004): "Seitenairbags und Kinderrückhaltesysteme", BASt Bericht F50
- GOVINDARAJAN, R., FERRER, G., SMOLLEY, L.A., OLIVEIRA, E.A., RAHAGHI, F., (2010): "Case Report Airbag Pneumonitis", Hindawi Publishing Corporation Case Reports in Medicine Volume 2010, Article ID 498569
- GRAHAM, J.D., GOLDIE, S.J., SEGUI-GOMEZ, M., THOMPSON, K.M., NELSON, T., SIMPSON, A., WOERNER, L.G., (1998): "Reducing risks to children in vehicles with passenger air bags", *Pediatrics* 102 (1):e3
- GROSCH, W., (2016): "Kameras beobachten Auto-Insassen", [ingenieur.de/Themen/Automobil/Kameras-beobachten-Auto-Insassen](http://ingenieur.de/Themen/Automobil/Kameras-beobachten-Auto-Insassen), Düsseldorf
- HANDELSBLATT, (2006): „Airbag-Knall ist gefährlich für Kinder“, [handelsblatt.com/auto/test-technik/gehoeer-und-atemwegekoennen-schaden-nehmen-airbag-knall-ist-gefaehrlich-fuer-kinder/2742188.html](http://handelsblatt.com/auto/test-technik/gehoeer-und-atemwegekoennen-schaden-nehmen-airbag-knall-ist-gefaehrlich-fuer-kinder/2742188.html), Düsseldorf
- HEINE, S., SCHÖNEBURG, R., Fehring, M., Richert, J. (2017): „Wirkpotentiale von PRE-SAFE Impuls Seite am Beispiel eines schweren Kreuzungsunfall-szenarios“ 11. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit, Berlin
- HOYE, A., (2010): „Are airbags a dangerous safety measure? A meta-analysis of the effects of frontal airbags on driver fatalities“, *Accident Analysis and Prevention* 42 (2010) 2030–2040, doi:10.1016/j.aap.2010.06.014
- INSASSENSCHUTZ.50WEBS., (2007): „Rückhaltesysteme und Airbags“, [insas-senschutz.50webs.com/5\\_2\\_airbags.html](http://insas-senschutz.50webs.com/5_2_airbags.html)
- ISI AIRBAG GMBH, (2002): „Patent EP 1474317 B1 Kaltgasgenerator“
- ISO, (2009): „Road vehicles – Child seat presence and orientation detection systems (CPOD) – Part 1: Specifications and test methods“, Genf
- JOHANNSEN, H., (2013): "Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion", Springer Vieweg
- JOHANNSEN, H., EDWARDS, M., LAZARO, I., ADOPLH, T., VERSMISSEN, R., THOMSON, R., (2012): „FIMCAR – Frontal Impact Assessment Approach“, GRSP Informal Document GRSP-52-24
- JOHANNSEN, H., OTTE, D., (2015): „Influence of Impact Type and Restraint System Triggering Time on Injury Severity in Frontal Impact Crashes“, 24. ESV Conference, Göteborg
- KHOUZAM, R., AL-MAWED, S., FARAH, V., MIZERACKI, A., (2016): „Next-Generation Airbags and the Possibility of Negative Outcomes Due to Thoracic Injury“, *Canadian Journal of Cardiology*
- KINDELBERGER, J.C., CHIDESTER, A., FERGUSON, E., (2003): „Air Bag Crash Investigations“, ESV Conference
- KLANNER, W., AMBOS, R., PAULUS, H., HUMMEL, T., LANGWIEDER, K., KÖSTER, H.W., (2004): „Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbag“, BASt Bericht F53
- KRAMER, F., (2013): „Integrale Sicherheit“, Springer Verlag, Dresden
- KRIEBEL, S., (2011): „GM stellt Airbag vor“, [autobild.de/artikel/gm-neuer-airbag-1937889.html](http://autobild.de/artikel/gm-neuer-airbag-1937889.html), Hamburg
- LABERGE-NADEAU, C., BELLAVANCE, F., MESSIER, S., VEZINA, L., PICHETTE, F., (2009): "Occupant injury severity from lateral collisions: A literature review". *Journal of Safety Research* 40 (2009) 427–435

- LACKNER, C.K., BURGHOFER, K., LAZAROVICI, M., STOLPE, E., MUTSCHLER, W.E., (2007): „Verletzungsmuster verunfallter PKW-Insassen mit Polytrauma“, Notfall Rettungsmed 2007 10:23–31, DOI 10.1007/s10049-006-0880-5
- LANGWIEDER, K., HUMMEL, T., MÜLLER, C., (1997): „Der Airbag im Realunfall: Leistung und Schwächen – Erkenntnisse aus der Unfallforschung“, VDI-Tagung Innovativer Insassenschutz im Pkw, Berlin
- LEHNHARDT, E., LASZIG, R., DILIER, N., HESSE, G., JANSSEN, T., KINKEL, M., MROWINSKI, D., HORMANN, J., (2001): „Praxis der Audiometrie“, Thieme Verlag
- LESIRE, P., HERVE, V., CASSAN, F., ENGEL, R., TEJERA, G., ALONZO, F., (2007): „Discussion on child safety at the front passenger seat position: review of some real world data and test results“, 5th Interantional Conference Protection of children in cars, München
- LIBERMAN, M.C. & MULROY, M.J., (1982). „Acute and chronic effects of acoustic trauma: Cochlear pathology and auditory nerve patho-physiology.“ In: New Perspectives on Noise-Induced Hearing Loss, pp. 105-135. New York.
- LONGTON, A., Gidney, J., LESIRE, P., KIRK, A., DODSON, E., MÜLLER, G., LEHMANN, I., JOHANNSEN, H., SCHNOTTALE, B., KRISHNAKUMAR, R., (2012): „CASPER Deliverable D4.6 – Assessment of solutions to improve the restraint conditions of children in vehicles“
- LUDER, M., „Eine Zeitbombe auf Rädern?“, equapio.com/technik/airbag-eine-zeitbombe-auf-raedern
- MACLENNAN, P., ASHWANDER, W., GRIFFIN, R., MCGWIN, G., Loring, W., (2007): „Injury risks between first- and second-generation airbags in frontal motor vehicle collisions“, Accident Analysis and Prevention
- MAO, Y., (2001): „Auswirkungen unterschiedlicher Gewebefaltungen auf das Gefährdungs-/Schutzpotenzial von Airbags“, Schriftenreihe B – Fahrzeugtechnik – des Instituts für Straßen- und Schienenverkehr der Technischen Universität Berlin
- MARSISKE, H., (2006): „Airbags der nächsten Generation werden noch schneller reagieren“, welt.de/print-welt/article209934/Airbags-der-naechsten-Generation-werden-noch-schneller-reagieren.html
- MAYER, H., (2015): „Airbagentwicklung bietet Luft nach oben“, vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Airbagentwicklung-bietet-Luft-oben, Düsseldorf
- MCCARTT, A.T. & KYRYCHENKO, S.Y., (2007): „Efficacy of Side Airbags in Reducing Driver Deaths in Driver-Side Car and SUV Collisions“, Traffic Injury Prevention, 8:2, 162-170, DOI: 10.1080/15389580601173875
- MCFEELY, W.J. Jr, BOJRAB, D.I., DAVIS, K.G., HEGYI, D.F., (1999): „Otolologic injuries caused by airbag deployment“, Otolaryngol Head Neck Surg, 121(4): 367-73
- MCGWIN, G., MODJARRED, K., DUMA, S., RUE, L., (2007): „Association Between Upper Extremity Injuries and Side Airbag Availability“. The Journal of Trauma Injury, Infection, and Critical Care. J Trauma. 2008; 64:1297–1301. DOI: 10.1097/TA.0b013e3181271b21
- MERCEDES BENZ, (2016): „Schutz in Unfallsituationen: Mercedes-Benz PRE-Safe“, mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/innovation/schutz-in-unfallsituationen-mercedes-benz-pre-safe
- MIDSOUTH RESCUE TECHNOLOGIES, „Occupant Positioning Airbags“, mid-southrescue.org/id13.html, Springtown
- MORGENSTERN, K., TALUCCI, R., KAUFMANN, M.S., SAMUELS, L.E., (1998): „Bilateral pneumothorax following air bag deployment“, CHEST journal 114
- MÜLLER, G., JOHANNSEN, H., FASTENMEIER, W., (2010): „Fehlgebrauch der Airbagabschaltung bei der Beförderung von Kindern in Kinderschutzsystemen“, BASt Bericht F75
- NHTSA, (2009): „Special investigation – Counts of Frontal Air Bag Related Fatalities and Seriously Injured Persons“, DOT HS 811 104
- NHTSA, (2010): „Special crash investigation – First generation frontal airbags – A model

- for future corrective action”, DOT HS 811 261
- NIXON, C.W., (1969): “Human response to an air bag inflation noise”, Wright Patterson Air Force Base, Ohio: Biological Acoustics Branch, 6570th Aerospace Medical Research Laboratory
- OGUN, O.A., IKYAA, S.Y., OGUN, G.O. (2014): „Rethinking Airbag Safety: Airbag Injury Causing Bilateral Blindness”, Middle East African Journal of Ophthalmology
- PAGE, Y., (2006): „Side Airbags Effectiveness – Methods and Results“, Präsentation EEVC WG 21
- PETERSEN, J., (2003): „Digitale Spuren in der Airbag-Steuerung“, unfallaufnahme.info/content/beitraege-anderer-autoren/digitale-spuren-in-der-airbag-steuerung, Hessisch Oldendorf
- PFANDER, F., (1975): „Das Knalltrauma“, Springer Verlag
- PRICE, G.R., KALB, J.T., (1986): „Mathematical model of the effect of limited stapes displacement on hazard from intense sounds”, J. Acoustical Society of America, Supplement 1, Vol. 80
- PRICE, G.R., KALB, J.T., (2013): „Using the Auditory Hazard Assessment Algorithm (AHAH)”, <http://www.arl.army.mil/ARL-Directorates/HRED/AHAH>
- RATH, A.L., JERNIGAN, M.V., STITZEL, J.D., DUMA, S.M., (2005): “The effects of de-powered airbags on skin injuries in frontal automobile crashes”, Plastic & Reconstructive Surgery, Volume 115, Issue 2
- ROBERT BOSCH GMBH, (2006): „Vorrichtung zur Insassenerkennung“, [freepatentsonline.com/DE102005023694A1.html](http://freepatentsonline.com/DE102005023694A1.html), Stuttgart
- ROBERT BOSCH GMBH, (2013): „System and method for classifying a vehicle occupant“, [google.at/patents/US8499879](http://google.at/patents/US8499879), Illinois
- ROHM, M., SCHIMMELPFENNIG, K.H., (2007): “Schalldruckbelastung von Pkw-Insassen durch Airbags“, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik
- ROUHANA, S.W., DUNN, V.C., WEBB, S.R., (1998): “Investigation into the noise associated with airbag deployment: Part II – Injury risk study using a mathematical model of the human ear”. Proceedings of the 42nd Stapp Car Crash Conference, SAE Technical Paper Number 983162
- RYAN, A.F., KUJAWA, S.G., HAMMILL, T., PRELL, C.L., KIL, J., (2016): “Temporary and Permanent Noise-Induced Threshold Shifts: A Review of Basic and Clinical Observations” Otol Neurotol. 2016 Sep; 37(8): e271–e275.
- SAFECAR, (2016): “Air Bags – Quick Facts”, [safercar.gov/Vehicle+Shoppers/Air+Bags/Quick+Facts](http://safercar.gov/Vehicle+Shoppers/Air+Bags/Quick+Facts), Washington DC
- SALAM, T., STAVRAKAS, P., WICKHAM, L., BAINBRIDGE, J., (2010): “Case Report Airbag injury and bilateral globe rupture”, American Journal of Emergency Medicine
- SAUNDERS, J.E., SLATTERY, W.H., LUXFORD, W.M., (1998): “Automobile airbag impulse noise: otologic symptoms in six patients”, Otolaryngol Head Neck Surg, 118(2):228-34
- SPRINGER, H., SÜDMERSEN, J., HECK, J., HEYNE, T., Cimolino, U., (2008): “Technische Hilfeleistung bei PKW-Unfällen”, [safercar.gov/Vehicle+Shoppers/Air+Bags/Quick+Facts](http://safercar.gov/Vehicle+Shoppers/Air+Bags/Quick+Facts), Washington DC
- STEIN, M., (2015): “Entwicklung einer Methodik zur Verbesserung der strukturellen Interaktion im Pkw-Pkw-Frontalaufprall”, Universitätsverlag der TU Berlin
- STOCK, M., (2013): “Beschleunigungstrauma”, [safety.trw.de/beifahrer-dach-airbag-geht-erstmalig-im-citroen-c4-cactus-in-serie/0430/](http://safety.trw.de/beifahrer-dach-airbag-geht-erstmalig-im-citroen-c4-cactus-in-serie/0430/), Friedrichshafen
- SÜDDEUTSCHE ZEITUNG, (2010): „30 Jahre Airbag – Jubiläum der Sicherheit“, [sueddeutsche.de/auto/jahre-airbag-jubiläum-der-sicherheit-1.991888](http://sueddeutsche.de/auto/jahre-airbag-jubiläum-der-sicherheit-1.991888), München
- THEKKUDAN, J., LUCKRAZ, H., NG, A., NORELL, M., „Tricuspid valve chordal rupture due to airbag injury and review of pathophysiological mechanisms”, Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery 15
- THOMPSON, A., EDWARDS, M., WISCH, M., ADOLPH, T., KRUSPER, A., THOMSON, R., (2013): „II – Accident Analysis. In Johannsen, H. (Editor): FIMCAR – Frontal

- Impact and Compatibility Assessment Research“, Universitätsverlag der TU Berlin, ISBN 978-3-7983-2614-9 (online), Berlin
- THOMSON, R., JOHANNSEN, H., EDWARDS, M., ADOLPH., T., LAZARO, I., VERSMISSEN, T., (2013): „XI – FIMCAR Final Assessment Approach in JOHANNSEN, H. (ed.) FIMCAR – Frontal Impact and Compatibility Assessment Research“, Universitätsverlag der TU Berlin
- TRAYNOR, R., (2012): „The Effect of Automobile Air Bag Deployment on Hearing“, <http://hearinghealthmatters.org/hearinginternational/2012/the-international-threat-of-air-bags/>
- TRW AUTOMOTIVE, (2015): „Passenger Side: Active Venting“, [trw.com/sites/default/files/TRW\\_ossab\\_pabactivesave\\_en.pdf](http://trw.com/sites/default/files/TRW_ossab_pabactivesave_en.pdf), Washington
- ULRICH, D., NOAH, E.M., FUCHS, P., PALLUA, N., „Burn injuries caused by air bag deployment“, Burns, Volume 27 Issue 2
- UNECE R94, (2012): „Regelung Nr. 94 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) – Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeuge hinsichtlich der Schutzes der Insassen bei einem Frontalaufprall“, Amtsblatt der Europäischen Union
- VIEWEG, C., (2009): „In Zukunft soll der Airbag auslösen, bevor es kracht“, [welt.de/motor/article5454210/In-Zukunft-soll-der-Airbag-ausloesen-bevor-es-kracht.html](http://welt.de/motor/article5454210/In-Zukunft-soll-der-Airbag-ausloesen-bevor-es-kracht.html), Berlin
- VOLKSWAGEN AG., (2010): „Rettungsleitfaden VW“, Volkswagen AG, Wolfsburg
- WALD, M., (2013): „Bewertung der Wirksamkeit von Seitenairbags“, Bachelorarbeit 4/13, TU Berlin, Fachgebiet Kraftfahrzeuge, Berlin
- WELT N24, (2012): „Sicherheit: Jetzt kommen die Gurtairbags“, [welt.de/motor/news/article111564349/Sicherheit-Jetzt-kommen-die-Gurt-Airbags.html](http://welt.de/motor/news/article111564349/Sicherheit-Jetzt-kommen-die-Gurt-Airbags.html), Berlin
- WELT N24, (2015): „Neuer Airbag als Seitenaufprall-Schutz“, [welt.de/motor/news/article146558686/Neuer-Airbag-als-Seitenaufprall-Schutz.html](http://welt.de/motor/news/article146558686/Neuer-Airbag-als-Seitenaufprall-Schutz.html), Berlin
- WHARTON, (2016): „What Caused Takata’s Airbag Problems?“ [knowledge.wharton.upenn.edu/article/dasher-macduffie-takata-airbags/](http://knowledge.wharton.upenn.edu/article/dasher-macduffie-takata-airbags/), Philadelphia
- WIESINGER, J., (2015-1): „Airbag 1-Auslösung“, [Kfztech.de/kfztechnik/sicherheit/airbag/airbag.htm](http://Kfztech.de/kfztechnik/sicherheit/airbag/airbag.htm)
- WIESINGER, J., (2015-2): „Airbag Systemübersicht“, [Kfztech.de/kfztechnik/sicherheit/airbag/airbag2.htm](http://Kfztech.de/kfztechnik/sicherheit/airbag/airbag2.htm)
- WINTERHAGEN, J., (2012): „Automobilhersteller entwickeln neuere und bessere Airbags“, [ingenieur.de/Themen/Automobil/Automobilhersteller-entwickeln-neue-bessere-Airbags](http://ingenieur.de/Themen/Automobil/Automobilhersteller-entwickeln-neue-bessere-Airbags), Düsseldorf
- WISNEWSKI, G., (2015): „Auto: Raus mit dem Airbag!“, [info.kopp-verlag.de/hintergruende/enthuellungen/gerhard-wisnewski/auto-raus-mit-dem-airbag-.html](http://info.kopp-verlag.de/hintergruende/enthuellungen/gerhard-wisnewski/auto-raus-mit-dem-airbag-.html), Rotenburg
- WÜST, C., (1999): „Vom Retter erschlagen“, [spiegel.de/spiegel/print/d-10246307.html](http://spiegel.de/spiegel/print/d-10246307.html), Hamburg
- ZF TRW, (2014): „Beifahrer-Dach-Airbag geht erstmalig im Citroen C4 Cactus in Serie“, [safety.trw.de/beifahrer-dach-airbag-geht-erstmalig-im-citroen-c4-cactus-in-serie/0430/](http://safety.trw.de/beifahrer-dach-airbag-geht-erstmalig-im-citroen-c4-cactus-in-serie/0430/), Friedrichshafen

## Bilder

- Bild 2-1: Kollage einiger analysierter Zeitungs- und Onlineartikel
- Bild 2-2: Beispiele für Airbags: Links: Frontairbags, Mitte: Knieairbag, Rechts: Beltbag [FORD MOTOR COMPANY, 2013]
- Bild 3-1: Funktionsweise eines Anti-sliding-Airbags [BIRCH, 2008]
- Bild 3-2: Beispiele für Seitenairbags. Seitenairbag entfaltet sich aus der Rückenlehne und der Vorhangairbag überdeckt die Fensterfront zwischen A- und C-Säule
- Bild 3-3: Aufbau eines Fahrerairbags mit pyrotechnischem Gasgenerator (nach der Zündung zerlegt)

- Bild 3-4: Hauptstoßrichtung und assoziierte Airbags [nach VOLKSWAGEN AG, 2010]
- Bild 3-5: Marktdurchdringung der einzelnen Airbagtypen nach Sitzplatz
- Bild 3-6: Marktdurchdringung Gurtkomponenten nach Sitzplatz
- Bild 3-7: Verletzte Körperregionen mit und ohne Frontalaufprallairbag, eigene Darstellung nach [FRAMPTON et al., 2000]
- Bild 3-8: Brustverletzungsschwere mit und ohne Seitenairbag in Abhängigkeit der Deformationsenergie [PAGE, 2006]
- Bild 3-9: Verletzungsursachen beim Frontalaufprall von Personen in UNECE R94 zugelassenen Fahrzeugen [THOMPSON et al., 2013]
- Bild 3-10: Verletzungsschwere in Abhängigkeit der Rückhaltesystemauslösezeit und der Qualität der strukturellen Interaktion [JOHANNSEN & OTTE, 2015]
- Bild 3-11: Frontalaufpralltestverfahren gemäß UNECE R94 [JOHANNSEN, 2013]
- Bild 3-12: Beschleunigungsverläufe aus Euro NCAP Tests mit Fahrzeugen mit Markteinführung zwischen 2003 und 2009 (die unterschiedlichen Grautöne dienen lediglich der Möglichkeit einzelne Verläufe zu unterscheiden und haben keine weitere Bedeutung)
- Bild 3-13: Dummykinematik beim Euro NCAP Test, das weiße Viereck hebt den Markierungspunkt am Dummykopf hervor zur Verdeutlichung der Vorverlagerung und dessen zeitlichen Verlaufs
- Bild 3-14: Frontalaufpralltestverfahren gemäß UNECE R137 [JOHANNSEN, 2013]
- Bild 3-15: Beschleunigungsverläufe aus US NCAP Tests (die unterschiedlichen Grautöne dienen lediglich der Möglichkeit einzelne Verläufe zu unterscheiden und haben keine weitere Bedeutung)
- Bild 3-16: Dummykinematik beim US NCAP Test, das weiße Viereck hebt den Markierungspunkt am Dummykopf hervor zur Verdeutlichung der Vorverlagerung und dessen zeitlichen Verlaufs
- Bild 3-17: Frontalaufpralltestverfahren gemäß FIMCAR Vorschlag [JOHANNSEN, 2013]
- Bild 3-18: IIHS Testverfahren mit geringer Überdeckung [JOHANNSEN, 2013]
- Bild 3-19: Seitenaufpralltestverfahren, links: gemäß UNECE R95, rechts: gemäß Euro NCAP seit 2016 [JOHANNSEN, 2013]
- Bild 3-20: Seitlicher Pfahlaufpralltest, links: gemäß UNECE R135 und Euro NCAP seit 2015, rechts: gemäß Euro NCAP bis 2014 [JOHANNSEN, 2013]
- Bild 3-21: Dummykinematik bei Nachstellung eines seitlichen Baumunfalls mit 56 km/h
- Bild 4-1: Auswerterrahmen der GIDAS-Analysen (Mehrfachkollisionen und Überschläge wurden ausgeschlossen, Vehicle Deformation Index 2 wurde mit 1 (Fahrzeugfront) definiert)
- Bild 4-2: Anzahl der Airbagzündung über Erstzulassung aus den GIDAS-Daten
- Bild 4-3: Anzahl der Airbagzündung im ODB Crashtest über Euro NCAP Testjahr
- Bild 4-4: GIDAS-Auswertung der Klimaanlageausstattung und Zustand der Fenster (offen vs. geschlossen)
- Bild 4-5: Summenhäufigkeit der Airbagauslösungen und Nichtauslösungen über frontales Delta-v
- Bild 4-6: Auslösewahrscheinlichkeit von Frontalairbags über frontales Delta-v  
Bild 4-7: Unfall mit großer Geschwindigkeitsänderung ohne Airbagauslösung
- Bild 4-7: Unfall mit großer Geschwindigkeitsänderung ohne Airbagauslösung
- Bild 4-8: Unfall mit kleiner Geschwindigkeitsänderung und Airbagauslösung
- Bild 4-9: Amtliche Verletzungsschwere in Unfällen mit und ohne Airbagauslösung
- Bild 4-10: MAIS-Verletzungsschwere mit und ohne Airbag-auslösung
- Bild 4-11: Thoraxverletzungsschwere mit und ohne Airbag-auslösung
- Bild 4-12: Auswerterrahmen für Analyseanalyse der Einzelverletzungen



- Bild 4-13: Delta-v-Verteilung bei Unfällen mit kodiertem Tinnitus (n=8)
- Bild 4-14: Auswerterahmen für GIDAS-Unfallanalyse Seitenaufprall (Mehrfachkollisionen und Überschläge wurden ausgeschlossen, Vehicle Deformation Index 2 wurde mit 2 (rechte Seite) oder 4 (linke Seite) definiert)
- Bild 4-15: Amtliche Verletzungsschwere beim Seitenaufprall
- Bild 4-16: MAIS-Verletzungsschwere beim Seitenaufprall
- Bild 4-17: Deformationsbild beim Fall mit MAIS 3+ Verletzung ohne Seitenairbagauslösung
- Bild 4-18: Beschädigungen Fall 1 Renault Scenic
- Bild 4-19: Beschädigungen Fall 2 Nissan Micra
- Bild 4-20: Beschädigungen Fall 3 Daihatsu Cuore
- Bild 4-21: Beschädigungen Fall 4 Seat Cordoba
- Bild 4-22: Beschädigungen Fall 5 Seat Leon
- Bild 4-23: Beschädigungen Fall 6 Nissan Micra
- Bild 4-24: Beschädigungen Fall 7 VW Golf
- Bild 4-25: Beschädigungen Fall 8 Fiat Stilo
- Bild 4-26: Beschädigungen Fall 9 Ford Focus
- Bild 4-27: Fall 9 Kollisionspartner: Laderampe
- Bild 4-28: Beschädigungen Fall 10 Mercedes E-Klasse
- Bild 4-29: Beschädigungen Fall 11 Fiat 500
- Bild 4-30: Beschädigungen Fall 12 Skoda Yeti
- Bild 4-31: Beschädigungen Fall 13 VW Polo
- Bild 4-32: Beschädigungen Fall 14 BMW X5
- Bild 4-33: Verteilung der Verletzungsschwere bei Fahrerinnen und Fahrern aus der Online-Umfrage
- Bild 4-34: Verteilung der Verletzungsschwere bei Beifahrerinnen und Beifahrern aus der Online-Umfrage
- Bild 4-35: Maximale Verletzungsschwere in Abhängigkeit der Frontalairbagauslösung NASS CDS
- Bild 4-36: Airbagzündzeitpunkte in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsänderung
- Bild 4-37: Verletzungsschwere in Abhängigkeit der Auslösezeit
- Bild 4-38: Verletzungsschwere in Abhängigkeit der Auslösezeit bei Delta-v > 40 km/h
- Bild 5-1: Unfallfahrzeug des analysierten Unfalls für die erste Unfallrekonstruktion
- Bild 5-2: Unfallfahrzeuge des analysierten Unfalls für die zweite Unfallrekonstruktion
- Bild 5-3: Versuchsaufbau Unfallrekonstruktion Seat Leon
- Bild 5-4: Aufbau der akustischen Innenraummessung
- Bild 5-5: Sitzposition des Dummys im Vergleich zum Unfallfahrzeug
- Bild 5-6: Vergleich der Schadensbilder zwischen Unfallfahrzeug und Fahrzeug nach der Unfallrekonstruktion (Frontansicht)
- Bild 5-7: Vergleich der Schadensbilder zwischen Unfallfahrzeug und Fahrzeug nach der Unfallrekonstruktion (Schrägansicht)
- Bild 5-8: Querträger wurde vom Längsträger auf der Fahrerseite abgerissen
- Bild 5-9: Vergleich der Schadensbilder beider Seat Leon nach der Unfallrekonstruktion
- Bild 5-10: Fahrzeugverzögerung vergleichend zwischen beiden Versuchen mit Seat Leon
- Bild 5-11: Vergleich der Interaktion zwischen Dummy und Airbag bei der Unfallrekonstruktion mit dem Seat Leon bei unterschiedlichen Zündzeitpunkten (oben: Zündzeitpunkt vom fahrzeugeigenem Steuergerät bei ca. 40 ms, unten: Zündung des Airbags bei 20 ms getriggert)
- Bild 5-12: Kopfbeschleunigungsverläufe beider Versuche mit Seat Leon
- Bild 5-13: Brusteingdrückungsverläufe beider Versuche mit Seat Leon
- Bild 5-14: Unfallfahrzeug Fiat 500
- Bild 5-15: Fahrwerksmanipulation am Skoda Fabia zur Darstellung des Bremsnickens beider Fahrzeuge

- Bild 5-16: Gestell zur Aufnahme des Akustikmessgerätes an der Fahrertür des Fiat 500
- Bild 5-17: Sitzeinstellung und -position der Dummies im Vergleich zu Bildern vom Unfallfahrzeug
- Bild 5-18: Vergleich der Schadensbilder zwischen den Fahrzeugen aus dem 1. Versuch (links), 2. Versuch (mitte) und Unfall (rechts)
- Bild 5-19: Versuchsablauf der Unfallrekonstruktionen mit dem Fiat 500: Fahrerseite mit Airbagzündung (links), Beifahrerseite mit Airbagzündung (mitte) und Beifahrerseite ohne Airbagzündung (rechts)
- Bild 5-20: Fahrzeugverzögerung aus den Unfallrekonstruktionen mit Fiat 500
- Bild 5-21: Fahrzeugverzögerung aus den Unfallrekonstruktionen mit Fiat 500
- Bild 5-22: Resultierende Beschleunigungen der Dummydaten des Fahrerplatzes bei den Versuchen mit Fiat 500
- Bild 5-23: Brusteingdrückungsverläufe aus den Fiat 500 Unfallrekonstruktionen
- Bild 5-24: Positionierung des B&K Schallpegelmessers als Kontrollinstrument in 3,5 m Abstand zum Fahrzeug
- Bild 5-25: Deutlich sichtbare Deformation der Motorhaube, 18 ms nach Pfahlkontakt. Die Schallpegelmessungen im Fahrzeug zeigen hier bereits Werte oberhalb von 134 dB
- Bild 5-26: Nach 45 ms erfolgt Auslösung des Airbags, in der Folge entstehen Spitzenpegel von bis zu 160 dB, bezogen auf die Ohrposition des Dummies
- Bild 5-27: Schallpegelverlauf der ersten Unfallrekonstruktion mit Seat Leon. Das Diagramm ist mit einem Offset von 5ms in Bezug auf Bild 5-25 und Bild 5-26 zu lesen
- Bild 5-28: 15 ms nach Pfahlkontakt ist eine Deformation der Motorhaube sichtbar, Schallpegel im Innenraum des Fahrzeugs erreicht bereits 134 dB, der Stapediusreflex löst aus
- Bild 5-29: Bereits nach 24 ms beginnt die Airbagentfaltung mit Spitzenpegeln von bis zu 160 dB, der Stapediusreflex hatte damit 9 ms Zeit seine Wirkung aufzubauen
- Bild 5-30: Schallpegelverlauf der zweiten Unfallrekonstruktion mit Seat Leon. Das Diagramm ist mit einem Offset von etwa 2 ms in Bezug auf die Bild 5-28 und Bild 5-29 zu lesen
- Bild 5-31: Schallpegelverlauf wie Bild 5-30, jedoch mit deutlich verkürzter Vorwarnzeit durch Crashgeräusche vor Airbagauslösung (bis auf wenige Millisekunden), was zu einem ARU Wert von 615 führt.
- Bild 5-32: Anbringung des Schallpegelmessers, Mikrofonspitze 44 cm von der Lenkradmitte entfernt
- Bild 5-33: Verlauf der Airbagauslösungen: Markante Spitzen sind bei 67 ms (Fahrer), 70 ms (Beifahrer) und 75 ms (Knie) zu erkennen, es folgen Entfaltungsgerausche und Lärm durch Fahrzeugdeformation
- Bild 5-34: Schallpegelverlauf der Fiat 500 Unfallrekonstruktion mit Entfernung des Schallereignisses vom Beifahrer- und Knieairbag
- Bild 5-35: Zeitlicher Pegelverlauf beim Auffahrunfall Fiat 500 auf Skoda Fabia mit deaktivierten Airbags
- Bild 5-36: Versuchsaufbau für die statischen akustischen Messungen
- Bild 5-37: Schallpegelverlauf bei geöffnetem Fenster mit deutlichem Risiko (ARU-Wert von 865,2) einer Hörschädigung
- Bild 5-38: Schallpegelverlauf bei geschlossenem Fenster. Die impulshafte negative Auslenkung des Schallverlaufs fehlt im Vergleich zu Bild 5-37, was zu einer vorteilhafteren Risikobewertung von 326,8 ARUs führt (< 500) bei der ungewarnten Modalität.
- Bild 5-39: Vereinfachte Simulationsumgebung mit Hybrid III Dummy
- Bild 5-40: Simulationsmodelle der generischen Fahrzeugmodelle im Initial- und Endzustand
- Bild 5-41: Verzögerungsverläufe der Parametervariation (oben: Beschleunigungs-verläufe, unten Delta-v)

- Bild 5-42: Kopfbeschleunigung in X- und Z-Richtung, initialer Puls mit Airbagzündung
- Bild 5-43: Kopfbeschleunigung in X- und Z-Richtung, initialer Puls ohne Airbagzündung
- Bild 5-44: Halsmoment um Y, initialer Puls mit Airbagzündung
- Bild 5-45: Halsmoment um Y, initialer Puls ohne Airbagzündung
- Bild 5-46: Brusteingdrückung, initialer Puls mit Airbagzündung
- Bild 5-47: Brusteingdrückung, initialer Puls ohne Airbagzündung
- Bild 5-48: Ergebnisse der Parametervariation auf Basis der Fahrzeugverzögerung der Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision
- Bild 5-49: Ergebnisse der Parametervariation auf Basis der Fahrzeugverzögerung des Aufpralls auf die starre Wand
- Bild 5-50: Ergebnisse der Parametervariation auf Basis der Fahrzeugverzögerung des Aufpralls auf den Pfahl
- und Fällen mit Delta-v unter 25 km/h mit Airbagauslösung
- Tab. 4-3: Verletzungsschwere der Körperregionen in Abhängigkeit des aktivierten Seitenairbags
- Tab. 4-4: Suchkriterien der GIDAS-Einzelfallanalyse
- Tab. 4-5: Hörschäden bei Fahrerinnen und Fahrern nach Airbagauslösung
- Tab. 4-6: Hörschäden bei Beifahrerinnen und Beifahrern nach Airbagauslösung
- Tab. 4-7: Verletzte Körperteile bei Fahrerinnen und Fahrern aus der Online-Umfrage mit und ohne Airbagauslösung.
- Tab. 4-8: Verletzte Körperteile bei Beifahrerinnen und Beifahrern aus der Online-Umfrage mit und ohne Airbagauslösung.
- Tab. 5-1: Fahrzeugdaten des Seat Leon für die Unfallrekonstruktion
- Tab. 5-2: Maße für Sitzeinstellung und Dummypositionierung in den Unfallrekonstruktionen mit Seat Leon
- Tab. 5-3: Auswertung der Verletzungskriterien beider Versuche mit Seat Leon vergleichend zu den Euro NCAP Higher Performance Limits

## Tabellen

- Tab. 3-1: Zeitlicher Verlauf der Einführung von Airbags im Serieneinsatz [nach SÜDDEUTSCHE ZEITUNG, 2010, MIDSOUTH RESCUE TECHNOLOGIES, 2017 und FORD MOTOR COMPANY, 2013]
- Tab. 3-2: Einbauposition des Seitenairbags (SAB) der untersuchten Fahrzeuge
- Tab. 3-3: Beispiele für Geräuschquellen und deren Pegelwerte, nach [FRAWO.DE, 2015]
- Tab. 3-4: Übersicht der Expertinnen- und Experteninterviews
- Tab. 4-1: Anzahl der Personen nach Verletzungsart bei Fällen mit Delta-v über 20 km/h ohne Airbagauslösung und Fällen mit Delta-v unter 25 km/h mit Airbagauslösung (Prozentsätze beziehen sich auf die Anzahl der verletzten Personen)
- Tab. 4-2: Frakturen bei Fällen mit Delta-v über 20 km/h ohne Airbagauslösung
- Tab. 5-4: Fahrzeugdaten der Versuchsfahrzeuge für die Unfallrekonstruktion mit Fiat 500
- Tab. 5-5: Maße für Sitzeinstellung und Dummypositionierung in den Unfallrekonstruktionen mit Fiat 500
- Tab. 5-6: Verletzungskriterien aus den Unfallrekonstruktionen mit Fiat 500
- Tab. 5-7: Ergebnisse der Parametervariation für Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen mit Airbagzündung
- Tab. 5-8: Ergebnisse der Parametervariation für Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen ohne Airbagzündung
- Tab. 5-9: Ergebnisse der Parametervariation für Pfahlaufprall mit Airbagzündung
- Tab. 5-10: Ergebnisse der Parametervariation für Pfahlaufprall ohne Airbagzündung
- Tab. 5-11: Ergebnisse der Parametervariation für Wandaufprall mit Airbagzündung

Tab. 5-12: Ergebnisse der Parametervariation für Wandaufprall ohne Airbagzündung

Tab. 5-13: Orientierungswerte für relative Auswertung der Parametervariation

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

#### 2015

F 100: **Verhaltensbezogene Kennwerte zeitkritischer Fahrmanöver**

Powelleit, Muhrer, Vollrath, Henze, Liesner, Pawellek € 17,50

F 101: **Altersabhängige Anpassung von Menschmodellen für die passive Fahrzeugsicherheit**

Wagner, Segura, Mühlbauer, Fuchs, Peldschus, Freßmann € 19,00

F 102: **6th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“**

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 103: **Technische Möglichkeiten für die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Nutzfahrzeugen**

Süßmann, Lienkamp

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 104: **Abbiege-Assistenzsystem für Lkw – Grundlagen eines Testverfahrens**

Schreck, Seiniger € 14,50

F 105: **Abgasverhalten von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Feldüberwachung**

Schmidt, Georges € 14,50

F 105b: **Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – In-service conformity**

Schmidt, Johannsen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 106: **Untersuchung des Abgasverhaltens von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Austauschkatalsatoren**

Schmidt, Johannsen € 13,50

F 106b: **Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – Replacement catalytic converters**

Schmidt, Johannsen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 107: **Sicherheitsaspekte beim Laden von Elektrofahrzeugen**

Vogt, Link, Ritzinger, Ablingyte, Reindl € 16,50

F 108: **Interoperabilität zwischen öffentlichem Verkehrsmanagement und individuellen Navigationsdiensten – Maßnahmen zur Gewährleistung**

von der Ruhren, Kirschfink, Ansorge, Reusswig, Riegelhuth, Karina-Wedrich, Schopf, Sparmann, Wöbbeking, Kannenberg

€ 17,50

F 109: **Ermittlung des Umfangs von Abweichungen bei Durchführung der Abgasuntersuchung zwischen Messung am Auspuff und Abfrage des On-Board-Diagnosesystems**

Schröder, Steickert, Walther, Ranftl

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 110: **Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräten durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen**

Altinsoy, Landgraf, Rosenkranz, Lachmann, Hagen, Schulze, Schlag

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 111: **Geräuschminderung von Dünnschichtbelägen**

Schulze, Kluth, Ruhnau, Hübelt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2016

F 112: **Ersatz von Außenspiegeln durch Kamera-Monitor-Systeme bei Pkw und Lkw**

Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach, Frey, Gail, Lotz-Keens

€ 17,50

F 112b: **Final Report Camera-Monitor-Systems as a Replacement for Exterior Mirrors in Cars and Trucks**

Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach, Frey, Gail, Lotz-Keens

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 113: **Erweiterung der Software TREMOD um zukünftige Fahrzeugkonzepte, Antriebe und Kraftstoffe**

Bergk, Heidt, Knörr, Keller

€ 15,50

F 114: **Barrierefreiheit bei Fernlinienbussen**

Oehme, Berberich, Maier, Böhm

€ 17,50

F 115: **Statischer und dynamischer Fahrsimulator im Vergleich – Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit**

Frey

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2017

F 116: **Lang-Lkw – Auswirkung auf Fahrzeugsicherheit und Umwelt**

Süßmann, Förg, Wenzelis

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 117: **7th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference 2016 at Hannover Medical School**

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 118: **Bedeutung kompensativer Fahrerstrategien im Kontext automatisierter Fahrfunktionen**

Voß, Schwalm

€ 16,50

F 119: **Fahrzeugtechnische Eigenschaften von Lang-Lkw**

Förg, Süßmann, Wenzelis, Schmeiler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 120: **Emissionen von über 30 Jahre alten Fahrzeugen**

Steven, Schulte, Hammer, Lessmann, Pomsel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 121: **Laufleistungsabhängige Veränderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen von neuen Pkw**

Pellmann, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2018

**F 122: Revision der Emissionsmodellierung für leichte Nutzfahrzeuge – Bedarfsanalyse auf Basis einer Vorstudie**  
Auf der Maur, Strassburg, Knörr, Heidt, Wuethrich  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 123: Motorradsschutzhelme – Identifizierung ihres Verbesserungspotenzials unter Berücksichtigung des Motorradunfallgeschehens**  
Pollak, Schueler, Bourdet, Deck, Willinger € 19,50

**F 124: Aufbau eines Qualitätsmanagementsystems für die Erfassung und Weiterverarbeitung von Daten für IVS-Dienste**  
Heinrich, Pollesch, Schober, Stamatakis, Grzebellus, Radike, Schneider, Stapelfeld, Huber  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 125: Untersuchung zu Elektrokleinstfahrzeugen**  
Bierbach, Adolph, Frey, Kollmus, Bartels, Hoffmann, Halbach € 19,50

## 2019

**F 126: Einfluss zunehmender Fahrzeugautomatisierung auf Fahrkompetenz und Fahrkompetenzerwerb**  
Weißgerber, Grattenthaler, Hoffmann € 15,50

**F 127: Erhöhung der Verkehrssicherheit älterer Kraftfahrer durch Verbesserung ihrer visuellen Aufmerksamkeit mittels „Sehfeldassistent“**  
Kupschick, Bürglen, Jürgensohn € 16,50

**F 128: Potenzieller gesellschaftlicher Nutzen durch zunehmende Fahrzeugautomatisierung**  
Rösener, Sauerbier, Zlocki, Eckstein, Hennecke, Kemper, Oeser  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 129: Anforderungen an die dynamische Leuchtweitenregelung zur Vermeidung der Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer**  
Kosmas, Kobbert, Khanh € 15,50

**F 130: Infrastrukturbedarf automatisierten Fahrens – Grundlagenprojekt**  
Dierkes, Friedrich, Heinrich, Hoffmann, Maurer, Reschka, Schendzielorz, Ungureanu, Vogt  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 131: Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssysteme (FAS/FIS) – Personale Voraussetzungen ihres Erwerbs und Nutzung durch ältere Kraftfahrerinnen und -fahrer**  
Hargutt, Kenntner-Mabiala, Kaussner, Neukum  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2020

**F 132: Handbuch Barrierefreiheit im Fernbuslinienverkehr**  
Boenke, Grossmann, Nass, Schäfer € 17,50

**F 133: Lkw-Notbremsassistentensysteme**  
Seiniger, Heintl, Bühne, Gail € 15,50

**F 134: Stationär-Geräusch von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen**  
Altinsoy, Lachmann, Rosenkranz, Steinbach € 19,00

**F 135: Abweichungen von der akzeptierten Fahrleistungsschwelle in automatisierten Fahrsituationen**  
Voß, Schwalm € 18,00

## 2021

**F 136: Kamera-Monitor-Systeme als Fahrerinformationsquelle**  
Leitner, Oehme, de Silva, Blum, Berberich, Böhm  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 137: Konzept für die Erzeugung eines ISO-konformen UML-Modells und Generierung eines GML-Applikationsschemas für DATEX II zur Verbesserung der Interoperabilität**  
Lauber, Steiger, Kopka, Lapolla, Freudenstein, Kaltwasser  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 138: Grundlagen zur Kommunikation zwischen automatisierten Kraftfahrzeugen und Verkehrsteilnehmern**  
Schaarschmidt, Yen, Bosch, Zwickert, Schade, Petzold € 16,50

**F 139: Einfluss von Notbremsystemen auf die Entwicklung von Lkw-Auffahrunfällen auf Bundesautobahnen**  
Straßgütl, Sander € 14,50

**F 140: Reibwertprognose als Assistenzsystem**  
Leschik, Sieron, Gregull, Müller, Trapp, Brandenburg, Haalman, Terpstra  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 141: Methoden für die Bewertung der Mensch-Maschine-Interaktion beim teilautomatisierten Fahren**  
Schömig, Wiedemann, Julier, Neukum, Wiggerich, Hoffmann € 18,00

**F 142: Schräglagenangst**  
Scherer, Winner, Pleß, Will, Neukum, Stanglmayr, Bäumler, Siebke, Prokop € 14,50

## 2022

**F 143: Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbags**  
Holtz, Heidt, Müller, Johannsen, Jänsch, Hammer, Büchner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

---

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.