

Potentialanalyse früh ausgelöster Rückhaltesysteme

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors
der technischen Wissenschaften

eingereicht an der
Fakultät für Maschinenbau an der Technischen Universität Graz
Institut für Fahrzeugsicherheit

Dipl.-Ing. Gregor Gstrein

Erstbegutachter
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann Steffan

Zweitbegutachter
Professor Dr.-Ing. habil. Horst Brunner (TU Dresden)

September 2011

Deutsche Fassung:

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senats am 1.12.2008

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen / Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

(date)

.....

(signature)

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand in den Jahren 2007 bis 2011 in meiner Tätigkeit als Projekt-Assistent am Institut für Fahrzeugsicherheit der Technischen Universität Graz.

Ich möchte an dieser Stelle dem Institutsvorstand Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann Steffan für die Initiierung und Betreuung dieser Arbeit danken. Auch Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Horst Brunner sei sehr herzlich für die Begutachtung meiner Dissertation gedankt.

Großer Dank gilt meinen Kollegen und Kolleginnen am Institut, dabei insbesondere Wolfgang Sinz. Sein kritisches Hinterfragen der Ergebnisse und oftmals rasches Erkennen von möglichen Problemen, haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Darüber hinaus möchte ich besonders die freundschaftliche Atmosphäre und das sehr gute Arbeitsklima am Institut hervorheben. Im Rahmen dieser Dissertation entstand auch die Diplomarbeit von Peter Luttenberger, bei dem ich mich für die wertvolle Unterstützung bei den Schlittenversuchen herzlich bedanke.

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei den Herren Eberle, Bullinger und Richert, dass sie ihre ganze Erfahrung im Bereich der Rückhaltesystementwicklung eingebracht haben. So konnte ich auch eine Menge rund um die eigentliche Problemstellung der Arbeit lernen.

Auch den Kollegen von Autoliv danke ich für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und für die hohe Qualität der Versuchsteile sowie der zur Verfügung gestellten Simulationsmodelle.

Ein besonderes Dankeschön gilt meiner lieben Freundin Karin. Ihr verdanke ich die Energie für meine Arbeit. Insbesondere zu Zeiten, in denen es Schwierigkeiten gab, war ich über ihr Verständnis, ihre Zuversicht und ihren Rückhalt froh.

Zuletzt bedanke ich mich auch sehr herzlich bei meinen Eltern. Sie haben mir ein unbeschwertes Studentenleben ermöglicht und mich dabei stets in jeder Form unterstützt. In punkto Konsequenz, Zielstrebigkeit und auch beim Meistern schwieriger Lebenslagen waren und sind sie große Vorbilder.

Gregor Gstrein, Graz 2011

Kurzfassung

In modernen Fahrzeugen werden teilweise auch heute schon Informationen von Fahrumgebungssensoren unter anderem dazu verwendet, den Insassen im Fahrzeug auf eine drohende Kollision optimal vorzubereiten. So werden beispielsweise Gurte elektrisch vorgespannt oder Luftpolster im Sitz gefüllt, um den Insassen bestmöglich im Sitz zu fixieren. Bislang können dafür allerdings nur reversible Rückhaltesysteme eingesetzt werden. Es ist aber vorstellbar, dass zukünftig auch eine frühzeitige Auslösung irreversibler Systeme, wie einem Airbag oder pyrotechnischen Gurtstraffer mit entsprechend angepassten Rückhalteeigenschaften, realisiert wird. Mit solchen Systemen können die auftretenden Verletzungswerte in Zukunft noch deutlich reduziert werden.

In dieser Arbeit werden die beiden wichtigsten Rückhaltesysteme für den Frontalaufprall (Airbag und Gurt) bezüglich ihres Potentials bei einer frühzeitigen Auslösung untersucht. Die theoretischen Vorteile ergeben sich vor allem durch eine deutlich frühere Kopplung des Insassen an die Fahrzeugverzögerung unmittelbar vor und während der Kollision und den dadurch gewonnenen längeren Verzögerungsweg. Weiteres Verbesserungspotential eröffnet durch die Möglichkeit, Airbags über einen längeren Zeitraum vergleichsweise „sanft“ zu befüllen und somit das Verletzungsrisiko für Insassen, die sich im unmittelbaren Anschussbereich befinden, deutlich zu reduzieren.

Da in absehbarer Zukunft keine einhundertprozentige Erkennungssicherheit der Umfeldsensorik in allen Verkehrssituationen vorstellbar ist, ist es notwendig, auch „Rückfallstrategien“ für eventuelle Nicht-Erkennungen auszuarbeiten. Es muss gewährleistet sein, dass mit denselben Rückhaltesystemen auch im Falle einer Auslösung mittels heutiger, konventioneller Beschleunigungssensoren akzeptable Insassenbelastungen erreicht werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine GesamtAbstimmung derartiger Insassenschutzsysteme zu entwickeln und das damit verbundene Potential zur Reduktion des Verletzungsrisikos von Fahrzeuginsassen aufzuzeigen. Somit soll ein Anreiz für eine Weiterentwicklung der dafür notwendigen Sensorik geboten werden.

Diese Untersuchung basiert auf Mehrkörpersimulationen mit dem Programm Madymo. Es wurden dabei verschiedene Gesamtkonzepte früh ausgelöster Rückhaltesysteme entwickelt und diese anhand verschiedener Crash-Szenarien mit unterschiedlichen Dummies bewertet. Die numerischen Ergebnisse wurden dabei mit zahlreichen Prinzip- und Schlittenversuchen bestätigt, beziehungsweise dienen zur Modellvalidierung. Im Zuge einer Serie von Standversuchen konnte auch das Verbesserungspotential durch die langsame Befüllung des Airbags in OoP-Situationen (OoP...Out of Position) nachgewiesen werden.

Es zeigt sich, dass durch die frühe Airbagauslösung insbesondere die Kopf- und Nackenbelastungen teilweise drastisch reduziert werden können. Um mittels einer sehr frühen Straffung des Gurtes durch eine Vorbeschleunigung des Insassen Verbesserungen zu erzielen, müssen einige wesentliche Randbedingungen in Hinblick auf die Gurtgeometrie oder den Freiraum hinter dem Insassen, erfüllt sein. Nichtsdestotrotz können auch bei konventionellen Straffzeiten durch Gurtkräfte, die über einen längeren Zeitraum beziehungsweise den gesamten Straffweg gleichmäßig anliegen, deutliche Verbesserungen im Bereich der Brustbelastungen erzielt werden.

Die Abstimmung der Systeme für die beiden zeitlichen Auslöseszenarien (Auslösung vor Erstkontakt und Auslösung zu konventionellen Triggerzeiten), beziehungsweise für die verschiedenen untersuchten Lastfälle stellt sich als große Herausforderung heraus. Zusammenfassend kann aber gesagt werden, dass es gelungen ist, in einer bestehenden Fahrzeugumgebung ein neuartiges Rückhaltesystem zu entwickeln, mit welchem bei einer frühzeitigen Auslösung eine wesentliche Verbesserung des Insassenschutzes erreicht wird. Bei konventionellen Triggerzeiten liegen die Belastungswerte in etwa auf dem Niveau des Referenzfahrzeuges mit den Serienrückhaltesystemen.

Abstract

Nowadays, in modern cars the information of surround-sensors is used in order to “prepare” the occupant in the best way for a possible collision. For example, the seat belts are tensioned electrically or additional bolsters in the seat are inflated to fix the person in the seat perfectly. So far, only reversible restraint systems can be triggered for this purpose. For the future, it is imaginable to realize a pre-crash deployment of irreversible restraints, such as an airbag or pyrotechnical seatbelt pretensioners with adjusted restraint properties. With such systems it will be possible to reduce the injury risk significantly in future.

In this thesis, the two most important restraint systems (airbag and seatbelt pretensioner) are analyzed with respect to their potential concerning the reduction of the injury risk due to a pre-crash activation. The theoretical benefits result in the earlier coupling of the occupant to the vehicle deceleration before and during the collision and the associated longer deceleration distance. Furthermore, the airbag can be inflated comparatively gently during a longer period which leads to a reduction of the injury risk of occupants who sit too close to the airbag.

In the foreseeable future, a hundred-percent detection rate of the surround sensors will not be achieved. Therefore, it is necessary to develop “backup-strategies” for a possible non-detection. It has to be assured, that the occupant is protected at the same level as with today’s restraint systems, in case the restraint systems are activated at conventional trigger times.

The aim of this work is to develop a setup for both pre-crash activated airbag and seatbelt, and illustrate the possibility of improving the occupant protection with such systems. In this way further developments of the necessary sensors shall be stimulated.

This examination is based on multi-body-simulations with the tool “Madymo”. Several concepts for pre-crash activated restraint systems have been developed and evaluated on the basis of different crash-scenarios and dummy-types. The numerical results were confirmed by a set of principle- and sled-tests. In an additional set of static tests, the potential for the reduction of the injury-risk in “OoP-Situations” (OoP...out of position) due to a slow inflation of the airbag could be demonstrated.

It turns out, that in particular the loads onto the head and the neck of the occupant can be reduced significantly, if the airbag is triggered before the crash happens. For gaining potential due to a very early pretensioning of the seatbelt some requirements regarding the anchor-points of the seatbelt or the space behind the seat have to be fulfilled. Nevertheless, pretensioning the seatbelt with constant forces during a longer period or the whole pretensioning distance can lead to great improvements especially in the thorax area even at conventional deployment times.

The setup of the restraint systems for both deployment-scenarios (pre-crash vs. in-crash) and different crash- or dummy-types turns out to be a challenging task. To sum up, novel restraint systems, designed for pre-crash and conventional deployment times, were integrated in an existing car-environment. In case of the pre-crash activation significant reductions of the dummy-loads could be achieved. Moreover, when activating these systems at conventional trigger-times during the collision, the injury risk is comparable to the series-production restraints of the reference-car.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Ziel der Arbeit - Vorgehensweise	5
1.2	Überblick aktueller Rückhaltesysteme – Stand der Technik	6
1.2.1	Aufgabe von Rückhaltesystemen - aktuelle Trends	7
1.2.2	Gurtsystem	7
1.2.3	Airbagsystem	9
1.2.4	Weitere Rückhaltesysteme für den Frontal-Aufprall	11
1.3	Konventionelle Auslösesysteme – Stand der Technik	12
1.3.1	Crash-Sensorik	12
1.3.2	Funktionsweise – Kollisionserkennung	13
1.3.3	Auslösesicherheit	14
1.4	Fahrumsgebungssensorik & Fahrassistenzsysteme – Stand der Technik	14
1.4.1	Kamerasysteme	15
1.4.2	Radar	16
1.4.3	Lidar	17
1.4.4	Sensorfusion	17
1.4.5	Beispiele für aktuelle Fahrassistenzsysteme	18
1.5	Reversible PreCrash-Systeme – Stand der Technik	19
1.6	Untersuchungen zu irreversiblen PreCrash-Systemen	20
2	Theoretisches Potential irreversibler Rückhaltesysteme (Airbag, Gurt)	23
2.1	Größere Airbagform – mehr Vorverlagerungsweg für Fahrzeug-Insassen	23
2.2	Weniger aggressive Airbag-Entfaltung – OoP	25
2.3	Vergrößerung des Verzögerungsweges durch Vorbeschleunigung mittels Gurt	27
2.4	Weniger aggressive Gurtstraffung – länger anhaltend – geringeres Kraftniveau – selbes Resultat	27
3	Entwicklung von früh ausgelösten Rückhaltesystemen in einem bestehenden Fahrzeug	29
3.1	Prinzipielle Vorgehensweise	29
3.1.1	Erster Schritt: Optimales Airbagsystem für Frühauslösung	29
3.1.2	Zweiter Schritt: Ergänzung durch ein früh ausgelöstes Gurtsystem	30
3.1.3	Dritter Schritt: Gesamtsystemabstimmung und Potentialdarlegung	30
3.1.4	Methodik	30
3.2	Untersuchte Frontal-Lastfälle	32
3.2.1	Drei untersuchte Crashtest-Dummies	32
3.2.2	Untersuchte Crashpulse	35

3.2.3	Zeitliche Auslöseszenarien.....	38
3.2.4	OoP – Out of Position	40
4	Früh ausgelöstes Airbagsystem.....	42
4.1	Neuartige Anforderungen an den Gasgenerator.....	42
4.1.1	Langsame Befüllung des Airbags.....	42
4.1.2	Frühauslösung + konventionelle Auslösezeitpunkte.....	45
4.1.3	Umsetzung Gasgenerator	47
4.2	Neuartige Anforderungen an den Airbag	49
4.2.1	Airbagform.....	49
4.2.2	Ausgleich von höheren Gasverlusten.....	52
4.2.3	Umsetzung Airbag.....	53
4.3	Auslösestrategien	56
4.4	Ergebnisse: OoP-Performance	59
4.4.1	Ergebnisse Versuchsserie 1.....	59
4.4.2	Ergebnisse Versuchsreihe 2.....	60
4.4.3	Nachweis Rückhalteperformance des untersuchten Airbags	63
4.4.4	Zusammenfassung - OoP	64
4.5	Ergebnisse: Früh ausgelöster Airbag mit Serien-Gurtsystem	64
4.5.1	Versuchsauslegung mit APG + ADPS-2T	65
4.6	Zusammenfassung – Früh ausgelöstes Airbagsystem.....	68
5	Frühe Straffung des Sicherheitsgurtes.....	70
5.1	Grenzen für frühe Gurtstraffung.....	70
5.1.1	Fuß- und Bein kinematik.....	70
5.1.2	Gurtgeometrie – Ziehen nach Hinten mit Einschränkungen	72
5.1.3	Vorbeschleunigung des Insassen ohne Freigabe der Rückenlehne	73
5.2	Umsetzung einer längeren Straffung.....	76
5.2.1	Entwicklung einer variablen Gurtaktorik.....	77
5.3	Theoretische weitere Verbesserung durch Rückverschiebung des Sitzes oder Ausklüpfung der Lehne.....	81
5.4	Zusammenfassung – Früh gestraffter Gurt.....	84
6	Gesamtsystemabstimmung: Airbag + Gurtsystem.....	86
6.1	Abstimmung Gurtsystem.....	86
6.1.1	Versteifung des Sitzes	87
6.1.2	Auswahl des Schultergurtaggregate.....	88
6.1.3	Abstimmung des Gurtsystems für Frühauslösung.....	90
6.2	Neuabstimmung Airbagsystem	91
6.2.1	Überarbeitung Gasgenerator	92

6.2.2	Überarbeitung Modulgehäuse – Behebung der Entfaltungsprobleme.....	92
6.2.3	Neuabstimmung Ventdurchmesser.....	94
6.2.4	Volumensteuerung des zweistufigen Airbags	94
6.2.5	Nachweis OoP.....	95
6.3	Beschreibung Rückhaltesystem.....	96
6.4	Abstimmung der Rückhaltesysteme und Validierung des Simulationsmodells für Frühauslösung	97
6.4.1	HIII 50% - EuroNCAP.....	98
6.4.2	HIII 5% - USNCAP.....	101
6.4.3	Versuchsergebnisse Frühauslösung – Vergleich Simulation	102
6.5	Leistung der Rückhaltesysteme bei konventionellen Auslöse-Zeitpunkten.....	113
6.5.1	Neuvalidierung Simulationsmodell.....	113
6.5.2	Vergleich Insassenbelastung bei konventioneller Auslösung mit Basis- Rückhaltesystemen.....	115
6.5.3	Ansätze für mögliche Verbesserungen.....	118
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	120
8	Anhang	126
8.1	Relevante Verletzungskriterien	126
8.1.1	Kopf/Nacken	126
8.1.2	Thorax/Abdomen/Pelvis.....	127
8.1.3	Untere Extremitäten	128
8.1.4	Grenzwerte der Verletzungskriterien für die einzelnen Lastfälle.....	129
8.2	Referenzfahrzeug – Basislastfälle	131
8.2.1	Beschreibung der Rückhaltesysteme des Referenzfahrzeuges.....	131
8.2.2	Insassenbelastungen mit Serien-Rückhaltesystemen	132
9	Abbildungsverzeichnis	136
10	Literaturverzeichnis.....	140

1 Einleitung

Der Schutz der Insassen bildet seit Jahrzehnten einen wesentlichen Aspekt in der Entwicklung von Personenkraftwagen. Einerseits wird versucht, durch aktive Sicherheitssysteme, wie zum Beispiel ESP oder ABS, das Unfallrisiko bzw. die Schwere einer bevorstehenden Kollision zu verringern. Zum Anderen schützen den Insassen im Falle einer unvermeidbaren Kollision immer weiter verbesserte Fahrzeugstrukturen und ausgeklügelte Rückhaltesystemen. Die Summe der Entwicklungen führte dazu, dass sich die Anzahl der im Straßenverkehr getöteten Personen in den vergangenen 40 Jahren deutlich reduziert hat. Im folgenden Diagramm ist diese Entwicklung am Beispiel Deutschland eindrucksvoll zu sehen:

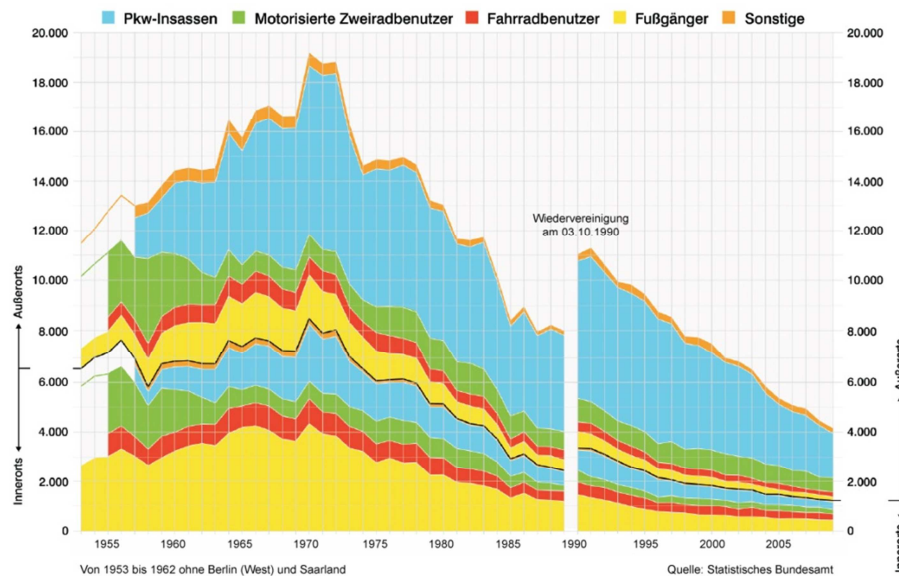


Abbildung 1: Entwicklung der Getöteten im Straßenverkehr seit 1953 in Deutschland ¹

Insbesondere beim, für diese Arbeit relevanten, Anteil der getöteten PKW-Insassen (blaue Bereiche in Abbildung 1) kann ein deutlicher Trend in Richtung einer weiteren Verringerung festgestellt werden, jedoch flacht die Entwicklung langsam ab. Dies liegt daran, dass in der „konventionellen“ Auslegung von Fahrzeugen die „großen Schwachstellen“ behoben wurden und jetzt mit immer größer werdendem Aufwand immer kleinere Potentiale umgesetzt werden können. So sind beispielsweise die Lastpfade moderner Fahrzeuge wesentlich stabiler als noch von 20 Jahren, sodass große Deformationen des Überlebensraumes für den Insassen in der Regel nicht mehr auftreten [38, 2007j]. Rückhaltesysteme wie Airbag oder Gurt sind so ausgelegt, dass sie ihre Schutzwirkung möglichst rasch aufbringen können und dabei die Belastungen für den Insassen innerhalb biomechanischer Grenzwerte halten. Aktuelle Entwicklungen, wie beispielsweise die Adaptivität der Rückhalteeigenschaften von Insassenschutzsystemen, können zu weiteren deutlichen Verringerungen der Insassenbelastungen und somit des Verletzungsrisikos führen, jedoch erfordern derartige Systeme in der Umsetzung auch aufwändige Sensorik und Aktorik sowie komplexe, schnelle und robuste Auslösealgorithmen.

Es muss berücksichtigt werden, dass im Bereich der Infrastruktur, wie beispielsweise der Trassierung von Straßen oder die Auslegung von Fahrbahnbegrenzungselementen, große Verbesserungen erzielt wurden. Letztendlich hat auch die Gesetzgebung, zum Beispiel durch die Einführung von Höchstgeschwindigkeiten, Alkoholkontrollen oder der Anlegepflicht für Sicherheitsgurte, einen wesentlichen Beitrag zu dieser Entwicklung geleistet.

¹ aus [9], Seite 1

Für die Zukunft wurde seitens der Europäischen Kommission die neue Zielsetzung einer weiteren Halbierung der Verkehrstoten bis zum Jahr 2020 und nahe null Verkehrstote bis 2050 formuliert [27, 2011b]. Um diese Ziele erreichen zu können, muss mit den Entwicklungen in der Fahrzeugsicherheit ein weiterer großer Schritt vorwärts gemacht werden.

Eine aktuelle Entwicklungsrichtung mit sehr großem Potential für deutliche Verringerungen des Verletzungsrisikos von Fahrzeuginsassen wird durch die zunehmende Ausstattung von Fahrzeugen mit Umfeldsensoren ermöglicht: Fahrzeuge, die bei Erkennung einer möglichen Kollision autonom bremsen, können bewirken, dass Unfälle überhaupt vermieden werden, oder zumindest die Schwere des Unfalls drastisch reduziert wird. Dies betrifft sowohl die Fahrzeuginsassen als auch die sogenannten „vulnerable road users“ wie beispielsweise Fußgänger beziehungsweise Radfahrer, welche insbesondere im innerstädtischen Bereich nach wie vor einen sehr großen Anteil der Verletzten beziehungsweise getöteten Personen darstellen (siehe Abbildung 1).

Nach der autonomen Bremsung des Fahrzeuges ist der nächste Schritt, den Insassen bei einer erkannten, bevorstehenden, unvermeidbaren Kollision bestmöglich auf diese vorzubereiten. Aktuelle, bereits in Serie umgesetzte Systeme, bringen den Sitz und die Rückenlehne in eine optimale Position, der Gurt wird elektrisch vorgespannt und offene Fenster werden geschlossen. Die Summe dieser Maßnahmen führt zu einem geringeren Verletzungsrisiko für den Fahrzeuginsassen. Die klassischen, passiven Insassenschutzsysteme wie der Airbag oder der pyrotechnische Gurtstraffer werden aber nach wie vor mit den konventionellen, beschleunigungsbasierten Auslösesystemen aktiviert. Aufgrund der Erkennungsdauer und dem notwendigen Zeitraum für die Entfaltung des Airbags kann nicht der gesamte zur Verfügung stehende Weg zur gezielten Abbremsung des Insassen genutzt, was das theoretische Optimum darstellt.

Um diesem Optimum einen Schritt näher zu kommen, können auch irreversible Rückhaltesysteme wie der Airbag oder der Gurtstraffer durch die Kollisionserkennung von Fahrumgebungssensoren ausgelöst werden. Je nach Leistung und der Erkennungssicherheit der Sensorik steht schon frühzeitig mit ausreichender Sicherheit fest, dass es zu einem Unfall kommt. Somit können die Rückhaltesysteme schon zu einem Zeitpunkt ausgelöst werden, bei dem sie schon unmittelbar nach dem Erstkontakt die optimale Schutzwirkung aufbringen können. Damit ist gewährleistet, dass der zur Verfügung stehende Platz im Fahrzeuginnenraum bestmöglich genutzt werden kann. In diesem Zusammenhang ist auch denkbar, dass durch gezielte Maßnahmen, wie beispielsweise eine Rückverlagerung des Sitzes, noch mehr Verzögerungsweg geschaffen wird, um so in weiterer Folge die Belastungen für den Insassen weiter zu reduzieren. Mit derartigen Systemen erscheint es jedenfalls möglich, einen weiteren großen Schritt in Richtung Reduktion der Verletzten oder Verkehrstoten zu machen und somit dem oben erwähnten Ziel von nahe null Verkehrstoten bis zum Jahr 2050 näher zu kommen.

In dieser Arbeit werden die Ergebnisse eines, über vier Jahre laufenden Forschungsprojektes zur Abschätzung des Verbesserungspotentials derartiger Rückhaltesysteme für den Insassenschutz zusammengefasst.

1.1 Ziel der Arbeit - Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist eine Ermittlung des Potentials zur Verbesserung des Insassenschutzes bei Frontalkollisionen durch eine Auslösung irreversibler Rückhaltesysteme, wie beispielsweise einem Airbag oder Gurtstraffer, zu einem Zeitpunkt noch deutlich vor der Kollision. Die Auslösung erfolgt dabei mittels einer Fahrumfeldsensorik, welche in der Lage ist, frühestens 80 Millisekunden vor dem Aufprall die Kollision zu erkennen und ein Signal zur Aktivierung der Rückhaltesysteme abzugeben. Die Umsetzung eines derartigen Sensorsystems ist dabei nicht Teil dieser Arbeit. Da bei der Sensorik nicht von einer Erkennungsrate von 100% ausgegangen werden kann, müssen die Rückhaltesysteme neben der frühzeitigen Auslösung auch für konventionelle Trigger-Zeitpunkte ausgelegt werden. Zu diesem Zweck werden in einer bestehenden Fahrzeugumgebung neuartige Rückhaltesysteme

entwickelt, deren Komponenten an die speziellen Anforderungen bei zwei unterschiedlichen zeitlichen Auslöseszenarien abgestimmt werden müssen. Zur Darlegung des Verbesserungspotentials werden die Insassenbelastungen in definierten Lastfällen mit jenen Werten verglichen, die in der Fahrzeugumgebung mit den Serien-Rückhaltesystemen erreicht werden. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch, dass die neu entwickelten Rückhaltesysteme auch für eine Reihe von verschiedenen Unfallkonstellationen und Unfallschweren, sowie für unterschiedliche Insassen ausgelegt werden, um so eine bestmögliche Vergleichbarkeit mit den Serien-Rückhaltesystemen zu gewährleisten. Diese Arbeit umfasst dabei Untersuchungen für die Beifahrerseite. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Ergebnisse zumindest teilweise auch auf die Seite des Fahrers übertragbar sind. Neben der Abstimmung der Einzelkomponenten für eine optimale Aufprägung der Rückhaltekräfte auf den Insassen ist in dieser Studie auch die Umsetzbarkeit der gefundenen Konzepte von entscheidender Bedeutung.

Den Beginn der Untersuchung stellen theoretische Betrachtungen über mögliche Ansatzpunkte zur Verringerung des Verletzungsrisikos von Fahrzeugpassagieren dar. Schrittweise wird in weiterer Folge versucht, mit möglichst einfachen und robusten Einzelkomponenten dieses theoretische Optimum zu erreichen.

Als zweite Zielsetzung soll erarbeitet werden, welcher technologische Aufwand notwendig ist, um die theoretischen Potentiale umsetzen zu können. Von besonderem Interesse sind dabei folgende Fragestellungen:

- Welches Mindestmaß an Systemvariabilität ist notwendig, um die unterschiedlichen, teils gegenläufigen Anforderungen erfüllen zu können?
- Welche Lastfälle stellen die kritischen Anforderungen für ein Rückhaltesystem dar, welches auf frühe und konventionelle Auslösezeitpunkte abgestimmt ist?
- Welche neuartigen Anforderungen ergeben sich für die Aggregate in Bezug auf die längere Wirkdauer?
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt der Aktivierung von Rückhaltesystemen und dem Verletzungsrisiko für den Insassen?
- Für welche Rückhaltesysteme ist eine frühe Auslösung vorteilhaft?
- In wie weit kann mit derartigen Rückhaltesysteme auch auf Ungenauigkeiten bei der Bestimmung des Kollisionszeitpunktes „reagiert“ werden?
- Mit welchem Hardwarepaket und welcher Auslösestrategie können die beste Gesamtperformance und möglichst robuste Rückhalteeigenschaften erreicht werden?

Die vorliegende Arbeit umfasst neben theoretischen Untersuchungen größtenteils numerische Simulationen mit dem Mehrkörper-Simulationsprogramm Madymo. Die Untersuchungen erfolgen dabei mit einem, mit zahlreichen Versuchsergebnissen korrelierten Simulationsmodell der bestehenden Fahrzeugumgebung, welches um die neuartigen Funktionalitäten erweitert wurde. Zur Absicherung der Simulationsergebnisse werden auch eine Reihe von Schlitten- und Komponentenversuchen mit Prototypen der entsprechenden Aggregate durchgeführt.

Diese Arbeit soll einen Anreiz für die Weiterentwicklung der Fahrumfeldsensorik und den hinterlegten Algorithmen bieten, welche die Voraussetzung für die durchgeführten Untersuchungen darstellen.

1.2 Überblick aktueller Rückhaltesysteme – Stand der Technik

In dieser Arbeit werden in eine bestehende Fahrzeugarchitektur neuartige, noch vor dem Erstkontakt ausgelöste Rückhaltesysteme integriert. Das Ziel ist es zu bestimmen, in wie weit der Insassenschutz durch eine Aktivierung der Rückhaltesysteme vor t_0 verbessert werden kann. Dafür werden verschiedene Rückhaltesysteme untersucht und an die speziellen Anforderungen bei der frühen

Auslösung angepasst. Vor Beginn dieser Untersuchung wird jedoch noch ein Überblick über aktuelle Entwicklungen und Trends im Bereich der Rückhaltesysteme gegeben:

1.2.1 Aufgabe von Rückhaltesystemen - aktuelle Trends

Bei einer Kollision wird das Fahrzeug innerhalb von Sekundenbruchteilen zum Stillstand verzögert. Ohne Rückhaltesysteme würde sich der Insasse im Fahrzeug mit annähernd derselben Ausgangsgeschwindigkeit weiterbewegen bis er mit Teilen des Innenraums (z.B.: Lenkrad, Instrumententafel, Windschutzscheibe,...) in Kontakt tritt. Ein ungebremster Anprall wäre dabei mit einem erheblichen Verletzungsrisiko verbunden. Ganz allgemein besteht die Aufgabe von Rückhaltesystemen darin, die Relativgeschwindigkeit des Insassen im Fahrzeug abzubauen, sodass dabei möglichst geringe Belastungen auf den Insassen wirken.

Entscheidend ist, dass die Einleitung von Rückhaltekräften in den menschlichen Körper so gestaltet wird, dass das Verletzungsrisiko möglichst gleichmäßig über den gesamten Körper verteilt ist. So müssen zum Beispiel der Airbag und der Gurt in ihrer Nachgiebigkeit sehr gut aufeinander abgestimmt werden. Bei einer schlechten Abstimmung kann es beispielsweise passieren, dass zwar einerseits die Brusteindrückung gering ist, die Belastungen auf Kopf und Nacken jedoch kritische Werte erreichen.

Die wichtigsten Lastpfade zur Rückhaltung des Insassen sind der Kontakt im Fußraum, der Kniekontakt an der Instrumententafel, die Beckenrückhaltung durch den Beckengurt sowie durch den Sitz, die Rückhaltung des Oberkörpers durch den Schultergurt und den Airbag, sowie der Airbag als wichtigstes Rückhaltesystem für den Kopf. Durch eine gute Abstimmung dieser einzelnen Lastpfade gelingt es die Summenbelastung des Insassen zu minimieren.

Eine wichtige Aufgabe von Rückhaltesystemen ist auch, unterschiedlich schweren oder großen Insassen ein vergleichbares Schutzniveau zu bieten. Aktuell ist eine Entwicklung zu verzeichnen, vom einfachen Gurtaufroller beziehungsweise Airbag, hin zu komplexen Systemen, die je nach Insasse oder Unfallschwere angepasste Rückhalteigenschaften liefern können.

In modernen Fahrzeugen werden heutzutage schon reversible Rückhaltesysteme noch vor der eigentlichen Kollision aktiviert. Beispielsweise durch eine elektrische Vorspannung des Sicherheitsgurtes oder eine optimale Positionierung der Rückenlehne beziehungsweise der Sitzpolster werden optimale Voraussetzungen für niedrige Insassenbelastungen geschaffen. Diese sogenannten integrierten Insassenschutzsysteme bieten noch großes Potential zur Verringerung des Verletzungsrisikos bei Verkehrsunfällen.

In Zukunft wird es möglich sein, einen Teil der Bewegungsenergie des Insassen durch eine Vorbeschleunigung entgegen der Fahrzeugrichtung schon vor dem eigentlichen Aufprall abzubauen, beziehungsweise durch eine Rückverlagerung des Insassen den effektiven Verzögerungsweg zu vergrößern. Dadurch könnte das Verletzungsrisiko für Fahrzeuginsassen noch deutlich verringert werden.

Im Folgenden werden die wichtigsten Insassenschutzsysteme beschrieben und aktuelle Entwicklungsergebnisse diskutiert.

1.2.2 Gurtsystem

Der Sicherheitsgurt ist nach wie vor das wichtigste Rückhaltesystem im Fahrzeug, wenngleich auch heutige Gurtsysteme im Vergleich zu den ersten Sicherheitsgurten deutlich an Funktionalität gewonnen haben.

Eine Straffung des Gurtes nach Detektion eines Unfalles ist in modernen Fahrzeugen Standard. Dadurch wird die Gurtlose etwa bei einem locker angelegten Gurt oder bei dicker Bekleidung im Winter reduziert und so wertvoller Verzögerungsweg für den Insassen gewonnen. Die Straffung erfolgt üblicherweise im Gurtschloss oder im Aufroller in der B-Säule. Ebenso standardmäßig wird die Maximalkraft im Gurtband begrenzt um den Vorverlagerungsweg im Fahrzeuginnenraum auszunützen

und die Belastungen für die Insassen innerhalb biomechanischer Grenzwerte zu halten. Bei verschiedenen Automobil-Zulieferfirmen gibt es unterschiedliche Aggregate mit konstanten, progressiven oder degressiven Kraft-Weg-Kennlinien zur Auswahl. Aktuelle Entwicklungen ermöglichen durch eine aktive, zeitlich steuerbare Umschaltung von einem hohen auf ein niedrigeres Kraftbegrenzungsniveau eine gezielte Anpassung der Rückhaltekräfte auf die Unfallschwere beziehungsweise auf die Masse des Insassen. Im Optimalfall würde das Gurtkraftniveau mit einem stufenlosen Mechanismus für den jeweiligen Insassen beziehungsweise Unfall eingestellt. Zwei Beispiele für ein derartiges System werden im Folgenden kurz beschrieben:

In einer Studie von Wang et al. [89, 2009g] wird ein Gurtkraftbegrenzer untersucht, bei dem durch Änderung der magnetischen Feldstärke, welche auf ein magnetorheologisches Fluid wirkt, verschiedene Kraftbegrenzungsniveaus eingestellt werden können. Es werden dabei verschiedene Konzepte zur Integration eines magnetorheologischen Dämpfers in den in der B-Säule montierten Gurtaufroller beschrieben und bewertet. Darüber hinaus wurde ein Simulationsmodell des Dämpfers erstellt und anhand eines vereinfachten Insassenmodells die Leistungsgrenzen des Systems abgeschätzt. Die großen Vorteile dieses Konzeptes sind die stufenlose Adaptivität der Rückhaltekräfte und die extrem schnelle Reaktionszeit dieses Dämpfers. Mögliche Einschränkungen für den Einsatz im Fahrzeug ergeben sich durch die Baugröße der Einheit.

Siemens VDO präsentiert in einer Broschüre [77] ein weiteres Konzept zur stufenlosen Adaptivität der Rückhaltekräfte im Gurt. In diesem Fall wird die Selbstverstärkung der Bremswirkung einer Keilbremse genutzt, um den Auszug des Gurtbandes vom Aufroller zu regeln. Je nach Gewicht des Insassen beziehungsweise der Unfallschwere kann innerhalb kürzester Zeit das jeweils notwendige Gurtkraftniveau eingestellt werden. Als besonderer Vorteil wird hervorgehoben, dass die Anpassung der Gurtcharakteristik an die jeweilige Fahrzeugumgebung einfach mittels Softwareänderung möglich ist.

Eine Weiterführung eines vollvariablen Gurtkraftbegrenzers ist die Echtzeit-Regelung der Gurtkraft während einer Kollision. In einer Untersuchung von Griotto et al. [35, 2007h] wird das Verbesserungspotential für den Insassenschutz mit einem derartigen System abgeschätzt. Zu diesem Zweck wurde ein bestehendes Fahrzeugmodell mit Hilfe einer Matlab-Madymo-Kopplung um ein einen geregelten Gurtaktuator und ein geregeltes Airbag-Vent erweitert. Zur Potentialabschätzung wurden Simulationen mit dem geregelten Gurt ohne Airbag, mit dem Standard-Airbag und mit dem geregelten Airbag durchgeführt, wobei für jede Kombination auch verschiedene Zündzeiten untersucht wurden. Das Verbesserungspotential wird dabei durch die Reduktion der Behandlungskosten der verletzten Insassen dargestellt und beträgt je nach Variante zwischen 14 und 31%.

Neben der Adaptivität der Rückhaltewirkung stellt die optimale und schnellst mögliche Ankopplung des Insassen an die Fahrzeugverzögerung einen weiteren aktuellen Entwicklungsschwerpunkt dar. In diesem Zusammenhang spielen auch reversible, noch vor der eigentlichen Kollision ausgelöste Gurtstraffer eine immer wichtigere Rolle. Diese Systeme werden im Abschnitt 1.5 ausführlich beschrieben. Zunächst sollen aktuelle Entwicklungen mit konventionellen Straffaggregaten erläutert werden:

In einer Studie von Zellmer et al. [91, 2005f] werden Kombinationen von Straffungen an den verschiedenen Gurthanbindungspunkten hinsichtlich der auftretenden Insassenbelastungen verglichen. Dabei zeigt sich, dass durch eine Straffung an zwei Anbindungspunkten mit geringem zeitlichen Abstand die Brustbelastung deutlich verringert werden kann. Darüber hinaus wird auch die Vorverlagerung des Dummys reduziert. Wenn das Gurtsystem so ausgelegt wird, dass sich der Dummy gleich weit vorverlagert, wie bei einer einfachen Straffung des Gurtes am Gurtschloss oder Aufroller können sowohl die Brusteingdrückung als auch die Brustbeschleunigung noch weiter reduziert werden. In dieser Studie wurde auch ein „Koppel-Kriterium“ abgeleitet, mit dem auf Basis der Bewegungsenergie des Dummys die Effektivität des Gurtstraffers bewertet werden kann.

Eine ähnliche Untersuchung von Faure et al. [28, 2007d] zeigt das Verbesserungspotential von einer Doppelstraffung hinsichtlich der Belastung der unteren Extremitäten. In einer Reihe von Schlittentests mit unterschiedlichen Dummies wird nachgewiesen, dass die Insassenvorverlagerung bei einer beidseitigen Straffung am Beckengurt um bis zu 30% reduziert werden kann. Damit einher gehen niedrigere Belastungen für Oberschenkel, Knie und Unterschenkel. In dieser Studie wird zusätzlich der statistische Nachweis über die Effektivität der Doppelstraffung im realen Unfallgeschehen erbracht.

Der Gurt trägt maßgeblich zu den Belastungen im Bereich des Oberkörpers wie etwa der Brustbeschleunigung oder der Brusteindrückung bei. Eine aktuelle Untersuchung von Eickhoff et al. [25, 2007c] zeigt wie mit Hilfe einer speziellen Ausführung des Gurtschlusses die Thoraxbelastungen verringert werden können. Das in dieser Studie untersuchte Gurtschloss („Locking Tongue“) verhindert das Durchrutschen des Gurtbandes in Richtung des Beckengurtes. Dadurch wird vermieden, dass die in der Regel höheren Beckengurtkräfte in den Schultergurt übertragen werden. Es erfolgt eine Umverteilung der Last in das Becken wodurch die Brust des Insassen entlastet wird. Abhängig von der Position der Anbindungspunkte des Gurtsystems kann so eine Reduktion der Brusteindrückung um 10 bis 25% erreicht werden. Das fehlende Durchrutschen des Gurtbandes im Gurtschloss führt in weiterer Folge auch zu einer stärkeren Beckenrückhaltung, was eine Verbesserung der Belastungen der unteren Extremitäten erwarten lässt. Bei der vorliegenden Untersuchung wurden aber lediglich Schlittentests ohne Instrumententafel durchgeführt, wodurch aufgrund des fehlenden Kniekontakts für diese Fragestellung keine Aussage getroffen werden kann.

Zuletzt wird noch kurz eine Neuentwicklung beschrieben, die eine als Mischung zwischen klassischem Gurt und Airbag insbesondere für Passagiere im Fahrzeugfonds das Verletzungsrisiko reduzieren soll. Ab dem ersten Quartal 2011 ist in bestimmten Fahrzeugen der Firma Ford ein aufblasbarer Sicherheitsgurt für die Fonds-Sitze als Zusatzausstattung erhältlich [29], [48]. In einem speziell gewebten Gurtband mit einer Reißnaht befindet sich ein schlauchförmiger Luftsack, welcher von einem Kaltgasgenerator innerhalb kürzester Zeit befüllt wird. Von dieser Entwicklung versprechen sich die Erfinder, insbesondere aufgrund einer großflächigeren Einleitung der Rückhaltekräfte, eine Verringerung der Thorax-Belastung. Darüber hinaus soll auch die Nackenbelastung der Insassen deutlich reduziert werden.

1.2.3 Airbagsystem

Seit den 1970er Jahren gewinnt der Airbag als zusätzliches wichtiges Rückhaltesystem an Bedeutung. Mittlerweile gibt es in modernen Fahrzeugen eine Vielzahl an Airbags, die verhindern sollen, dass der Insasse in verschiedenen Unfallsituationen bei Kontakt mit harten Oberflächen Verletzungen erleidet. Je nach Anforderung weisen die verschiedenen Airbagsysteme im Fahrzeug wesentliche Unterscheidungsmerkmale auf. Beispielsweise ist eine der Aufgaben eines Curtain-Airbags im Fall eines Überschlags das Austreten des Kopfes aus dem Seitenfenster zu verhindern. Da ein Überschlag mehrere Sekunden lang dauern kann, muss auch die Standzeit des Curtain-Airbags deutlich länger sein als jene eines Frontal-Airbags, wo der Aufprall innerhalb von Sekundenbruchteilen vorbei ist.

Allen Systemen gemein ist, dass sie schnellst möglich in Position gebracht werden müssen um bestmöglichen Schutz bieten zu können. Dafür sorgen verschiedene Arten von Gasgeneratoren, die entweder pyrotechnisch oder als Hybrid-Gasgenerator (Kombination aus pyrotechnischem Treibsatz und Druckspeicher) ausgeführt sind. Das jeweilige Einsatzgebiet des Airbags bestimmt wiederum die Anforderungen hinsichtlich Gasmenge, Gastemperatur oder Abbrandrate beziehungsweise Fülldruck.

Wie auch beim Sicherheitsgurt ist ein aktueller Entwicklungsschwerpunkt die Adaptivität der Rückhalteeigenschaften an den jeweiligen Insassen beziehungsweise an die Unfallschwere (vgl. [34, 2007g], [70, 2007o]). Die Rückhaltekräfte des Airbags sind maßgeblich von der Dichte des Gewebes, der Füllmenge des Gasgenerators und der Größe der Abströmquerschnitte bestimmt. Bei konstanten Randbedingungen müssten für schwere Insassen kleine Abströmquerschnitte angefertigt

werden und für leichte Personen große Öffnungen, damit dieselbe Verzögerung auf den Insassen wirkt. Dieser Spagat wurde bisher durch einen bestmöglichen Kompromiss aus Vorverlagerung leichter Personen und ausreichender Rückhaltung schwerer Personen erzielt. Die ständig steigenden Anforderungen hinsichtlich des Insassenschutzes seitens gesetzlicher Vorgaben oder Rating-Verfahren können mit diesem Kompromiss allerdings kaum mehr erfüllt werden. Darum wird versucht mit Systemen, die in ihrer Rückhalteleistung einstellbar sind, unterschiedlichen Insassen ein vergleichbar hohes Schutzniveau zu bieten.

Grundsätzlich gibt es mehrere Möglichkeiten, den Airbag auf den jeweiligen Lastfall passend abzustimmen. In einer schon länger zurückliegenden Studie von Ryan et al. [71, 1998c] wird die Effektivität einer pyrotechnisch schließbaren Abströmöffnung im Modulgehäuse mit einer Mehrstufigkeit des Gasgenerators verglichen. Dabei wird insbesondere auch die OoP-Problematik (OoP...Out of Position) bei der Airbagauslösung berücksichtigt. Alternativ zur Öffnung im Modulgehäuse gibt es auch aktuellere Entwicklungen für Abströmöffnungen direkt am Luftsack, die pyrotechnisch geöffnet werden können [86], [4], [54, 2010f]. Je nach Insassengewicht, Sitzposition oder erkannter Unfallschwere wird die Abströmöffnung früher oder später während der Kollision geöffnet, wodurch mehr oder weniger Gas entweichen kann. Somit ändert sich die Härte beziehungsweise die Rückhalteleistung des Airbags.

Eine weitere aktuelle Entwicklungsrichtung im Bereich des Airbagsystems ist die Adaptivität der Luftsackgeometrie. Wie bei der Bemessung der Abströmquerschnitte für die Nachgiebigkeit des Airbags muss auch bei dessen Geometrie ein bestmöglicher Kompromiss aus verschiedenen Anforderungen gefunden werden. Gegenläufige Entwicklungsziele sind dabei ein minimales Anschussrisiko für kleinere oder weiter vorne sitzende Personen beziehungsweise eine gute Ankopplung großer oder weit hinten sitzender Insassen. Durch angepasste Airbagformen soll sowohl für größere als auch kleinere Insassen, beziehungsweise Personen die weiter vorn oder hinten sitzen eine frühest mögliche Ankopplung an die Fahrzeugverzögerung erreicht werden. Im Folgenden werden einige aktuelle Studien auf dem Gebiet variabler beziehungsweise adaptiver Airbagformen vorgestellt:

In einer umfangreichen Untersuchung von Thomas et al. [82, 2005e] wurde ein Konzept eines Airbagsystems mit einer zweistufigen Airbagform ausgearbeitet und in zahlreichen Versuchen getestet. Von Seiten der notwendigen Steuerelektronik für den Airbag unterscheidet sich dieses System nicht wesentlich von heutzutage üblichen Modulkonzepten. Mit einem der beiden Zündkreise wird der einstufige Gasgenerator gezündet. Der zweite dient zur Aktivierung eines Mechanismus, welcher die Fangbänder zur Rückhaltung des Mainpanels freigibt und gleichzeitig auch eine Abströmöffnung im Modulgehäuse verschließt. So wird erreicht, dass sowohl die kleinere als auch die große Airbagform ausreichend gefüllt werden. Neben der Performance dieses Systems in verschiedenen Crash-Konfigurationen mit dem 50%- und 5%-Dummy, wurden auch eine Reihe von OoP-Tests durchgeführt um das Verbesserungspotential dieser Neuentwicklung nachzuweisen.

In einer weiteren Studie von Hoffmann et al. [40, 2007k] wurde anhand von Unfallstatistiken nachgewiesen, dass insbesondere kleine und sehr große Fahrzeuginsassen auf der Beifahrerseite häufig nicht in der Sitzposition sitzen, welche im Gesetz für die Auslegung der Rückhaltesysteme vorgeschrieben ist. Es wird untersucht, inwieweit mit einer dreistufigen Airbagform die Insassenbelastungen reduziert werden können. Als Airbag kommt dabei ein sogenannter „Multi-Surface-Airbag“ [81, 2011d] zum Einsatz, wobei durch die Länge eines innen liegenden Fangbandes die Form definiert wird. Das Verbesserungspotential durch die Adaptivität der Airbagform wird durch den Vergleich mit einem einstufigen „Multi-Surface-Airbag“ nachgewiesen. Bei allen drei untersuchten Dummies konnten mit diesem System jeweils in der vordersten, mittleren und hintersten Sitzposition deutliche Reduktionen des Verletzungsrisikos erreicht werden, insbesondere aufgrund der Verringerung der Kopfbelastung. In zusätzlichen Simulationen mit Menschmodellen konnten die gewonnenen Erkenntnisse bestätigt werden.

Die obigen beiden Papers beschreiben jeweils adaptive Airbaggeometrien mit zwei beziehungsweise drei Stufen. In einer aktuellen Patentschrift von Dong et al. [47, 2011c] wird ein Mechanismus beschrieben, mit dem eine stufenlose Änderung der Airbagform realisiert werden kann. Die Grundidee ist dabei, in Abhängigkeit von bestimmten gemessenen Insassenparametern (Gewicht, Größe, Sitzposition, ...) eine gewisse Fangbandlänge einzustellen.

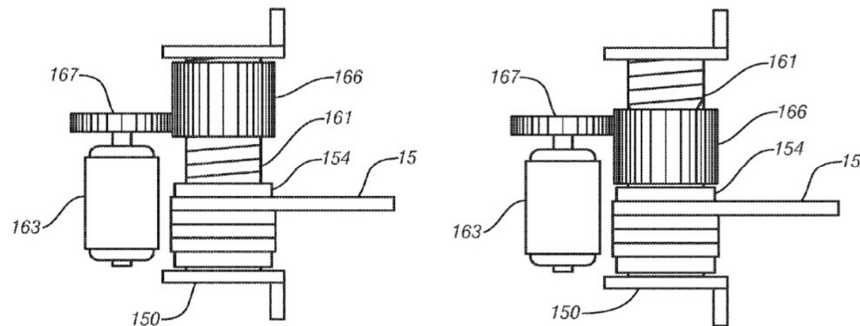


Abbildung 2: Patent eines Mechanismus zur Realisierung einer voll-variablen Airbagform ²

Ein Ausführungsbeispiel dafür ist in Abbildung 2 dargestellt: Das Fangband zur Volumensteuerung (15) ist auf einer Rolle (154) aufgewickelt, welche sich auf einer Gewindestange (161) befindet. Bei der Entfaltung des Airbags wird das Fangband ausgezogen und abgerollt, wodurch sich die Rolle im Gewinde seitlich verschiebt. Zusätzlich befindet sich auf der Gewindestange noch ein Zahnrad (166), welches als Endanschlag für die Rolle dient. Dieses Zahnrad kann durch einen Stellmotor (163) am Gewinde verschoben werden, wodurch die maximale Fangbandlänge eingestellt und damit die Airbagform definiert wird. Ein Airbagsystem mit einer stufenlos einstellbaren Geometrie wurde auch im aktuellen Experimental-Sicherheits-Fahrzeug ESF 2009 vorgestellt [19].

Nicht zuletzt aufgrund der gesetzlichen Anforderungen hinsichtlich OoP stellt die Reduktion der Aggressivität des Airbags bei der Entfaltung eine weitere wichtige Entwicklungsrichtung dar. Hier muss ein Kompromiss zwischen einer schnellst möglichen Positionierung des Airbags für eine frühe Ankopplung des Insassen und einem möglichst sanften Austritt aus der Airbagklappe gefunden werden. Die Befüllung des Luftsackes muss so gestaltet werden, dass bei einem Kontakt des Insassen während der Entfaltung keine kritischen Belastungen überschritten werden.

Eine aktuelle Patentschrift von DePottey et al. [22, 2006a] beschreibt ein passives System, bei dem eine Abströmöffnung im Luftsack freigegeben wird, sobald sich ein Insasse während der Entfaltung zu nahe am Luftsack befindet. Dabei ist ein Band, welches diese Öffnung verschließt mit der Stirnfläche des Airbags vernäht. Sobald nun die Stirnfläche an einem Objekt (z.B.: Kopf des Insassen) ansteht, lockert sich das Band und es gibt die Öffnung frei. So kann Gas aus dem Airbag entweichen und es baut sich ein geringerer Innendruck auf, wodurch die Belastungen auf den Insassen sinken. Ohne Kontakt mit dem Insassen bleibt das Band straff, die Öffnung bleibt verschlossen und der Airbag wird „normal“ gefüllt. Diese Entwicklung wird beim Automobilzulieferer Autoliv als „Safety-Vent Bag“ vorgestellt [4].

1.2.4 Weitere Rückhaltesysteme für den Frontal-Aufprall

Die Kombination von Sicherheitsgurt und Airbagsystem stellt für den Frontalaufprall den Standard dar. Darüber hinaus werden in Fahrzeugen aber auch noch weitere Rückhaltesysteme verbaut, die zusätzlich dazu beitragen, die Belastungen für den Insassen so gering wie möglich zu halten. Im Folgenden werden dazu zwei Beispiele derartiger Systeme kurz vorgestellt und diskutiert:

² aus [47, 2011c], Seite 5

1.2.4.1 Knie Airbag

Das Knie ist in der Regel jener Körperteil, der als erster Kontakt mit dem Fahrzeug-Innenraum hat. Je nach Körpergröße, Gewicht oder Gurtbenutzung kommt es sehr häufig zu Verletzungen unterschiedlicher Schwere [41, 2007I].

In einigen modernen Fahrzeugen wird zur Reduktion des Verletzungsrisikos zwischen der Instrumententafel und den Beinen des Insassen ein kleiner Airbag gezündet, der den Anprall dämpfen soll. In einer aktuellen Untersuchung von Sohr et al. [78, 2009f] wird gezeigt, dass durch den Einsatz eines Knie-Airbags das Risiko für Verletzungen der unteren Extremitäten reduziert werden kann. Positiv wirkt sich dabei insbesondere der Umstand aus, dass der Beckengurt durch eine anteilmäßige Verschiebung der Becken-Rückhaltekraft auf die Oberschenkel entlastet wird. Dies führt in weiterer Folge auch zu einer deutlichen Reduktion der Brusteingdrückung.

1.2.4.2 Anti Submarining Airbag

Im Zusammenspiel mit dem Beckengurt ist auch die Sitzstruktur bei der Beckenrückhaltung von großer Bedeutung. In ungünstigen Fällen kann der Insasse so weit in den Sitzpolster eintauchen, dass der Beckengurt über den Beckenknochen hinwegrutscht und schwere Verletzungen im Unterleib verursacht. Dieser Effekt wird als „Submarining“ bezeichnet. Eine aktuelle Untersuchung von Couturier et al. [15, 2007b] zeigt dabei auf, dass dieser Effekt mit dem heutzutage üblicherweise eingesetzten Frontal-Crashtest-Dummy (Hybrid III, 50%-Mann) nur bedingt abgebildet werden kann. Der Grund dafür ist die im Vergleich zum Menschen relativ steife Lendenwirbelsäule, die die Rotation des Beckens einschränkt. Dieser Effekt wird maßgeblich für das Submarining verantwortlich gemacht. Als Konsequenz bleibt zu beachten, dass auch wenn bei einem Test mit dem Dummy kein Submarining auftritt, dies im „realen“ Unfallgeschehen sehr wohl passieren kann.

Eine aktuelle Entwicklung von Renault [69] adressiert genau dieses Problem. In der Sitzstruktur ist dabei ein „Airbag“ aus dünnen Blechplatten verbaut, welcher mit einem Gasgenerator blitzschnell gefüllt wird. Dadurch wird das tiefe Eintauchen des Beckens verhindert und somit in weiterer Folge die Gefahr für Submarining reduziert.

1.3 Konventionelle Auslösesysteme – Stand der Technik

Um eine optimale Schutzwirkung zu erzielen, ist es notwendig, dass die Rückhaltesysteme so früh wie möglich ausgelöst werden. Je mehr Zeit für die Detektion der Kollision und in weiterer Folge für die Auslösung der Komponenten verstreicht, umso weiter verlagert sich der Insasse infolge der Crash-Beschleunigung im Fahrzeug nach vor. So geht wertvoller Verzögerungsweg verloren und die Insassenbelastungen steigen tendenziell.

Eine zentrale Rolle für den Insassenschutz spielen daher auch die Sensoren und die Algorithmen im Steuergerät, die die Kollision, die Anprallrichtung und die Schwere erkennen und dazu passend unterschiedliche Leistungsstufen der verschiedenen Rückhaltesysteme auslösen.

In den folgenden Abschnitten werden die heutzutage üblichen Auslösesysteme kurz in Aufbau und Funktion beschrieben.

1.3.1 Crash-Sensorik³

Die zentralen Elemente heutiger moderner Auslösesysteme sind die Sensoren, welche dem Steuergerät Informationen über eine Crashesituation (Beschleunigungen, Drehraten, ...) liefern. Auf Basis dieser Messdaten werden je nach Bedarf im Steuergerät Rückhaltesysteme, wie beispielsweise ein Gurtstraffer, aktiviert.

Mit steigender Anforderung an die Insassensicherheit im Fahrzeug stiegen in den letzten Jahrzehnten auch die Anforderungen an die Sensoren zur Erkennung von Kollisionen. So wurde die Entwicklung von mechanischen oder elektromechanischen Sensoren hin zu elektronischen Sensoren vollzogen.

³ vgl. [53, 2006b], Seiten 243-260

Die wichtigsten Sensoren zur Detektion von Frontal-Kollisionen sind die in und quer zur Fahrzeuglängsrichtung angeordneten Beschleunigungs-Aufnehmer. Zur sicheren Erkennung auch von teilüberdeckten Unfällen werden üblicherweise mehrere Sensoren im Fahrzeug angebracht. Die Messung der Beschleunigung erfolgt je nach Sensorausführung über die Änderung eines elektrischen Widerstandes, der Kapazität oder einer Frequenz.

Für eine möglichst schnelle Erkennung und zur Plausibilisierung der Messsignale kommen zusätzlich sogenannte Up-Front-Sensoren zum Einsatz, die direkt im Bereich der Fahrzeugfront montiert werden. Aufgrund der Position im Fahrzeug treten bei einer Kollision wesentlich früher Beschleunigungen auf, wodurch diese letztendlich schneller beziehungsweise sicherer erkannt werden kann.

Eine weitere Absicherung der Messsignale erfolgt durch einen zusätzlichen im Airbag-Steuergerät integrierten Beschleunigungsaufnehmer.

Für andere Kollisionstypen als den Frontalaufprall werden noch weitere Sensoren im Fahrzeug benötigt: Neben den Beschleunigungssensoren spielen auch Überschlagsensoren für die Auslösung von Rückhaltesystemen eine sehr wichtige Rolle. Bei Erkennung eines Überschlages werden Gurtstraffer und Airbags gezündet um den Insassen bestmöglich im Fahrzeug zu fixieren und so Verletzungen durch Kontakt mit dem Innenraum oder ein Ausschleudern bestmöglich zu verhindern. Überschlagsensoren messen die Drehrate des Fahrzeuges um die Längsachse, basierend auf dem Coriolis-Effekt. Eine schwingende Masse wird bei Überlagerung einer Drehung quer zur Schwingrichtung ausgelenkt. Diese zur Drehrate proportionale Auslenkung wird gemessen und dient der Erkennung eines Überschlages.

Abschließend kommen für eine möglichst schnelle Detektion eines Seitenaufpralls neben den Beschleunigungsaufnehmern noch Sensoren zum Einsatz, die den Druckanstieg in der Fahrzeughür infolge der Intrusionen messen.

Alle Messsignale fließen im Airbagsteuergerät zusammen, wo entschieden wird, welche Rückhaltesysteme mit welcher Leistung aktiviert werden. Der Aufbau und die Funktion eines derartigen Steuergerätes werden im Folgenden kurz beschrieben.

1.3.2 Funktionsweise – Kollisionserkennung

Grundsätzlich erfolgt die Auslösung von Rückhaltesystemen, wie dem Airbag oder dem Gurtstraffer, auf Basis von Messsignalen, die proportional zur Unfallschwere sind. Die Beschleunigung kann erst in Zusammenhang mit einer gewissen Wirkdauer genutzt werden, um Abschätzungen über die Unfallschwere tätigen zu können. Im Allgemeinen wird also die Änderung der Geschwindigkeit in einem bestimmten Zeitintervall herangezogen um die Schwere des Unfalls zu prognostizieren und in weiterer Folge gegebenenfalls die Rückhaltesysteme auszulösen. Dabei gibt es einen Unschärfbereich, da sie bis zu einer gewissen Geschwindigkeitsänderung auf keinen Fall ausgelöst werden dürfen (z.B.: Reparatur-Crash-Tests) und ab einer bestimmten Geschwindigkeitsänderung immer auslösen sollen. Üblicherweise werden Airbags abhängig von der Verwendung eines Sicherheitsgurtes in einem Bereich der Geschwindigkeitsänderung zwischen 13km/h und 22km/h ausgelöst [13, 2000].

Bei Rückhaltesystemen mit einer Adaptivität in der aktivierbaren Leistung können die verschiedenen Leistungsstufen bei unterschiedlichen, erkannten Unfallschweren aktiviert werden.

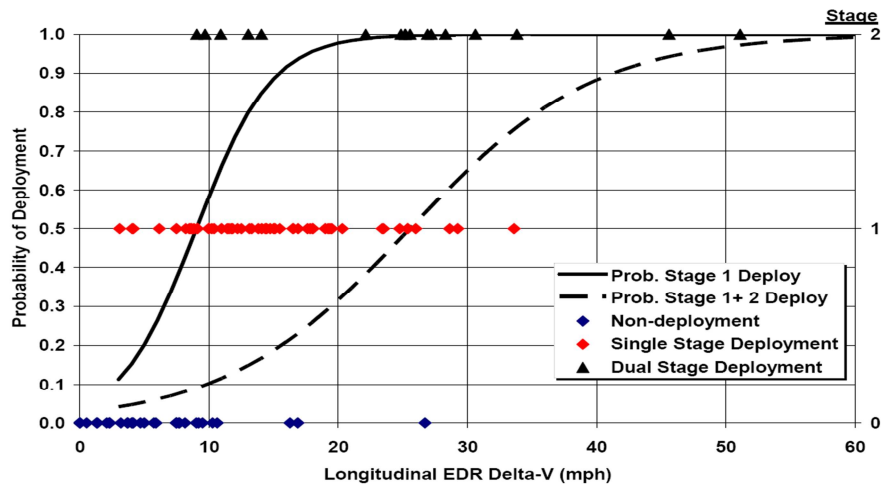


Abbildung 3: Untersuchung der Triggerung des Airbags in Abhängigkeit von der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung (NASS/CDS 2000-2006)⁴

In einer aktuellen, statistischen Untersuchung von Gabler et al. [33, 2008c] wurden Unfalldaten von, mit EDR-Systemen (EDR ...engl.: event data recorder) ausgestatteten, Fahrzeugen hinsichtlich der ausgelösten Gasgenerator-Stufen untersucht. Dabei zeigt sich, dass sich eine 50 prozentige Wahrscheinlichkeit der Auslösung der ersten Stufe bei einer Geschwindigkeitsänderung von etwa 15km/h einstellt. Bei einer Geschwindigkeitsänderung von etwa 41km/h wurden in 50% der Fälle beide Stufen ausgelöst.

1.3.3 Auslösesicherheit

Im Hinblick auf die Auslösesicherheit werden an die Triggersysteme von irreversiblen Rückhaltesystemen sehr hohe Ansprüche gestellt. Die Herausforderung besteht einerseits darin, eine möglichst rasche Auslösung zu erreichen und damit die Ausgangsbasis für niedrigste Insassenbelastungswerte zu schaffen. Andererseits muss gewährleistet werden, dass die Systeme in einer Reihe von so genannten „No Fire“ – Situationen nicht irrtümlich aktiviert werden. Dazu werden auch eigene Testmanöver (z.B.: Überfahren von Bordsteinkanten, etc.) durchgeführt, in denen der Airbag nicht ausgelöst werden darf.

Um den Anforderungen hinsichtlich der Auslösesicherheit zu entsprechen, werden in modernen Airbag-Steuergeräten zahlreiche Plausibilisierungen durchgeführt, bevor ein Airbag tatsächlich aktiviert wird. Darüber hinaus laufen während des Betriebes permanent Fehlerdiagnosen und Selbsttests der Einzelkomponenten ab, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

1.4 Fahrumgebungssensorik & Fahrassistenzsysteme – Stand der Technik

In modernen Fahrzeugen werden vermehrt sogenannte Fahrerassistenz-Systeme (ADAS ...engl.: advanced driver assistance systems) angeboten, die entweder den Komfort steigern oder den Fahrer in kritischen Fahrsituationen unterstützen sollen. Diese Systeme arbeiten in der Regel mit, im Hintergrund ablaufenden Fahrumgebungsmodellen, welche auf Messdaten des Fahrzustandes des Fahrzeuges und auf Fahrumgebungsinformationen basieren. Die Daten des Fahrzustandes, wie zum Beispiel die Fahrgeschwindigkeit oder die Gierate, werden in modernen Fahrzeugen durch serienmäßig verbaute Drehraten-, Drehzahl-, oder Beschleunigungssensoren geliefert. Informationen über die Umgebung des Fahrzeuges (etwaige Kollisionsobjekte, Fahrspur, ...) können mit verschiedenen Systemen, wie beispielsweise Radar, Laserscanner oder Kamerasysteme, gewonnen werden. Dabei haben alle Systeme bestimmte Vor- und Nachteile, weswegen ein zielführender Ansatz für einen maximalen Informationsgewinn die Fusion der Ergebnisse mehrerer Systeme ist [46, 2005b].

⁴ aus [33, 2008c], Seite 4

Im Folgenden werden aktuell untersuchte beziehungsweise im Einsatz befindliche Technologien kurz beschrieben und deren Stärken und eventuelle Einschränkungen betrachtet.

1.4.1 Kamerasysteme

Bei der Kamera-basierten Umfelderkennung kommen je nach Einsatzgebiet Farb- oder Graustufen-Kameras, Mono- oder Stereo-Kamerasysteme zum Einsatz. Ein weiteres Einsatzgebiet umfasst die Verwendung von Infrarotkameras. Der Vorteil von diesen Systemen liegt in ihrer hohen Auflösung der Fahrumgebung und der guten Eignung für eine Objektklassifizierung. Eine Erkennung der Fahrspur für ein Spurhalteassistenzsystem ist ausschließlich mit Kamera-basierten Systemen möglich. Informationen über Distanzen oder Geschwindigkeiten können hingegen nur mit Stereokameras gewonnen werden. Ein Nachteil gegenüber anderen Systemen liegt in der Empfindlichkeit auf Verschmutzung. Zumeist werden Kameras aber hinter der Windschutzscheibe im Wirkungsbereich des Scheibenwischers angebracht, um dieses Problem zu reduzieren [46, 2005b]. Deutliche Einschränkungen in der Funktion ergeben sich während der Dämmerung beziehungsweise in der Nacht.

In der Dissertation von Stefan Vacek [88, 2008h] wird eine weitere Variante eines Kamera-basierten Fahrumgebungssensors untersucht. Der sogenannte Photomischdetektor (PMD-Kamera) ist eine 3D-Tiefenbildkamera, die auf Basis der Laufzeitmessung von Licht arbeitet. Eine Beleuchtungseinheit sendet Infrarotlicht einer bestimmten Amplitude aus, welches an Objekten reflektiert und in der Kamera registriert wird. Durch die Phasenverschiebung kann die Laufzeit und damit die Entfernung zwischen Kamera und Objekt berechnet werden. Diese Kamera arbeitet mit einer Bildfrequenz von 100 Hertz und kann so schnell etwaige Hindernisse in der Fahrspur erkennen. In dieser Arbeit wurden mit verschiedenen Kameras unterschiedliche Aufgabenstellungen untersucht. Zum Beispiel wurde mit einer Farbkamera ein Konzept zur Erkennung von Fahrspuren beziehungsweise Straßenmarkierungen entwickelt und getestet. Weiters wurde die beschriebene PMD-Kamera eingesetzt um eine Hinderniserkennung zu realisieren. Abschließend wurde auch eine Fahrzeugerkennung auf Basis einer Farbkamera realisiert.

In einer Studie von Paintner et al. [68, 2007n] werden weitere Untersuchungen und Überlegungen hinsichtlich der Integration einer PMD-Kamera in ein Fahrzeug beschrieben. Anhand einiger Beispiele (Fahrszenen) wird auch die Leistungsfähigkeit zum Beispiel bei der Erkennung von Fußgängern oder Fahrzeugen demonstriert.

Eine weitere Untersuchung von Könning et al. [51, 2009c] beschreibt das Verbesserungspotential insbesondere für den Fußgängerschutz und die Insassenbelastungen durch den Einsatz von Kamera-basierten Schutzsystemen. Fahrassistenzsysteme, die bei Erkennung einer Kollision Aktuatoren zur reversiblen Straffung des Gurtbandes oder einer Anstellung der Motorhaube aktivieren, sind schon in Versuchsfahrzeugen umgesetzt, jedoch kommen in diesen Fällen Radar- oder Lidar-Sensoren zum Einsatz. Kamera-basierte Systeme kommen bisher hauptsächlich bei Fahrspurassistenzsystemen oder Verkehrsschilderkennung zum Einsatz. Der Trend geht jedoch dahin, möglichst viel Funktionalität aus einem System zu gewinnen. Damit erklärt sich die Motivation, Kameras auch für den Fußgängerbeziehungsweise Insassenschutz einzusetzen. Im Bereich des Fußgängerschutzes unterscheidet man dabei zwischen der direkten und der indirekten Klassifizierung von Fußgängern. Bei der direkten Klassifizierung durch die Informationen der Kamera kommen hauptsächlich Bewegungsmuster sowie Form und Größe als Kriterien in Frage. Bei der indirekten Klassifizierung „ergänzt“ die Kamera herkömmliche auf Beschleunigungssensoren basierende Fußgänger-Erkennungssysteme, um so eine raschere, sichere Entscheidung zur Aktivierung eines Schutzsystems zu erreichen. Anhand von statistischen Daten wird gezeigt, dass mit einer Kamera mit einem Öffnungswinkel von +/- 20° 100% aller tödlichen Unfälle und 86% aller Fußgängerunfälle mit schwerem Verletzungen erkannt werden könnten.

Hinsichtlich des Insassenschutzes kann mit einem Kamerasystem lediglich abgeleitet werden, mit welcher Überdeckung die Kollision erfolgt und um welches Hindernis es sich handelt. Auch für diese Anforderungen erweist sich eine Kamera mit einem Öffnungswinkel von +/- 20° als zielführend und ausreichend. Mit einer Modellierung beziehungsweise Klassifizierung des Hindernisses können auch Daten wie die Masse und Größe des Hindernisses abgeschätzt werden, welche sich direkt auf die Unfallschwere auswirken. Damit stehen zusammen mit Informationen zur Distanz und Aufprallgeschwindigkeit, die mittels Radar- oder Lidar-Systemen gewonnen werden, schon vor der Kollision eine Menge an Informationen zur Verfügung, die genutzt werden können, um den Insassen oder das Fahrzeug bestmöglich auf die bevorstehende Kollision vorzubereiten.

1.4.2 Radar

Die prinzipielle Funktionsweise von Radar-Sensoren (engl. RADAR...Radio Detection and Ranging) basiert auf der Laufzeitmessung zwischen einer gesendeten und nach der Reflexion an einem Objekt empfangenen Radiowelle. Über die Laufzeit der Welle lässt sich die Entfernung zum Objekt berechnen. Bei sogenannten Doppler-Radar-Sensoren kann zusätzlich zur Entfernung, durch eine Änderung der Frequenz auch noch die relative Geschwindigkeit des Objektes ermittelt werden. Nähert sich das Objekt dem Sensor an, erhöht sich Frequenz. Bei einer Vergrößerung der Distanz kann einer Verringerung der Frequenz der Radiowelle gegenüber der Sendefrequenz gemessen werden. Aktuell gibt es verschiedene Ansätze, diese Daten zu einem kontinuierlichen Bild der Fahrumgebung zu verknüpfen. Ein Beispiel dafür ist das Puls-Radar, bei dem einfach in regelmäßigen Abständen Radar-Wellen ausgesendet werden und so auch in derselben Frequenz das Bild der Fahrumgebung aktualisiert wird. Weitere Formen sind das sogenannte „Frequency modulated continuous wave – FMCW“ oder das „Frequency shift keying – FSK“-System. Entscheidend für den Informationsgewinn eines Radar-Systems sind unter anderem der Öffnungswinkel und die räumliche Auflösung des Sensors. Mittels mehrerer Strahlen oder Ablenkmechanismen wird versucht eine größere laterale Auflösung des Messsignals zu erreichen [80, 2004c].

Je nach Einsatz im Fahrzeug als Fernbereichs- oder Nahbereichsradar, kommen unterschiedliche Systeme mit jeweils angepassten Eigenschaften zum Einsatz. Vorteilhaft an Radar-Systemen ist insbesondere, dass sie in ihrer Funktion weniger stark von den Witterungsverhältnissen abhängig sind als beispielsweise Kamera- oder LIDAR-Systeme. Eine Objektklassifizierung, also eine Erkennung worum es sich beim erkannten Objekt handelt, lässt sich mit einem Radar-Sensor aber nur sehr eingeschränkt umsetzen [46, 2005b].

In einem Forschungsbericht von Merz et al. [63, 2007m] wird das Radar-System für die Pre-Safe-Funktionalitäten von Daimler beschrieben. Dabei kommen zwei Nahbereichsradar-Sensoren mit einer Frequenz von 24GHz und ein Fernbereichsradar mit einer Frequenz von 77GHz zum Einsatz. Mit dieser Konfiguration können Objekte bis etwa 150m in einem Sichtkegel mit einem Öffnungswinkel von +/- 6°, sowie bis zu einer Entfernung von 30m mit einem Öffnungswinkel von +/- 40° detektiert werden. Dieses System bildet beispielsweise die Grundlage für den „Abstandsregeltempomat“ oder für die reversible Gurtstraffung [62, 2009e]. Es wird für die Zukunft auch angedacht, Radar-Informationen im Airbagsteuergerät für eine robuste, schnellere Auslösung von Airbags im Fall einer Kollision zu verwenden. In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass die Anforderungen an die Signalaufbereitung für Fahrassistenzsysteme und Insassenschutzsysteme insbesondere hinsichtlich der Dynamik sehr unterschiedlich sind. Zu beachten ist auch, dass mit Radar-Systemen keine Aussagen über Masse und Steifigkeit des Unfallgegners getroffen werden können, welche für die Aktivierung von Insassenschutzsystemen (Gurtstraffer, Airbag, ...) sehr wichtige beziehungsweise entscheidende Informationen darstellen.

Der Verbesserungsansatz im vorgestellten System liegt darin, dass parallel zu den konventionellen Kriterien für die Auslösung eines Airbags (z.B.: Beschleunigungen) auch die Relativgeschwindigkeit berücksichtigt wird. Im Fall einer mittels Radar erkannten, bevorstehenden Kollision, kann die

Auslöseempfindlichkeit im Airbagsteuergerät angepasst werden, um so eine frühere aber trotzdem robuste Aktivierung des Airbags zu erreichen.

1.4.3 Lidar

Hinsichtlich der Funktionsweise unterscheidet sich ein Lidar-Sensor (engl. LIDAR...Light Detection and Ranging) vom Radar nur durch die Verwendung von Laserstrahlen anstelle der Radiowellen. Ein Laserimpuls wird ausgesandt, an einem Objekt reflektiert und zumindest teilweise wieder zur Sendempfangseinheit zurückgestrahlt. Durch die Messung der Laufzeit kann wiederum die Entfernung zum Objekt berechnet werden. Die direkte Geschwindigkeitsmessung, welche beim Radar über den Doppler-Effekt durchgeführt wird, ist mit einem Lidar-Sensor bislang noch nicht umgesetzt. Die Vorteile von diesen Sensoren liegen in der sehr guten Auflösung der Fahrumgebung sowie der Genauigkeit der Entfernungsmessung. Darüber hinaus sind derartige Systeme, zumindest bei höheren Reichweiten, billiger als vergleichbare Radar-Sensoren. Nachteilig wirkt sich aus, dass sowohl Lasersensoren als auch Kameras ein freies Sichtfeld brauchen und ihre Leistungsfähigkeit von den Witterungsbedingungen abhängt. Um eine große laterale Auflösung der Fahrumgebung zu erreichen werden LIDAR-Sensoren als „Multi-beam“-Sensoren oder als scannende Sensoren ausgeführt.

In einer Untersuchung von Fürstenberg et al. [32, 2004b] werden die Möglichkeiten zur Objektverfolgung und Objektklassifizierung im Fahrzeugumfeld mit Hilfe eines mehrzeiligen Laserscanners beschrieben. Als erster Schritt werden in Abhängigkeit von Entfernung der Messpunkte sowie der Fahrgeschwindigkeit einzelne Messpunkte mit geringem Abstand zu sogenannten Segmenten zusammengefasst. Diese bilden die Basis für die Objekterkennung. Anhand der Segmente können die Breite und die Höhe von Objekten ermittelt werden und durch die Änderung der Position der Segmente von Scan zu Scan lässt sich die Relativgeschwindigkeit des Objektes abschätzen. Die Verfolgung eines Objektes funktioniert vereinfacht beschrieben so, dass rund um das erkannte Objekt in Abhängigkeit der Größe des Objektes und der Unsicherheit des Modells ein „Suchraum“ gebildet wird, in dem das Objekt (bzw. die zugehörigen Segmente) im nächsten Scan „gesucht“ wird.

Für die Unterscheidung, ob ein erkanntes Objekt nun ein Fußgänger oder LKW ist wird es hinsichtlich verschiedener Unterscheidungsmerkmale untersucht. Diese sind beispielsweise die Breite, die Länge, die Geschwindigkeit oder die Reflektionseigenschaften des Objektes. Anhand dieser Kriterien wird mittels Wahrscheinlichkeiten bestimmt worum es sich bei dem Objekt handeln könnte.

1.4.4 Sensorfusion

Alle oben beschriebenen Sensoren für sich allein haben Unzulänglichkeiten bei der Erkennung der Fahrzeugumgebung. Es laufen aus diesem Grund viele Untersuchungen, um herauszufinden wie durch die Fusion der Signale von mehreren Sensorsystemen, die funktionellen Einschränkungen der jeweils einzelnen behoben werden können. Im Folgenden werden exemplarisch einige Ergebnisse vorgestellt.

Ein Forschungsbericht von Haberjahn et al. [36, 2010c] beschreibt die Fusion eines mehrzeiligen Laserscanners mit einer Stereokamera auf Basis der Rohdaten dieser beiden Systeme. Zunächst wird zwischen der kooperativen und konkurrierenden Sensorfusion unterschieden, wobei erstere einen „Hauptsensor“ und eine diesen unterstützenden Nebensensor umfasst. Im Fall der konkurrierenden Sensorfusion werden zwei gleichwertige Sensoren zum Einsatz kommen. Dadurch sollen Falscherkennungen verhindert und die Qualität des Umfeldmodells gesteigert werden.

Sowohl die Stereokamera als auch der Laserscanner liefern als Information eine Punktwolke mit den Tiefeninformationen von erkannten Objekten. Diese Punktwolken der beiden Systeme werden zusammengefügt. Man spricht dabei von einer Low-Level-Fusion. Alternativ dazu können auch erkannte Segmente, Objekte oder Trajektorien fusioniert werden. Anhand von Messungen wird demonstriert, wie sich die beiden Systeme ergänzen. In einem Diagramm wird die Abweichung vom gemessenen Objektmittelpunkt aus den Daten der Stereo-Kamera, des Laserscanners und der Fusion der beiden Systeme in einer Reihe von Messungen verglichen. Im Zuge der Messungen sind teilweise

die Ergebnisse des Laserscanners exakter, teilweise jene der Kamera. Der Verlauf der Ergebnisse der fusionierten Sensoren entspricht immer der jeweils besseren Kurve der beiden Einzelsensoren. Neben diesem Vorteil wird auch davon ausgegangen, dass aufgrund der Sensorredundanz das Ausfallrisiko reduziert wird und die Ergebnisse insgesamt stabiler sind.

In einer weiteren Untersuchung von Lüke et al. [57, 2008f] bilden die fusionierten Messdaten eines Radar-Sensors und einem Kamerasystems die Basis für ein automatisches Notbremssystem. Beim eingesetzten Radar-System handelt es sich um Puls-Radar mit einer Trägerfrequenz von 77GHz und einem horizontalen Öffnungswinkel von 56°. Damit sind Informationen über die Entfernung, Relativgeschwindigkeit und die Abmessungen des Objektes verfügbar. Bei der Erkennung eines Objektes mit dem Radar-Sensor allein ist insbesondere ausschlaggebend, ob sich das Objekt bewegt oder bewegt hat. Stehende Objekte, wie beispielsweise ein Fahrzeug am Ende eines Staus, können nicht sicher erkannt werden. Für derartige Situationen kommt eine Kamera zum Einsatz, die diese Schwachstelle des Radar-Sensors ausgleichen soll. Die Bilddaten der Kamera ermöglichen eine robuste Klassifizierung von Objekten. Die Auslösung einer Notbremsung erfolgt nur bei einer Erkennung eines Objektes mit dem Radar-Sensor in Kombination mit der Klassifizierung dieses Objektes als ein potentiell Hindernis durch die Kamera. Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit wurden Versuche durchgeführt, bei denen ein, mit dem Notbremssystem ausgestattetes Fahrzeug mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf ein stehendes Hindernis zufuhr. Dabei zeigte sich, dass bis zu einer Geschwindigkeit von etwa 90 km/h alle Kollisionen vermieden werden konnten. Bei höheren Geschwindigkeiten war der Bremsweg nicht ausreichend, die Anprallgeschwindigkeit wurde jedoch deutlich reduziert.

In den obigen beiden Beispielen kommen jeweils Kombinationen aus einem Kamerasystem und einem Laser- oder Radar-Sensor zum Einsatz. Laser- und Radar-Messsysteme eignen sich gut zur Bestimmung von Entfernungen, Geschwindigkeiten und Abmessungen von Objekten. Zur Klassifizierung eines erkannten Objektes als mögliches Kollisionshindernis eignen sich aber Kamerasysteme wesentlich besser [12, 2008a]. Aus diesem Grund erscheint die Kombination dieser Systeme zielführend und vielversprechend.

1.4.5 Beispiele für aktuelle Fahrassistenzsysteme

In modernen Fahrzeugen kommen vermehrt elektronische Systeme zum Einsatz, die für den Fahrer während der Fahrt zusätzlichen Komfort bieten, beziehungsweise ihn in kritischen Fahrsituationen unterstützen sollen. Dabei wird zwischen Komfortsystemen und sicherheitsrelevanten Assistenzsystemen unterschieden.

Komfortsysteme sind beispielsweise Einparksensoren [39] oder Tempomatsysteme, die gleichzeitig den Abstand zum Vorderfahrzeug konstant halten [85].

Fahrer reagieren in kritischen Fahrsituationen oft nicht schnell genug oder nur zaghaf und verlieren dadurch Weg und Zeit für eine mögliche Verringerung der Kollisionsgeschwindigkeit und damit in weiterer Folge der Unfallschwere. Eine weitere Problemstellung ist das Nachlassen der Aufmerksamkeit eines Fahrers bei eintönigen, langen Fahrten. Diese beiden potentiellen Unfallrisiken werden mit sicherheitsrelevanten Fahrassistenzsystemen adressiert. Es zeigt sich, dass derartige Systeme die Schwächen des Menschen hinsichtlich Reaktion beziehungsweise Konzentrationsfähigkeit sehr gut ausgleichen können. Es gibt aber auch viele Situationen im Straßenverkehr, bei denen beispielsweise flexible oder improvisierte Reaktionen notwendig sind. In derartigen Fällen bieten Fahrassistenzsysteme nach derzeitigem Stand noch keine oder nur minimale Unterstützung für den Fahrer [50, 2008e].

Die ersten Fahrassistenzsysteme mit Sicherheitsrelevanz waren das Anti-Blockier-System (ABS) gefolgt vom elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP). Diese beiden Einrichtungen zählen heutzutage in fast allen Neufahrzeugen zur Standardausrüstung. Aktuelle Entwicklungen betreffen vor allem

Systeme, die durch eine Verkürzung der Reaktionszeit den Anhalteweg von Fahrzeugen reduzieren, um so eine Kollision ganz zu verhindern oder die Unfallschwere zu senken. Darüber hinaus werden derartige Systeme entwickelt, um Unfälle mit Fußgängern zu verhindern oder das Verletzungsrisiko für den Fußgänger zu reduzieren. Insofern haben Notbremsassistenten großes Potential, die Anzahl von Verletzten und Getöteten im Straßenverkehr zu verringern.

In einer Studie von Krafft et al. [52, 2009d] kommt man anhand statistischer Untersuchungen zum Schluss, dass sich das Risiko für tödliche Verletzungen der Fahrzeuginsassen mit einer um etwa 10% geringeren Kollisionsgeschwindigkeit um circa 30% reduziert. Auch das Risiko für schwere Verletzungen verringert sich immerhin um fast 20%. Diese Studie trifft keine Aussage über die Verbesserungen hinsichtlich des Schutzes von Fußgängern.

Im Zuge des EU-Projektes SAVE-U [72] wurde ein Demonstrationsfahrzeug mit einem Sensorsystem bestehend aus einem Nahbereichsradar, einer Infrarotkamera und einer Farbkamera aufgebaut. Ziel war es, durch eine autonome Abbremsung des Fahrzeuges die Anprallgeschwindigkeit und damit das Verletzungsrisiko für einen Fußgänger zu minimieren. In einem Bericht von Meinecke et al. [61, 2005c] werden einige Untersuchungsergebnisse beschrieben. Die automatische Notbremsung wurde dabei derart konfiguriert, dass sie schon sehr früh (ca. 1 Sekunde vor dem möglichen Aufprall) aktiviert wird, wenn auch nur mit vergleichsweise geringer Bremskraft. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Unsicherheit in der Erkennung eines Fußgängers bei so frühen Auslösezeitpunkten noch sehr hoch ist. Trotzdem trägt dieser lange Zeitraum mit geringer Bremskraft auch schon wesentlich zur Verminderung der Fahrzeuggeschwindigkeit bei. Ab jenem Zeitpunkt, ab dem frühestens erkannt wird, dass die Kollision mit einem Fußgänger unausweichlich ist, (etwa 300 Millisekunden vor Kontakt) wird mit der vollen Bremskraft verzögert. Unter diesen Randbedingungen könnte die Anprallgeschwindigkeit bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 40 km/h von etwa 29 km/h auf circa 11 km/h reduziert werden. Dies entspricht einer Verminderung des Risikos für mittlere und schwere Verletzungen um etwa 15%. Die erreichbaren Verbesserungen sind in einem Geschwindigkeitsbereich von 30 bis 50km/h am größten, da Unfallstatistiken zeigen, dass in diesem Rahmen das Verletzungsrisiko für den Fußgänger am stärksten zunimmt.

1.5 Reversible PreCrash-Systeme – Stand der Technik

Reversible Insassenschutzsysteme, welche schon vor einer möglichen Kollision aktiviert werden, sind mittlerweile Stand der Technik. Einige Fahrzeughersteller bieten als Zusatzausstattung Systeme an, die im Fall einer bevorstehenden Kollision, den Insassen aktiv in die bestmögliche Ausgangssituation bringen (vgl.: [83], [16], [3]). Im Jahr 2002 wurde ein derartiges System erstmals von der Firma Daimler in einem Serienfahrzeug, der damaligen S-Klasse (W220) realisiert. Anhand dieses Beispiels werden im Folgenden die neuartigen Funktionalitäten kurz beschrieben.

Während einer kritischen Fahrsituation (Schleudern, Notbremsung, ...) oder bei einer erkannten bevorstehenden Kollision werden verschiedene Systeme aktiviert um den Insassen bestmöglich auf diese vorzubereiten.

Einerseits werden die Sitze in die optimale Position gefahren und die Luftpolster im Sitz aufgeblasen, um eine möglichst stabile Fixierung des Insassen zu erreichen. In weiterer Folge werden die Sicherheitsgurte vom Fahrer und Beifahrer elektrisch gestrafft. Somit wird die Gurtlose minimiert und im Fall einer Kollision eine frühzeitige Ankopplung des Insassen an der Fahrzeugverzögerung erreicht. Der verfügbare Verzögerungsweg kann so optimal ausgenutzt werden, was zum bestmöglichen Schutz des Insassen im Fahrzeug beiträgt.

Andererseits werden die Fenster und das Schiebedach geschlossen, sollten sie geöffnet sein. Für den Fall, dass es während des Unfalles zu einem Überschlag des Fahrzeuges kommt, kann so das Verletzungsrisiko reduziert werden. Ausführlichere Informationen zu diesem System sind in zahlreichen Publikationen (z.B.: [7, 2001a], [74, 2003], [75, 2005d], [62, 2009e]) beschrieben.

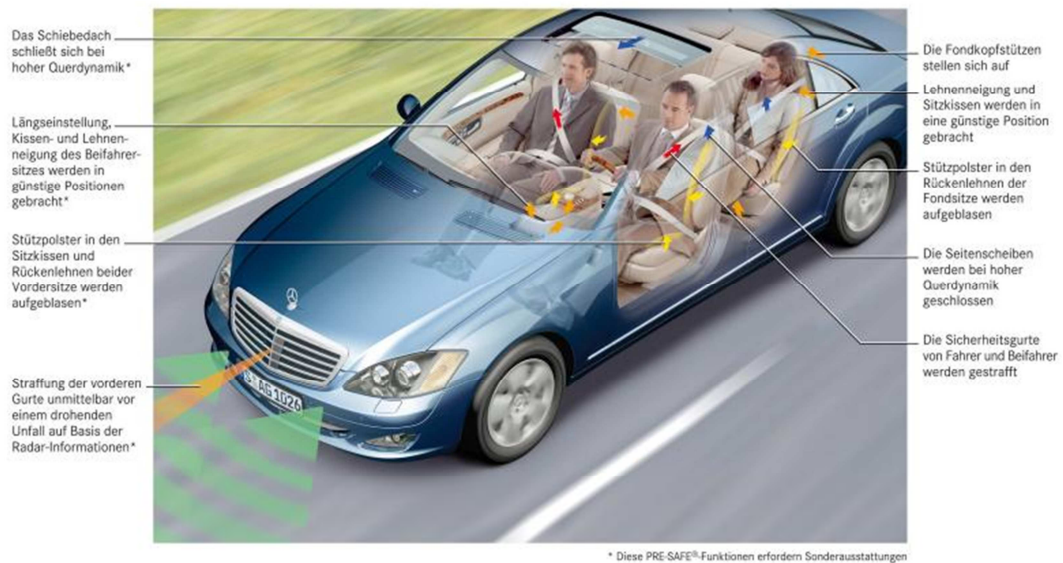


Abbildung 4: Daimler PreSafe-System⁵

Ein ähnliches System aktiviert bei einer möglicherweise bevorstehenden Heckkollision noch vor dem Aufprall einen Verstellmechanismus, welcher die Kopfstützen in eine optimale Position relativ zum Kopf des Insassen bringt. Ziel ist es dabei, das Risiko für Whiplash-Verletzungen zu minimieren. Derartige Systeme sind bei verschiedenen Fahrzeugherstellern im Einsatz.

Im Jahr 2009 wurde bei der 21. ESV-Konferenz in Stuttgart das neueste „Experimental-Sicherheits Fahrzeug“ von Daimler vorgestellt. Neben anderen Neuerungen wurde dabei auch ein System zur Nutzung von PreCrash-Informationen für Seitenaufpralle präsentiert (vgl.: [62, 2009e], [17]). Bei Erkennung einer bevorstehenden Kollision in die Fahrzeugseite wird im Sitz ein Luftpolster aufgeblasen, welcher den Insassen seitlich in Richtung der Fahrzeugmitte anstößt. Einerseits aufgrund der Vorbeschleunigung des Insassen und andererseits durch den gewonnenen Abstand, kann eine deutliche Reduktion der Rippenbelastung erreicht werden.

In einer weiteren Studie von Bauer et al. [6, 2007a] werden verschiedene reversible Rückhaltesysteme hinsichtlich ihres Verbesserungspotentials für den Schutz des Insassen untersucht. Zunächst werden die geringere Aggressivität, die Möglichkeit zur Mehrfachauslösung sowie allgemein die Verbesserung der Rückhaltesysteme als Antriebe für diese Entwicklungen definiert. Als mögliche reversible Aktuatoren werden eine aktive, verstellbare Lenksäule, eine aktive Sitzrampe sowie eine aktive Knieabstützung betrachtet. Darüber hinaus wird auch der Einfluss der früheren Zündung des Airbags untersucht. Auf der Fahrerseite können dabei insbesondere durch die optimierte Positionierung des Lenkrades relativ zum Insassen die Kopfbelastungen um bis zu 45% reduziert werden. Beifahrerseitig lassen sich durch eine frühe Zündung des Airbags beziehungsweise durch das Ausfahren der reversiblen Knieabstützung sowohl die Kopf- als auch Brustbelastungen um bis zu 20% verringern.

Die heutzutage erreichbare Erkennungssicherheit von möglichen bevorstehenden Unfällen ist ausreichend, um reversible Insassenschutzsysteme noch vor dem Erstkontakt auszulösen. Wenn es trotzdem zu einer irrtümlichen Auslösung beispielsweise eines elektrischen Gurtstraffers kommt, führt dies mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht zu einer derartigen Beeinträchtigung des Fahrers, sodass es im schlimmsten Fall zu einer Falschreaktion kommt.

1.6 Untersuchungen zu irreversiblen PreCrash-Systemen

Die große Herausforderung bei der Auslösung eines irreversiblen PreCrash-Systems liegt darin, zu gewährleisten, dass es zu keiner Falschauslösung kommt, da diese mit schwerwiegenden Folgen

⁵ aus [16]

verbunden sein kann. Bisher gibt es noch kein Serienfahrzeug, in dem ein irreversibles Insassenschutzsystem, wie beispielsweise ein Airbag oder ein pyrotechnische Gurtstraffer, ausgelöst werden. Hinsichtlich der Anforderungen an die Erkennungssicherheit muss allerdings zwischen verschiedenen Arten von irreversiblen PreCrash-Systemen unterschieden werden:

Es gibt Ideen für Systeme, die bei einer erkannten bevorstehenden Kollision gezielt die Steifigkeit der Fahrzeugstruktur verändern. Ein anschauliches Beispiel dafür wurde dabei wiederum im aktuellen „Experimental-Sicherheits Fahrzeug“ von Daimler vorgestellt [62, 2009e], [18]: Erkennen Sensoren, dass es zu einem Seitenaufprall kommt, werden Strukturbauteile in der Tür des Fahrzeuges mit einem Gasgenerator „aufgeblasen“. Dadurch wird dasselbe Bauteil deutlich steifer hinsichtlich Biegung. In Versuchen konnte gezeigt werden, dass sich die Intrusionsgeschwindigkeit bei verschiedenen Seitenaufprall-Testkonfigurationen um über 20% reduziert. Dieses System erhöht also gezielt die Steifigkeit der Tür, wenn ein Unfall bevorsteht.

Im Vergleich dazu gibt es auch PreCrash-Systeme, mit denen insbesondere den Anforderungen des Fußgängerschutzes entsprochen werden soll. Diese Systeme erzeugen gezielt Nachgiebigkeiten im Bereich der Fahrzeug-Front, wenn erkannt wird, dass es zu einer Kollision mit einem Fußgänger kommt. Ein Beispiel für ein derartiges System wird in der Untersuchung von Fredriksson et al. [31, 2007f] beschrieben. Unmittelbar vor dem Erstkontakt wird dabei ein Airbag an der Fahrzeugfront aufgeblasen, um das Verletzungsrisiko für Fußgänger beim Anprall zu minimieren. Ähnliche Systeme verfügen über eine anstellbare Motorhaube in Kombination mit einem Airbag, welcher den unteren Bereich der A-Säule abdeckt, um einen möglichst „weichen“ Aufprall eines Fußgängers zu erreichen [5]. Bei diesen Systemen ist allerdings eine Auslösung noch vor Erstkontakt nicht notwendig, da auch nach einer Kontaktsensierung noch genügend Zeit bleibt, um die Motorhaube anzustellen, beziehungsweise den Airbag zu füllen.

Derartige Systeme führen bei einer „ungewollten“ Auslösung dazu, dass eine Reparatur oder ein Austausch einzelner Teile im Fahrzeug notwendig werden. Die Gefahr, dass es erst durch die Falschauslösung infolge der Beeinträchtigung des Fahrers (z.B.: Erschrecken, ...) zu einem Unfall kommt, ist eher als gering einzuschätzen.

Im Gegensatz dazu birgt ein irrtümlich ausgelöster Airbag natürlich das sehr große Risiko, dass der Fahrer stark beeinträchtigt wird und es in weiterer Folge zu einem Unfall kommt. Ähnlich, wenn auch vielleicht nicht so gravierend wie beim Airbag, ist die Ablenkung durch die Auslösung eines pyrotechnischen Gurtstraffers. Eine Falschauslösung muss also unter allen Umständen verhindert werden. Dementsprechend hoch sind die Anforderungen an die Umfeldsensorik und die Crashalgorithmen, welche eine Auslösung eines Rückhaltesystems einleiten oder unterdrücken.

Es wurden bereits einige Studien durchgeführt, bei denen das Potential bezüglich der Verbesserung des Insassenschutzes durch eine Auslösung von Rückhaltesystemen schon vor Kollisionsbeginn analysiert wurde. Diesen Untersuchungen liegt, wie auch dieser Arbeit, die Annahme zu Grunde, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt vor Erstkontakt die Kollision sicher erkannt wird. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen kurz diskutiert.

In einer detaillierten Untersuchung von Wohllebe et al. [90, 2006d] wird die Entwicklung eines früh ausgelösten Airbagsystems beschrieben. Zunächst wird anhand statistischer Untersuchungen abgeleitet, dass etwa ein Drittel aller, an Unfällen im Straßenverkehr beteiligten Personen mit einem derartigen System adressiert und besser geschützt werden könnten. Im nächsten Schritt werden die Anforderungen an das Airbagsystem, die sich aus In-Position- und Out-Of-Position-Erfordernissen ergeben, zusammengefasst. Neben der Frühauslösung wird auch gefordert, dass bei konventionellen Auslösezeitpunkten in etwa derselbe Schutz geboten wird, den auch ein aktuelles, konventionelles Airbagsystem bietet. Unter diesen Voraussetzungen wurde ein PreCrash-Airbag entwickelt, welcher ein im Vergleich zum Serienairbag um 30%-größeres Volumen ausweist. Mit diesem Luftsack im „alten“ US-NCAP-Rating ein um etwa 43% geringeres Risiko für eine AIS3+-Verletzung (AIS... engl.: abbreviated injury scale) erreicht werden. In einer Reihe von Versuchen wurde auch

nachgewiesen, dass in OoP-Lastfällen durch die weniger aggressive Befüllung des Luftsackes eine deutliche Reduktion der Insassenbelastungen erreicht werden kann. In dieser Studie bleibt allerdings die Frage nach einer Gesamtstrategie für ein früh ausgelöstes Airbagsystem unbeantwortet. Wie kann neben dem betrachteten 50%-Dummy auch für größere oder kleinere Fahrzeuginsassen eine derartige Verbesserung erreicht werden. Welche Belastungen treten auf, wenn derselbe Airbag zu konventionellen Triggerzeiten ausgelöst werden muss, weil die Umfeldsensorik die Unfallsituation nicht zweifelsfrei erkennen kann? Zuletzt umfasst diese Untersuchung auch nur einen früh ausgelösten Airbag. Mögliche Potentiale durch eine frühere Straffung des Gurtbandes werden nicht aufgezeigt.

In einem Vortrag von Fredin et al. [30, 2007e] werden allgemein Schritte vorgeschlagen, um in Zukunft weitere Verbesserungen im Bereich des Insassenschutzes zu erreichen. In Bezug auf den Insassen dienen dabei die Minimierung des „Freiflugweges“, die Reduktion der Aggressivität und die optimale Ausnutzung des verfügbaren Verzögerungsweges als grundlegende Ansatzpunkte. Um dies zu erreichen, wird eine Auslösung von Rückhaltesystemen 80 Millisekunden vor dem Aufprall empfohlen. Während diesem Zeitraum werden das Fahrzeug und der Insasse auf den Unfall vorbereitet, damit dann ab Erstkontakt die bestmögliche Ankopplung an die Fahrzeugverzögerung erreicht wird. Mittels der Simulationsergebnisse einer Untersuchung auf der Fahrerseite wird das Verbesserungspotential einer derartigen Auslösevariante verdeutlicht. Darüber hinaus wird eine Kombination aus einer Stereokamera und einem Radarsensor (24 GHz) als mögliche Auslösesensorik vorgeschlagen. Beide Systeme sind erprobt und bei verschiedenen Fahr-Assistenzsystemen im Einsatz. Durch Fusion dieser beiden Systeme werden die Schwächen und Probleme der einzelnen Systeme aufgehoben. Abschließend wird auch noch eine mögliche Strategie für die schrittweise Einführung von PreCrash-Systemen in mehreren Generationen beschrieben. In dieser Untersuchung werden einige Ansätze mit Prinzipergebnissen belegt, eine Gesamtstrategie für alle zu erfüllenden Anforderungen (unterschiedliche Insassen, Lastfälle, frühe und konv. Auslösung, OOP) bleibt jedoch offen.

Hahn et al. untersucht in einer Studie [37, 2007i] das Verbesserungspotential von einer frühzeitig ausgelösten Knie- beziehungsweise Fußabstützung sowie einem aktiv absenkbareren Sitz. Dabei zeigt sich, dass im Fall des US-NCAP-Lastfalles deutliche Reduktionen der Beckenbeschleunigung sowie der Brusteingdrückung erreicht werden können. Beim ungegurteten FMVSS208 ergeben sich hauptsächlich Verringerungen der Oberschenkelkräfte sowie der Knie-Verschiebung.

Zuletzt wurden in einer Studie von Adomeit et al. [1, 2009a] die Auswirkungen einer frühzeitigen, lang anhaltenden Straffung des Gurtes auf die Belastungen des Insassen untersucht. Es wird davon ausgegangen, dass 100 Millisekunden vor Erstkontakt die Information vorliegt, dass es zu einem Unfall kommt. Die untersuchten Rückhaltesysteme setzen sich aus zweistufigen Straffern am Schultergurt und Beckengurt-Endbeschlag und einem einstufigen Straffer am Gurtschloss zusammen. Darüber hinaus kommen ein Dämpfungssystem im Sitz, eine in Fahrtrichtung verschiebbare, aktive Rückenlehne und ein aktiver Knie-Polster zum Einsatz. Unter diesen Randbedingungen und einem Beginn der Straffung 80 Millisekunden vor t_0 gelingt es, den Insassen fast 100 Millimeter entgegen der Bewegungsrichtung vorzubeschleunigen, bevor es aufgrund des Crashpulses zur Bewegungsumkehr kommt. Der gewonnene Weg und die schon vor dem Anprall abgebaute Bewegungsenergie führen zu sehr niedrigen Belastungswerten. Einige Fragestellungen müssten allerdings untersucht werden, bevor ein derartiges System in einem PKW umgesetzt werden kann. Unter anderem muss insbesondere geklärt werden, wie die Gurtgeometrie (Positionierung der Anbindungspunkte) gestaltet sein muss, damit Insasse während der Straffung effektiv nach hinten gezogen werden kann ohne dabei das Risiko eines Hochrutschens des Beckengurtes über den Beckenknochen zu erhöhen. Darüber hinaus bleibt auch offen, wie ein System aufgebaut sein muss, welches neben der frühen Auslösung auch mit konventionellen Auslösezeiten im Fall einer Nicht-Erkennung der Sensorik ausreichend guten Insassenschutz bieten soll.

2 Theoretisches Potential irreversibler Rückhaltesysteme (Airbag, Gurt)

Die Umfeldsensorik in einem Fahrzeug erkennt eine bevorstehende Kollision und kann mit Sicherheit ausschließen, dass diese etwa durch eine Vollbremsung verhindert werden könnte. Plausibilisierungen der Signale werden durchgeführt, sodass eine Fehlinterpretation der Verkehrssituation praktisch ausgeschlossen ist. Mit dem Fahrungsmodell wird der Zeitraum bestimmt, der bis zum Aufprall noch vergehen wird. Unter diesen Voraussetzungen wäre es denkbar, beispielsweise einen Airbag so zu zünden, dass er genau zum Zeitpunkt der Kollision schon voll entfaltet ist und von Beginn der Vorverlagerung des Insassen an Rückhaltekräfte aufbringen könnte. Eine weitere Möglichkeit wäre, den Sicherheitsgurt schon zu einem frühen Zeitpunkt zu straffen, um eine noch bessere Ankopplung des Insassen zu erreichen bzw. ihn vielleicht sogar entgegen der Fahrtrichtung vorzubeschleunigen. Daraus ergeben sich einige mögliche Potentiale, die eine wesentliche Reduktion der Insassenbelastung versprechen.

Eine Falschauslösung muss in jedem Fall verhindert werden, weil es durch die Ablenkung oder Beeinträchtigung des Fahrers im schlimmsten Fall zu einem Unfall kommen kann. Die Anforderungen an die Sensorik und die hinterlegten Fahrungsmodelle wurden im Kapitel 1.4 näher erläutert. Hier sollen zunächst die einzelnen theoretischen Verbesserungspotentiale beschrieben werden.

2.1 Größere Airbagform – mehr Vorverlagerungsweg für Fahrzeug-Insassen

Im Verlauf einer Kollision verlagert sich der Insasse infolge der Verzögerung im Fahrzeuginnenraum nach vorn. Je später der Airbag den Insassen zurückhält, umso größer muss die Rückhaltewirkung sein, damit im schlimmsten Fall ein Durchschlag auf die Instrumententafel oder die Windschutzscheibe verhindert werden kann. Bis der Airbag tatsächlich Rückhaltekräfte auf den Insassen aufbringen kann, vergeht allerdings ein gewisser Zeitraum: Je nach Lastfall benötigt die konventionelle Crash-Sensorik circa zwischen 10 und 35 Millisekunden, um die Kollision zu erkennen und ein Zündsignal abzusetzen. Von diesem Zeitpunkt an braucht der Beifahrerairbag weitere etwa 35 Millisekunden bis er voll entfaltet ist und Rückhaltekräfte auf den Insassen aufbringen kann. Es vergehen also bei konventioneller Auslösung des Airbags bis zu 70 Millisekunden, in denen sich der Insasse aufgrund der Fahrzeugverzögerung vorverlagert. Je nach Unfallschwere nähert sich der Kopf des Insassen in diesem Zeitraum bis zu etwa 15 Zentimeter an die Instrumententafel an. In Abbildung 5 sind die beiden unterschiedlichen Sitzpositionen des Insassen ersichtlich.

Während dieses Zeitraums wird er nur durch den Sicherheitsgurt zurückgehalten. Dieser kann den Insassen jedoch aufgrund der Gurtlose und des flachen Winkels zwischen Schultergurt und Dummy anfänglich nicht effektiv zurückzuhalten. Die Vorverlagerung des Dummies ist insbesondere auch abhängig vom Beschleunigungsverlauf. Im Allgemeinen reduziert sich der Verzögerungsweg für den Insassen infolge der Vorverlagerung bei schweren Unfällen dabei stärker als bei leichten Kollisionen, eine späte Ankopplung wirkt sich also doppelt negativ aus.

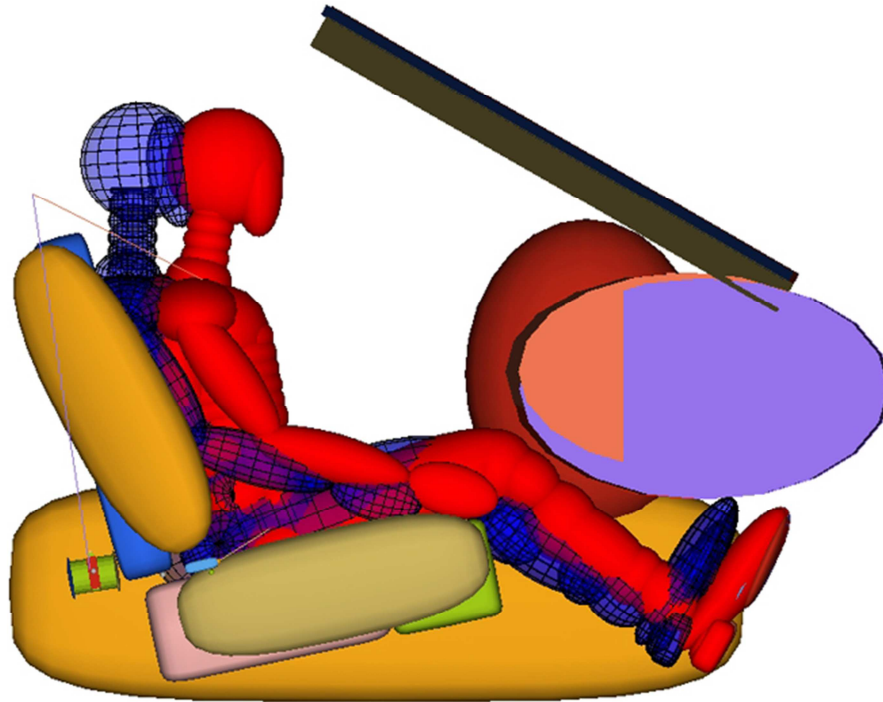


Abbildung 5: Sitzpositionen des 50%-Dummys: blau: Normsitzposition, rot: vorverlagerte Sitzposition ca. 70ms nach t_0

Durch eine frühe Auslösung des Airbags kann diese „Totzeit“, in der sich der Dummy vorverlagern kann, deutlich reduziert werden. Durch eine geeignete Form des Airbags ist es auch denkbar, dass der Insasse vor der Vorverlagerung noch in die Gegenrichtung vorbeschleunigt wird. Dadurch könnte noch weiterer Verzögerungsweg gewonnen werden.

Um die Größenordnung dieses Verbesserungspotentials abschätzen zu können, wird folgende stark vereinfachte Überlegung vorgenommen. Ein Insasse wird von der angenommenen Ausgangsgeschwindigkeit von 56km/h (entspricht der Einlaufgeschwindigkeit US-NCAP-Test) innerhalb verschiedener betrachteter Wege unter Annahme einer konstanten Verzögerung bis zum Stillstand abgebremst. Dabei hat er ausgehend von seiner normalen Sitzposition ca. einen halben Meter Weg, bevor er mit dem Kopf die Instrumententafel trifft. Für minimale Belastungswerte sollte dieser Weg bestmöglich ausgenutzt werden, wobei immer ein minimaler Sicherheitsabstand zur Instrumententafel eingehalten werden muss. Aus Abbildung 5 wird abgeschätzt, dass sich der Insasse innerhalb der ersten 70 Millisekunden etwa 10 Zentimeter ohne wesentliche Rückhaltung vorverlagert hat. Es bleiben also circa 40 Zentimeter für die Verzögerung. Für den Fall des früh ausgelösten Airbags wird angenommen, dass die Airbagform sehr knapp zum Kopf des Insassen reicht und innerhalb weniger Zentimeter die volle Rückhaltewirkung aufgebaut ist. Es steht also nahezu der gesamte Freiraum für die Verzögerung des Insassen zur Verfügung. Als dritte Variante wird eine Airbagform angenommen, die den Insassen noch vor der Kollision schon leicht in den Sitz drückt. In der folgenden Abbildung sind die Geschwindigkeitsverläufe und die Verläufe der mittleren Verzögerung für diese drei Fälle dargestellt:

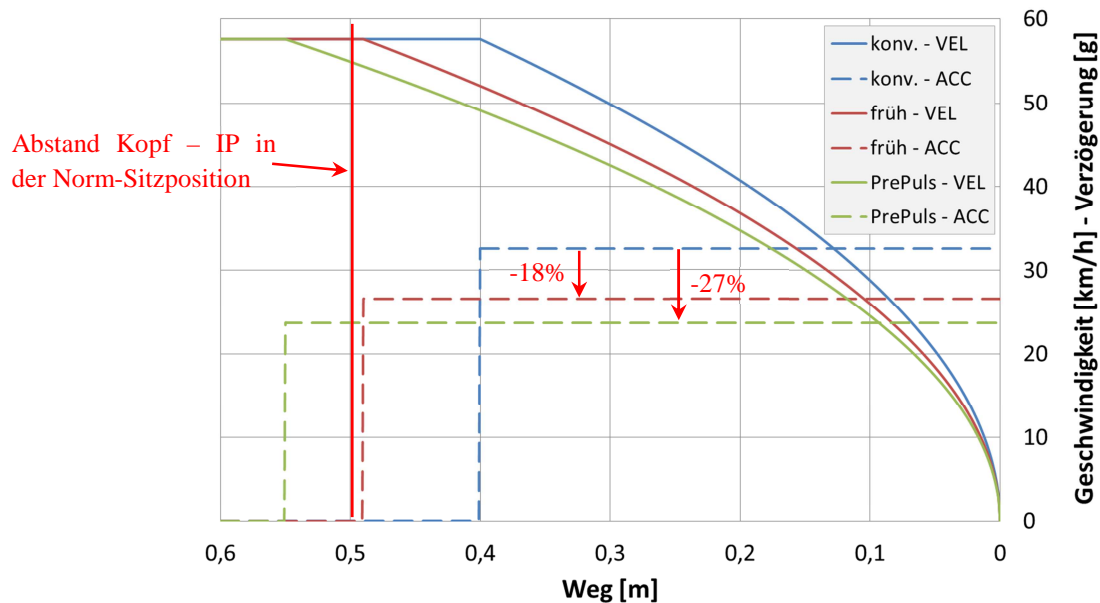


Abbildung 6: Zusammenhang mittlere Verzögerung und Verzögerungsweg

Dabei zeigt sich, dass durch die frühere Ankopplung des Insassen mit dem früh ausgelösten Airbag die mittlere Verzögerung rund 20% niedriger liegt als bei der konventionellen Auslösung. Durch die Vorbeschleunigung entgegen der Fahrtrichtung ließe sich die mittlere Verzögerung gegenüber der Ausgangssituation um fast 30% reduzieren.

Wie viel von diesem theoretischen Potential umgesetzt werden kann, hängt sehr stark von einigen Randbedingungen ab: Sind der Insasse und dessen tatsächliche Sitzposition bekannt? Wenn nicht, muss zwischen dem Airbag und dem Insassen Platz frei bleiben um einen Anschluss des Insassen zu vermeiden. Im realen Unfallgeschehen gibt es jedoch nicht den Insassen und die Sitzposition. Mit welcher Akrobatik und welcher Auslösestrategie kann so ein Konzept umgesetzt werden und wie kann man für möglichst alle Insassenklassen einen vergleichbaren Schutz bieten? Es gibt Ideen und für stufenlos einstellbare Airbaggrößen (vgl. [47, 2011c], [19]), die in Kombination mit einer Insassenklassifizierung und Sitzpositionserkennung in dieser Hinsicht sicher am vielversprechendsten wären. Bezüglich der technischen Realisierung kann aber vorerst eher von einer zwei- oder mehrstufigen Variante ausgegangen werden.

Mit einer einzigen Airbagform erscheint es jedenfalls nicht möglich durch eine frühe Auslösung Verbesserungen im Crashverhalten zu erreichen. Diese Form könnte aufgrund vieler gegenläufiger Anforderungen (z.B.: 5%-Frau bei konventioneller Auslösung vs. 95%-Mann bei früher Auslösung) nicht größer gestaltet werden als jene heutiger Serien-Airbags.

Ziel ist es in jedem Fall, sich mit einer technisch umsetzbaren, robusten Variante diesem Optimum anzunähern.

2.2 Weniger aggressive Airbag-Entfaltung – OoP

Der Airbag leistet einen sehr großen Beitrag zum Schutz des Insassen, insbesondere bei der Reduktion von Kopf- und Nackenbelastungen. Im realen Unfallgeschehen traten aber schon Fälle auf, bei denen Insassen und insbesondere Kinder durch Kontakt mit dem Airbag während dessen Entfaltung schwere oder sogar tödliche Verletzungen erlitten [67, 2001c].

Wie im vorigen Kapitel beschrieben, spielt die möglichst rasche Positionierung des Luftsackes bei der Auslegung des Airbagsystems eine wesentliche Rolle. Die große Gasmenge, die dafür in kürzester Zeit freigesetzt werden muss, kann jedoch auf den Insassen enorme Belastungen ausüben, wenn sich dieser nicht in seiner vorgesehenen Position befindet und dadurch mit dem Airbag während dessen Entfaltung in Kontakt gerät. Diese Problematik tritt in verstärkter Form in den USA auf, da die Airbags aufgrund der gesetzlich vorgeschriebenen, ungegurteten Lastfälle leistungsstärker sein müssen

als in Europa. In den USA gibt es aus diesem Grund auch gesetzlich vorgeschriebene Zulassungstests, bei denen die Belastungen auf Dummies durch den direkten Anschluss mit einem Airbag reglementiert werden. In der folgenden Abbildung ist beispielhaft die Testkonfiguration mit dem dreijährigen Kind in der Position 2 (Kopf vor Instrumententafel) dargestellt.



Abbildung 7: OoP-Test, HIII 3y, Position 2

Diese Tests bilden gegenläufige Anforderungen an die Gasgeneratoren, da dafür eine möglichst sanfte Entfaltung anzustreben wäre.

Im Fall, dass eine bevorstehende Kollision schon frühzeitig erkannt wird, könnte die Befüllung über einen längeren Zeitraum vorgenommen werden. Damit sollten eine wesentlich weniger aggressive Entfaltung des Airbags und eine deutliche Reduktion des Verletzungsrisikos bei einem Anschuss des Insassen durch den Luftsack einhergehen.

Ein aktueller Serienairbag auf der Beifahrerseite hat ein Volumen von etwa 120 Liter, welches im Fall einer Kollision innerhalb von rund 35 Millisekunden gefüllt wird. Auf den Insassen können dadurch ab etwa 40 bis 60 Millisekunden nach dem Erstkontakt Rückhaltekräfte ausgeübt werden. Im Vergleich dazu, muss bei dem frühzeitig ausgelösten Airbagsystem von einem größeren Airbag ausgegangen werden. Wenn man annimmt, dass sich der Insasse erst einige Millisekunden nach dem Erstkontakt vorverlagert und der Airbag schon 80 Millisekunden vor t_0 gezündet wird, kann der Luftsack über einen Zeitraum von 100 bis 120 Millisekunden vergleichsweise sanft befüllt werden. Das zu befüllende Volumen ist zwar etwas größer, (etwa 15% bei einem Volumen des früh ausgelösten Airbags von 140 Liter) die Befüllung erfolgt allerdings über einen rund dreimal so langen Zeitraum wie beim konventionell ausgelösten Airbag. Durch die entsprechend kleineren Druckgradienten bei der Entfaltung, ergibt sich ein geringeres Verletzungsrisiko für den Insassen im Falle eines Kontaktes mit dem Airbag.

Bei einer Abschätzung des Verbesserungspotentials für OoP-Szenarien durch die langsame Befüllung des Airbags muss allerdings berücksichtigt werden, dass der Luftsack genügend Leistung haben muss, um die Airbagklappe in der Instrumententafel sicher zu öffnen. Wenn man von einer mechanischen Öffnung der Klappe absieht, kann also nicht angenommen werden, dass die Insassenbelastungen linear zur Verlängerung der Befüllungsdauer abnehmen.

Im Fall, dass ein Fahrzeug über einen mehrstufigen Gasgenerator verfügt, darf bei der Auslegung des Airbags für OoP nicht eine beliebig niedrige Gasgeneratorleistung ausgelöst werden. Es ist vom Gesetz aus erforderlich, dass mit ein und derselben Gasgenerator-Konfiguration auch ein Frontal-Aufprall (26km/h, voll überdeckt gegen eine starre Barriere) mit dem nicht angegurtenen 50%-Dummy durchgeführt werden muss. Diese Anforderung bestimmt die Minimalleistung der ersten Gasgeneratorstufe und führt unter Umständen zu einer Einschränkung des Verbesserungspotentials bei OoP durch eine langsame Befüllung des Airbags.

2.3 Vergrößerung des Verzögerungsweges durch Vorbeschleunigung mittels Gurt

Die Basis für eine Reduktion der Insassenbelastung ist, wie schon im Punkt 2.1 beschrieben, die optimale Ausnutzung des verfügbaren Verzögerungsweges. Beim Airbag kann dies mittels einer optimierten Form und früherer Ankopplung erreicht werden, beim Gurtsystem durch ein schnellst mögliches Erreichen der notwendigen Gurtkräfte. Sollen die Belastungen noch weiter gesenkt werden, muss der Weg aktiv vergrößert werden. Dabei erscheint ein Gurtsystem, mit dem der Insasse im Fahrzeug nach hinten gezogen wird oder früher Beschleunigungen auf diesen aufgeprägt werden können, deutlich einfacher umsetzbar zu sein, als ein Airbag, der den Insassen nach hinten drücken muss. Dafür wäre eine, in ihrer Längsausdehnung stufenlos einstellbare Airbagform notwendig um sowohl für weit vorne, also auch weiter hinten sitzende Personen eine vergleichbare Vorbeschleunigung zu erreichen. Im Gegensatz dazu liegt der Gurt unabhängig von der Sitzposition am Insassen an und kann mit wesentlich geringerer zeitlicher Verzögerung nach der Aktivierung Rückhaltekräfte auf den Insassen aufbringen.

In einer Studie von Adomeit et al. [1, 2009a] wird die Auswirkung eines aktiv vergrößerten Verzögerungsweges für den Insassen auf dessen Verletzungskriterien untersucht. Der Insasse wird dabei mit Hilfe des Gurtes ab etwa 80 Millisekunden vor t_0 nach hinten gezogen. Durch die „Freigabe“ der Rückenlehne des Sitzes wird ermöglicht, dass der Oberkörper des Insassen innerhalb von 120 Millisekunden etwa 100 Millimeter entgegen der Fahrtrichtung beschleunigt wird, bevor es aufgrund des Beschleunigungspulses zu einer Bewegungsumkehr kommt. Infolge der abgebauten Bewegungsenergie des Insassen während dieser Vorbeschleunigung und des zusätzlich gewonnenen Verzögerungsweges lassen sich sehr geringe Belastungswerte für Brust und Becken erreichen.

Einige Fragestellungen müssten allerdings untersucht werden, bevor ein derartiges System in einem PKW umgesetzt werden kann: Wie muss die Gurtgeometrie gestaltet sein, damit der Insasse während der Straffung effektiv nach hinten gezogen werden kann ohne dabei das Risiko eines Hochrutschens des Beckengurtes über den Beckenknochen zu erhöhen. Wie viel Weg kann für die Rückenlehne freigegeben ohne dass Insassen im Fond des Fahrzeugs stärker gefährdet werden? Mit welchen Aktuatoren können eine derartige, länger wirkende Straffung und der notwendige lange Straffweg realisiert werden? Wie muss ein System aufgebaut sein, welches neben der frühen Auslösung auch mit konventionellen Auslösezeiten im Fall einer Nicht-Erkennung der Sensorik ausreichend guten Insassenschutz bieten soll? Kann auch ohne eine Freigabe der Rückenlehne eine Verbesserung erzielt werden, wenn der Insasse in den Sitzpolster gezogen wird? Einige Problemstellungen sind also noch nicht geklärt, die Idee einer Vorbeschleunigung des Insassen mit Hilfe des Sicherheitsgurtes zur Reduktion des Belastungsniveaus verspricht aber sehr große Verbesserungen für den Insassenschutz.

2.4 Weniger aggressive Gurtstraffung – länger anhaltend – geringeres Kraftniveau – selbes Resultat

Eine zentrale Motivation für eine frühzeitige Aktivierung von Rückhaltesystemen ist die Möglichkeit, den Aktuatoren die Aggressivität beim Kontakt mit einem Fahrzeuginsassen zu nehmen. Eine Vorbeschleunigung des Insassen entgegen der Bewegungsrichtung unmittelbar vor der Kollision hat,

wie im obigen Absatz diskutiert, einen doppelt positiven Einfluss auf die Insassenbelastungen. Einerseits wird schon vor dem Unfall ein Teil der Bewegungsenergie des Insassen „abgebaut“. Andererseits wird durch das Zurückziehen der effektive Verzögerungsweg des Insassen verlängert. Um aber eine derartige Vorbeschleunigung des Insassen mit Hilfe des Gurtes zu realisieren, sind sehr hohe Straffkräfte oder lange Straffzeiten notwendig.

Der Mensch kann aber abhängig von der Körperregion nicht beliebig hohe Gurtkräfte ertragen, ohne Verletzungen zu erleiden. Bei einer Überschreitung von biomechanischen Grenzwerten kann es zu Abdomenverletzungen oder sogar Knochenbrüchen kommen. Wenn schon zu einem frühen Zeitpunkt, noch vor der Kollision feststeht, dass es zu einem Unfall kommen wird, könnte mit einer dann länger wirkenden Straffung und deutlich geringeren Kräften unter Umständen eine vergleichbare Rückverlagerung erzielt werden.

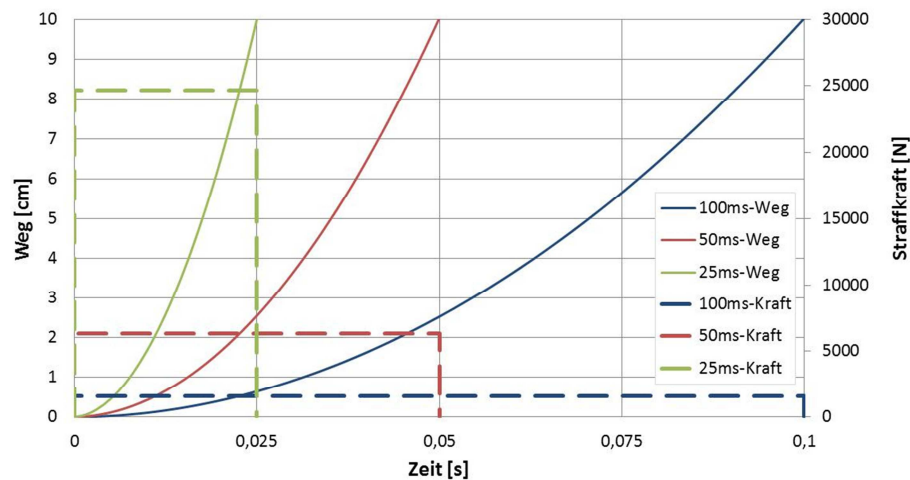


Abbildung 8: Abschätzung der Straffkräfte bei unterschiedlich langen Straffzeiträumen

In der obigen Abbildung werden in einer stark vereinfachten Überlegung die Kräfte abgeschätzt, die notwendig sind, um eine Masse von 80 Kilogramm (entspricht in etwa dem Hybrid III, 50%-Dummy mit 78,2 Kilogramm) innerhalb eines definierten Zeitraums zehn Zentimeter linear zu verschieben. Äußere Einflüsse wie etwa die Reibung zwischen Dummy und Sitz werden dabei nicht berücksichtigt. Es zeigt sich, dass die (konstante) Kraft die notwendig ist, um die Masse innerhalb von 25 Millisekunden zehn Zentimeter zu bewegen, sechzehn Mal höher ist, als wenn die Kraft über einen Zeitraum von 100 Millisekunden wirken würde.

Dabei muss bedacht werden, dass bei der Vorbeschleunigung über den Zeitraum von 25 Millisekunden der Geschwindigkeitsabbau etwa vier Mal höher ist als bei der Straffung über 100 Millisekunden. Der gewonnene Weg ist also gleich, die bereits vor der Kollision abgebaute Bewegungsenergie des Insassen ist bei der Straffung mit geringen Kräften über einen langen Zeitraum geringer.

Ausgehend von einer maximal ertragbaren Gurtkraft, könnte für unterschiedliche Pulsverläufe jeweils ein optimaler Straffzeitpunkt ermittelt werden, bei dem die Summe beider Effekte maximiert und somit die Insassenbelastung minimiert wird. Der exakte Pulsverlauf ist dabei vor der Kollision nicht bekannt. Wenn aber beispielsweise mittels der Fahrumgebungssensorik Informationen über die Relativgeschwindigkeit, die Trefferlage und über den Unfallgegner (Abschätzung von Masse aus Objektklassifizierung) bekannt sind ist auch denkbar, dass die zu erwartende Unfallschwere beziehungsweise das Anstiegsverhalten des Pulses abgeschätzt werden kann.

3 Entwicklung von früh ausgelösten Rückhaltesystemen in einem bestehenden Fahrzeug

Die im vorigen Kapitel erläuterten theoretischen Verbesserungspotentiale müssen nun anhand von praktischen Ergebnissen in Simulationen und Versuchen nachgewiesen werden. Zu diesem Zweck werden in der vorliegenden Arbeit Rückhaltesysteme in einer bestehenden Fahrzeugumgebung für eine frühe Auslösung konzipiert und auf verschiedene Lastfälle abgestimmt. Die Insassenbelastungen in den einzelnen Lastfällen werden dann mit jenen der Serien-Rückhaltesysteme verglichen und somit kann das Verbesserungspotential dargelegt werden. Die wichtigsten, dabei eingesetzten Verletzungskriterien werden ausführlich im Anhang im Kapitel 8.1 erläutert. Neben dem Verletzungsrisiko in unterschiedlichen Lastfällen werden im Kapitel 8.2 auch die Rückhaltesysteme des Referenzfahrzeuges detailliert beschrieben, um auch die Komplexität der verschiedenen Systeme vergleichen zu können.

Ziel ist es, neben dem Verbesserungspotential des Insassenschutzes auch noch sich ergebende Anforderungen an die Aktuatoren in den unterschiedlichen Rückhaltesystemen aufzuzeigen. Darüber hinaus sollen Randbedingungen und Ansprüche an die notwendige Sensorik abgeleitet werden.

Es wird angenommen, dass eine frühe Auslösung des Airbags auf der Beifahrerseite aufgrund des größeren Volumens im Vergleich zum Fahrerairbag die stärksten Änderungen gegenüber konventionellen Zündzeitpunkten ergibt. Aus diesem Grund wurden nur die Insassenbelastungen des Beifahrers untersucht, wobei anzunehmen ist, dass sich die Ergebnisse in gewissem Maße auch auf die Fahrerseite übertragen lassen.

3.1 Prinzipielle Vorgehensweise

Im Zuge der Entwicklung der neuen Rückhaltesysteme ist es wichtig, dass man Verbesserungen oder Verschlechterungen einzelner Verletzungskriterien den Veränderungen von Parametern der eingesetzten Aktorik zuweisen kann. Beispielsweise könnte eine Verringerung der Brusteindrückung das Resultat von Veränderungen vom Airbag- aber auch vom Gurtsystem sein. Ziel ist es, dass am Ende der Untersuchung bekannt ist, welche Verbesserungen durch den früh ausgelösten Airbag und welche durch eine frühe Straffung des Sicherheitsgurtes zu Stande kommen. Aus diesem Grund nähert man sich der Problemstellung folgendermaßen.

3.1.1 Erster Schritt: Optimales Airbagsystem für Frühauslösung

Im ersten Schritt wird bei ansonsten unveränderten Randbedingungen ein neues frühzeitig ausgelöstes Airbagsystem entwickelt. Der Sicherheitsgurt mit Straffer und Kraftbegrenzer bleibt vorerst unverändert.

Unter anderem wird dabei der Einfluss unterschiedlicher Zündzeitpunkte auf das Verletzungsrisiko für den Insassen bestimmt. Insbesondere die Fragestellung nach einem frühesten und spätesten Zündzeitpunkt des Airbags ist von großer Bedeutung. Wann kann also trotz einer noch früheren Zündung des Gasgenerators keine weitere Verbesserung des Insassenschutzes mehr erzielt werden? Es werden verschiedene Airbagformen getestet um eine biomechanisch bestmöglich ertragbare Einleitung der Rückhaltekräfte in den Oberkörper und den Kopf zu erzielen.

Ein wesentlicher Punkt ist auch die Ermittlung einer optimalen Befüllung des Airbags über einen wesentlich längeren Zeitraum als mit heutigen Seriengasgeneratoren. Welche noch unbekanntem Effekte treten durch die lange Standzeit des Airbags auf und welche zusätzlichen Anforderungen ergeben sich dadurch an diesen?

Ausgehend von idealisierten Komponenten nähert man sich in der Auslegung immer mehr real umsetzbaren Aktuatoren an. Somit zeigt sich auch eine „Stoßrichtung“ für weitere Entwicklungen auf.

Das Ergebnis dieser ersten Zwischenetappe ist das Modell eines früh ausgelösten Airbagsystems, welches anhand von Schlittenversuchen validiert wurde. Darüber hinaus soll in diesem ersten Schritt auch der Nachweis über das Verbesserungspotential in OoP-Konfigurationen durch eine „langsame“ Füllung des Airbags erbracht werden.

3.1.2 Zweiter Schritt: Ergänzung durch ein früh ausgelöstes Gurtsystem

In weiterer Folge wird das Gurtsystem betrachtet. Es wird die Fragestellung untersucht, ob und in welchem Ausmaß sich durch eine längere Straffung die Insassenbelastung reduzieren lässt. Welche Probleme ergeben sich insbesondere dadurch, dass der Sitz die Möglichkeiten einer „Vorbeschleunigung“ des Insassen stark einschränkt? Wie kann eine länger anhaltende Straffung umgesetzt werden? Des Weiteren wird auch untersucht, an welchen Gurtanbindungspunkten gestrafft werden muss, um eine bestmögliche Anbindung des Insassen zu erreichen. Überdies stellt sich die Frage, ob durch die frühe Ankopplung Verzögerungsweg gewonnen wird, der beispielsweise mit einer Gurtkraftbegrenzung definiert freigegeben werden kann. Um die Parametervielfalt einzuschränken, soll das Airbagsystem in dieser Untersuchung im Wesentlichen unverändert bleiben.

3.1.3 Dritter Schritt: Gesamtsystemabstimmung und Potentialdarlegung

Abschließend werden die beiden neu entwickelten Rückhaltesysteme in größeren Parametervariationen aufeinander abgestimmt, sodass ein Summenoptimum gefunden wird. Mit diesem Gesamtsystem werden in weiterer Folge Abstimmungen für die einzelnen Referenzlastfälle gesucht und die Ergebnisse mit jenen der Serien-Rückhaltesysteme verglichen.

Es soll dargestellt werden, mit welchem Aufwand an zusätzlicher Aktorik und Sensorik welche Verbesserungen der Rückhaltesysteme erreicht werden können. Insbesondere ist auch von großer Bedeutung, wie dieses System einen Insassen schützen kann, im Fall, dass die Umfeldsensorik den bevorstehenden Unfall nicht erkennen kann. Kommt es zu höheren Belastungen als mit den Serien-Rückhaltesystemen?

Weiterführende Untersuchungen sollen Unterschiede zwischen der Serien-Aktorik und den früh ausgelösten Rückhaltesystemen hinsichtlich Bauraum, Gewicht, Robustheit der Ergebnisse, ... aufzeigen. Es werden auch Konzepte für eine Auslösestrategie für die unterschiedlichen Lastfälle entwickelt.

Damit soll eine Aussage gemacht werden, welche Verbesserungen möglich sind und mit welchen Schwierigkeiten und welchem Aufwand sie verbunden sind.

3.1.4 Methodik

Die Auslegung der Rückhaltesysteme erfolgt numerisch in der Mehrkörper-Simulationsumgebung Madymo. Von dem untersuchten Fahrzeug ist ein sehr gut validiertes Simulationsmodell für den Beifahrer in unterschiedlichen Frontallastfällen vorhanden. Für die neuen Aktuatoren müssen Modelle entwickelt werden, die deren Verhalten und deren Wirkungsweise möglichst realistisch nachbilden. Diese Modelle werden anhand von vereinfachten Vorversuchen validiert.

In einzelnen Lastfällen, die in ihrer Konfiguration von dem Validierungsstand des Simulationsmodells stärker abweichen, werden Schlittenversuche durchgeführt, um die Aussagekraft der Simulationsergebnisse zu bestätigen.

Die Fragestellungen hinsichtlich der OoP-Problematik werden anhand von Versuchen untersucht, da dafür mit dem verfügbaren Simulationsmodell keine zuverlässigen Aussagen getroffen werden können (vgl. [8, 2004a], [55, 2006c]).

3.1.4.1 Kurzbeschreibung Simulationsmodell - Einschränkungen

In dem Simulationsmodell sind sämtliche Komponenten, die zur Rückhaltung des Insassen im Fahrzeug beitragen, unterschiedlich stark abstrahiert abgebildet:

Im Realversuch kommt es infolge der Belastung durch den Dummy aber auch durch sein Eigengewicht zu einer relativ starken Bewegung des Sitzes. Im Simulationsmodell ist diese Bewegung vereinfacht durch eine Verdrehung und eine Verschiebung des Sitzes nachgebildet. Das Modell ist in erster Linie für konventionelle Auslösezeiten validiert, weswegen die Steifigkeit der Rückenlehne nur eine untergeordnete Rolle spielt. Insbesondere bei der frühen Straffung kann dies aber einen größeren Einfluss haben, wenn der Dummy in den Sitz gezogen wird. Diese „Schwäche“ des Simulationsmodells muss bei Untersuchungen zur Gurtstraffung berücksichtigt werden und gegebenenfalls ist eine Nachvalidierung erforderlich.

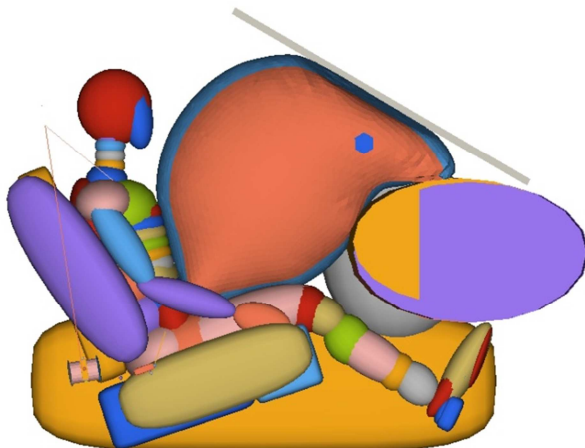


Abbildung 9: Simulationsmodell mit 50%-Mann

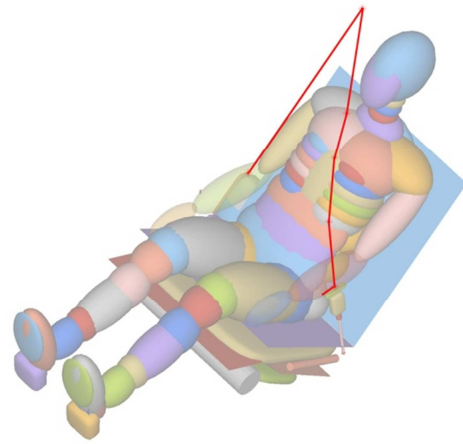


Abbildung 10: Gurtmodellierung

Das Airbagmodell beinhaltet den Gasgenerator und den Luftsack selbst. Die Modellierung (uniform pressure Methode) ist gegenüber der Realität stark vereinfacht, insbesondere während der Entfaltungphase können damit keine Aussagen über Kontaktkräfte des Insassen mit dem Airbag getroffen werden [8, 2004a]. Das Verhalten während der Rückhaltephase ist aber ausreichend genau abgebildet und der Vorteil dieser Abbildung liegt in der sehr kurzen Berechnungsdauer. Zur Validierung der neuartigen Airbagmodelle für die frühe Auslösung wurden zahlreiche Horizontalimpaktor-Tests durchgeführt. Dabei mussten insbesondere die Verluste des Airbags durch Leckage, die Entfaltung und durch Abkühlung angepasst werden. Das Modell des Gasgenerators wurde eigens anhand von Kannenversuchen validiert.

Der Gurt ist gegenüber der Realität sehr stark vereinfacht. Einzelne Stäbe mit den mechanischen Eigenschaften des Gurtes werden zu einer Kette verbunden, welche über dem Oberkörper des Dummies verläuft. Die Positionen der Umlenkpunkte des Gurtes (z.B.: Höhenversteller) entsprechen jenen des Realfahrzeuges. Beim Beckengurt ist der Gurt rechts und links direkt am Dummy „befestigt“. Effekte wie ein Hochrutschen des Gurtes können mit diesem Modell also nicht abgebildet werden.

Die Instrumententafel spielt insbesondere für den Kniekontakt eine wesentliche Rolle. Im Modell wird sie durch Ellipsoide mit einer entsprechenden Kontaktcharakteristik nachgebildet.

Im Fußraum des Insassen befindet sich ein Deformations-Element, welches im Simulationsmodell durch eine Platte mit einer validierten Nachgiebigkeit dargestellt ist.

Auf den Insassen werden, in repräsentativen Gesamtfahrzeugversuchen gemessene Beschleunigungsverläufe aufgebracht. Bei dem teilüberdeckten EuroNCAP-Crashtest wird die Rotation des Fahrzeuges dabei allerdings nicht berücksichtigt. Aussagen in diesem Lastfall bedürfen also unter Umständen noch einer Kontrollrechnung, bei der auch die Rotation des Fahrzeuges abgebildet ist.

3.1.4.2 Parameteroptimierung mit modeFrontier

Bei der Abstimmung der einzelnen Rückhaltesysteme für die verschiedenen Lastfälle muss im Idealfall ein Optimum aus circa 20 verschiedenen Parametern gefunden werden. Dafür sind umfangreiche Parametervariationen notwendig, die mit dem Programm modeFrontier (ESTECO s.r.l.) automatisiert durchgeführt werden können.

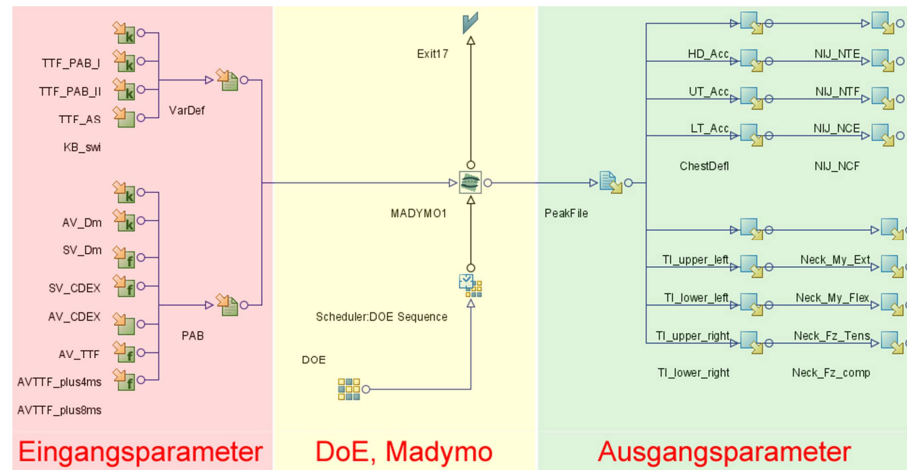


Abbildung 11: modeFrontier - Workflow

Insbesondere die Möglichkeit einer sehr übersichtlichen Darstellung der Simulationsergebnisse vereinfacht die Identifizierung der wichtigsten Parameter für unterschiedliche Verletzungskriterien. Es besteht darüber hinaus die Möglichkeit mittels „Response-Surfaces“ aus bestehenden Simulationsergebnissen durch die Suche nach mathematischen Zusammenhängen zwischen den einzelnen Lösungspunkten Vorhersagen über die Ergebnisse von Parameterkombinationen zu machen, die gar nicht berechnet wurden [23, 2008b].

3.2 Untersuchte Frontal-Lastfälle

Um die Aussagen zur Verbesserung des Insassenschutzes durch eine frühe Aktivierung der irreversiblen Rückhaltesysteme auf einer breiten Basis abzusichern, werden für die Entwicklung dieser Systeme eine Reihe von Lastfällen in Betracht gezogen. In der Auslegung und Abstimmung der Rückhaltesysteme muss daher ein Kompromiss aus teils gegenläufigen Anforderungen gefunden werden. Somit ist auch der Vergleich der gefundenen Aktorik mit einem Serienaggregat zulässig, welches ja auch den Kompromiss für eine größere Anzahl an Anforderungen darstellt.

Für die Entwicklung werden drei unterschiedliche Frontallastfälle betrachtet. Die Schutzsysteme müssen darüber hinaus für drei verschiedene Insassenklassen ausgelegt werden. Zur Vereinfachung werden die drei Dummies nur in ihrer jeweiligen Normsitzposition betrachtet. Zusätzlich muss auch die Performance des Systems in OoP-Situationen berücksichtigt werden.

Zuletzt muss ein und dieselbe Aktorik neben der frühen Auslösung auch noch für den Fall ausgelegt werden, dass sie mit konventioneller Sensorik ausgelöst wird. Diese Anforderung stellt insbesondere für die Auslegung der Airbagform die größte Schwierigkeit dar.

Damit ergeben sich in Summe 19 verschiedene Konfigurationen, die bei der Auslegung des Gesamtsystems berücksichtigt werden müssen. Im Folgenden werden die einzelnen Anforderungen für die Abstimmung der früh ausgelösten Rückhaltesysteme näher beschrieben und die Eckpunkte des Spektrums an Anforderungen ausgearbeitet.

3.2.1 Drei untersuchte Crashtest-Dummies

Die Rückhaltesysteme werden für die drei verschiedenen Frontal-Crashtest Dummies Hybrid III 5%-Frau, 50%- und 95%-Mann ausgelegt. Dabei muss ein guter Kompromiss zwischen einer, für die

leichte Frau ertragbaren und für die schwereren Männer ausreichenden Rückhaltewirkung gefunden werden. Diese drei Dummies haben auch unterschiedliche Norm-Sitzpositionen, wodurch sich auch für die Airbagform unterschiedliche Anforderungen ergeben.

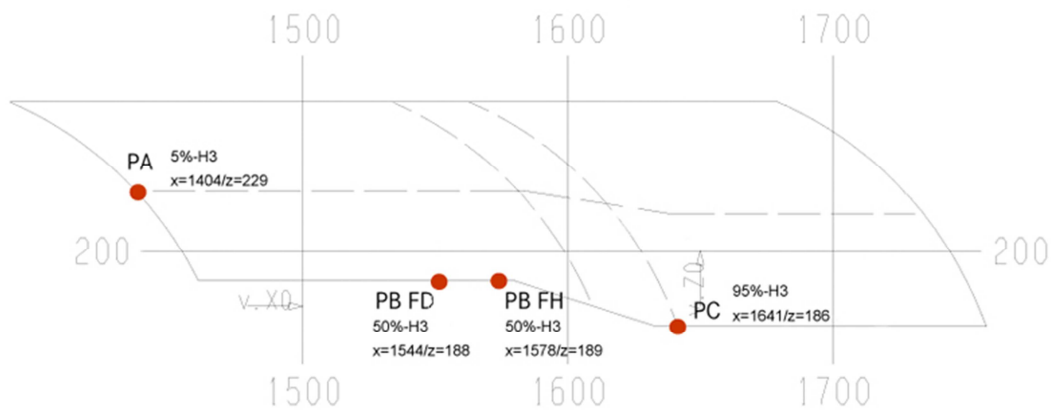


Abbildung 12: Soll-Position der Hüftpunkte für die drei Dummies

In der obigen Abbildung sind die jeweiligen Sitzpositionen (H-Punkte) im Verstellkennfeld des Fahrzeugsitzes dargestellt. Die Position „PA“ ist dabei die Norm-Sitzposition für die 5%-Frau. Der Sitz befindet sich in der vordersten Position, in der mittleren Höhe des möglichen Verfahrweges. Bei Einstellung des Sitzes in der Position „PB“, der Norm-Sitzposition für den 50%-Dummy, befindet er sich in der Mittelposition der Längseinstellung und in der tiefsten möglichen Höheneinstellung. Die beiden Rating-Verfahren Euro- und US-NCAP unterscheiden sich dabei allerdings geringfügig. Die Sitzposition für den 95%-Dummy befindet sich im Referenzfahrzeug noch weiter hinten und ebenfalls in der untersten möglichen Stellung.

3.2.1.1 Hybrid III, 50%-Mann

Der 50%-Mann entspricht in seinem Gewicht (78,2 Kilogramm) und seiner Größe (stehend ca. 1,75 Meter) etwa der Hälfte der männlichen Teilnehmer einer groß angelegten anthropometrischen Studie in den USA in den 1960er Jahren [73, 2010h]. Er ist nach wie vor der wichtigste Dummy in der Auslegung der Rückhaltesysteme für Frontalkollisionen in Personenkraftwagen. Dieser Dummy kommt in sämtlichen Frontal-Crashtests zum Einsatz.

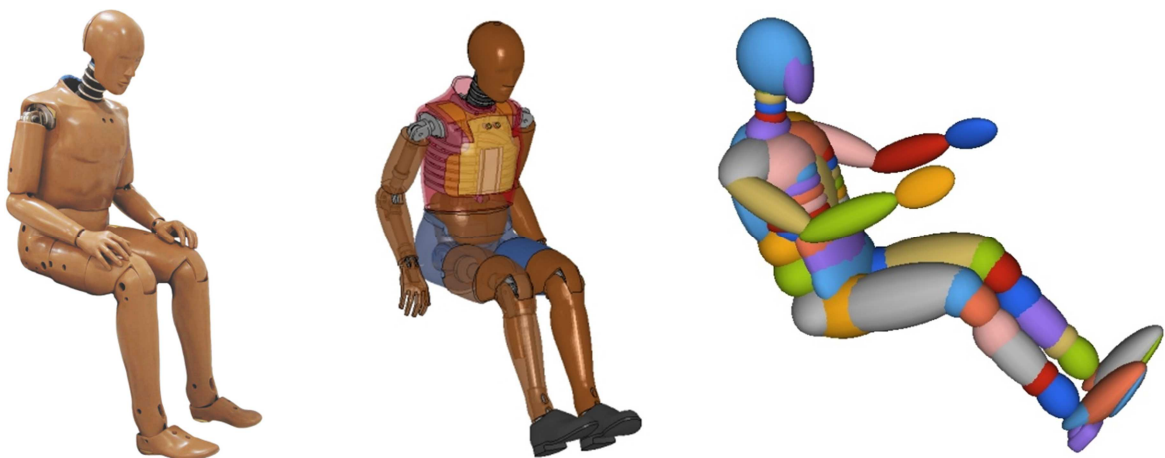


Abbildung 13: Hybrid III 50%-Mann Dummy⁶ und verschiedene Simulationsmodelle (LS-Dyna⁷ links, Madymo rechts)

⁶ aus [20]

⁷ aus [56]

Der 50%-Dummy legt bei der Auslegung der Rückhaltesysteme die untere Grenze an Rückhaltekräften durch Airbag oder Gurt fest um beispielsweise ein Durchschlagen an die Instrumententafel oder die Windschutzscheibe zu verhindern.

3.2.1.2 Hybrid III, 5%-Frau

Seit einigen Jahren gewinnt die 5%-Frau bei der Auslegung der Insassenschutzsysteme mehr und mehr an Bedeutung. Beispielsweise kommt dieser Dummy im Zuge der aktualisierten Testprozedur des US-NCAP-Verbraucherschutztests zum Einsatz, was die Entwickler vor allem hinsichtlich N_{ij} -Werte und Brusteindrückung vor große Herausforderungen stellt [78, 2009f]. Die 5%-Frau entspricht in ihrer Körpergröße (1,51 Meter) und ihrem Gewicht (49,1 Kilogramm) einer Frau, die kleiner und leichter ist, als 5% aller Frauen einer anthropometrischen Studie in den USA in den 1960er Jahren. Insbesondere die geringe Masse im Vergleich zu den schweren 50%- und 95%-Dummies führen dazu, dass die Rückhaltesysteme tendenziell zu hart sind, wodurch die Belastungen für diese Insassengruppe im Falle eines Unfalles höher sind.

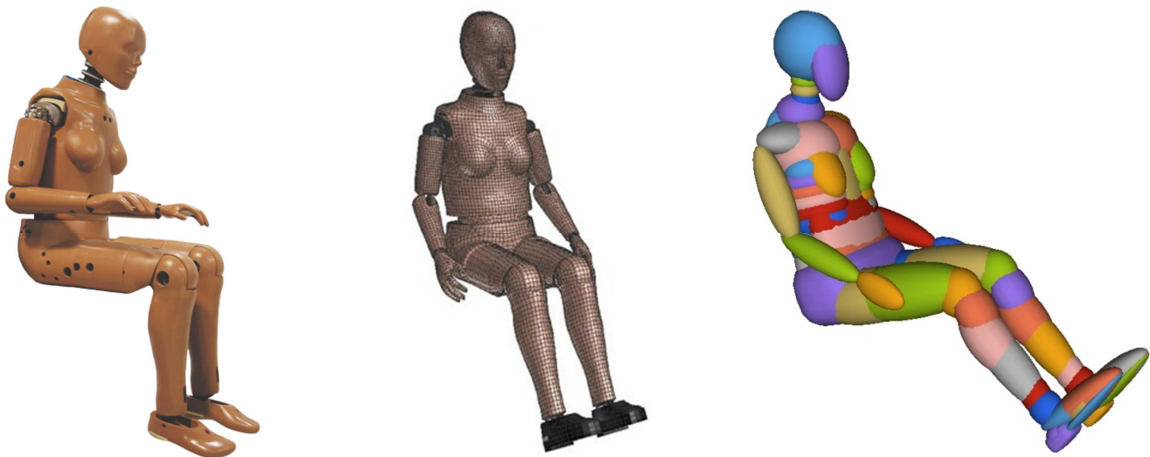


Abbildung 14: Hybrid III 5%-Frau Dummy⁸ und verschiedene Simulationsmodelle (LS-Dyna⁹ links, Madymo rechts)

Um den zur Verfügung stehenden Verzögerungsweg im Fahrzeug optimal auszunützen, müsste beispielsweise der Gurtkraftbegrenzer weicher oder die Abströmquerschnitte am Airbag größer ausgeführt werden. Die 5%-Frau legt also bei der Auslegung der Rückhaltesysteme die obere Grenze der Rückhaltekräfte durch den Airbag oder den Gurt fest.

Kleine Personen sitzen (als Fahrer) in der Regel weit vorne um die Pedale erreichen zu können. Damit ist das Risiko, vom Airbag während dessen Entfaltung getroffen zu werden, wesentlich größer als für größere Personen. Dies ist auch einer der Gründe, warum die 5%-Frau bei den in den USA gesetzlich vorgeschriebenen OoP-Tests zum Einsatz kommt.

3.2.1.3 Hybrid III, 95%-Mann

Der 1,87 Meter große und 101,2 Kilogramm schwere 95%-Dummy ist größer und schwerer als 95% aller männlichen Testpersonen einer anthropometrischen Studie. Hinsichtlich der Rückhaltesysteme ist bei diesem Dummy die Hauptaufgabe, ein Durchschlagen des Kopfes zur Instrumententafel oder der Windschutzscheibe zu verhindern. Mit ein und demselben Rückhaltesystem muss also, wenn keine Adaptivität der Rückhalteeigenschaften möglich ist, sowohl dieser Dummy als auch die etwa halb so schwere 5%-Frau geschützt werden. Es muss dafür ein Kompromiss zwischen dem Risiko eines Durchschlages im Fall des 95%-Dummys und zu hohen Belastungen für die 5%-Frau gefunden werden.

⁸ aus [43]

⁹ aus [21]

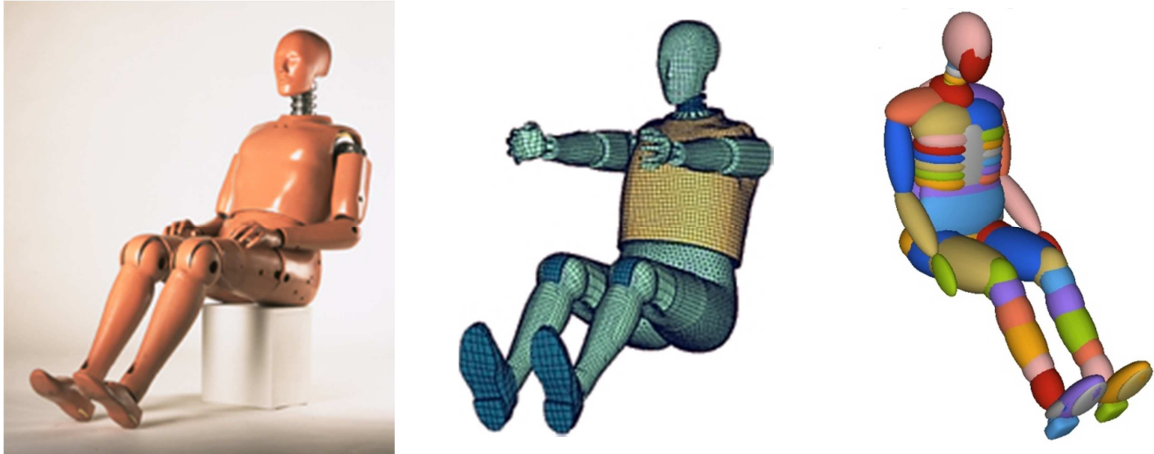


Abbildung 15: Hybrid III 95%-Mann Dummy¹⁰ und verschiedene Simulationsmodelle (LS-Dyna¹¹ links, Madymo rechts)

Dabei ist allerdings zu beachten, dass der 95%-Dummy in keiner Testvorschrift zum Einsatz kommt. In dieser Untersuchung werden daher die unterschiedlichen Lastfälle mit dem 95%-Dummy untersucht und es wird versucht, jeweils eine bestmögliche Abstimmung zu finden. Die Auswahl der Komponenten der Aktorik erfolgt aber in erster Linie für die 5%-Frau und den 50%-Mann.

3.2.2 Untersuchte Crashpulse

Wie schon erwähnt werden die, zu einem frühen Zeitpunkt aktivierten Rückhaltesysteme für drei verschiedene Crash-Konstellationen abgestimmt. Diese im Folgenden näher beschriebenen drei Tests stellen an das Fahrzeug und auch an die Rückhaltesysteme sehr unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich maximalem Beschleunigungsniveau und Dauer der Belastung. Durch die Wahl dieser Crashpulse soll verhindert werden, dass mit einer „Punktoptimierung“ für einen bestimmten Lastfall die Potentialabschätzung für die früh ausgelösten Rückhaltesysteme nicht aussagekräftig ist. Es wurden die beiden Verbraucherschutztests Euro- und US-NCAP ausgewählt, da die dabei auftretenden Belastungen höher sind als bei den gesetzlichen Frontal-Crashtests mit Gurt. Zusätzlich wird auch noch der in der amerikanischen Gesetzgebung vorgeschriebene Frontallastfall ohne Gurt bei der Auslegung des Airbags berücksichtigt.

Im Folgenden werden die einzelnen Lastfälle eingehend beschrieben.

3.2.2.1 US-NCAP

Das US-NCAP-Ratingverfahren besteht aus einem Frontalcrash, einem Seitencrash mit deformierbarer Barriere sowie einem Seitenanprall gegen einen starren Pfahl. Für diese Untersuchung wird nur der Frontalcrash betrachtet. Beim US-NCAP-Crashtest handelt es sich um eine voll überdeckte Kollision gegen eine starre Barriere mit einer Einlaufgeschwindigkeit von 56km/h. Dabei werden im Versuchsfahrzeug ein 50%-Dummy auf der Fahrerseite und mit der Aktualisierung der Testvorschrift fürs Modelljahr 2011 ein 5%-Frau Dummy auf der Beifahrerseite positioniert.

¹⁰ aus [44]

¹¹ aus [24]

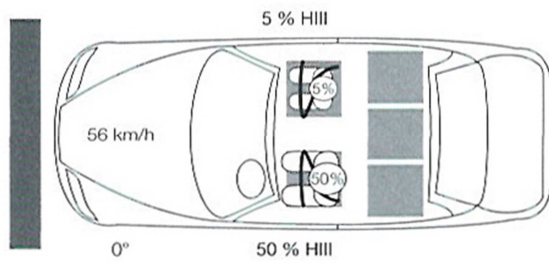


Abbildung 16: Skizze der Kollisionskonfiguration beim US-NCAP-Test ¹²

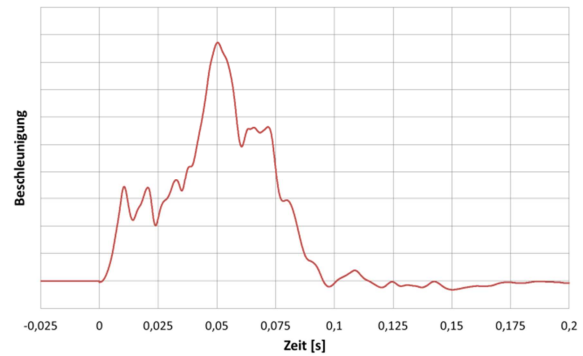


Abbildung 17: Beispiel eines typischen Verlaufes der Längsbeschleunigung beim US-NCAP Test

Die Konfiguration der vollen Überdeckung und der starren Barriere führen dazu, dass dieser Test sehr hohe Beschleunigungen bei nicht allzu langer Dauer des Crashes aufweist.

Aus den auftretenden Insassenbelastungen wird mittels experimentell ermittelter „Injury Risk Curves“ für unterschiedliche Körperregionen die Wahrscheinlichkeit einer AIS3+-Verletzung ermittelt. Diese einzelnen Wahrscheinlichkeiten werden dann mit der Formel

$$P_{joint} = 1 - (1 - P_{Head}) \cdot (1 - P_{Neck}) \cdot (1 - P_{Chest}) \cdot (1 - P_{Femur})$$

Gleichung 1: Berechnung P_{joint} im US-NCAP-Rating ¹³

zu einem resultierenden Verletzungsrisiko kombiniert. Liegt dieses unter 10% erhält das Fahrzeug für den jeweils betrachteten Insassen (Fahrer oder Beifahrer) fünf Sterne. Die Bewertung der beiden Frontal-Dummies wird gemittelt und stellt für die Gesamtbewertung des Fahrzeuges ca. 42% dar. Für letztere werden darüber hinaus das Verletzungsrisiko bei einem Seitencrash sowie das Risiko des Fahrzeuges für Rollover-Unfälle berücksichtigt.

3.2.2.2 EuroNCAP

Der EuroNCAP-Test unterscheidet sich bezüglich der Testkonfiguration wesentlich vom vorhin beschriebenen amerikanischen Verbraucherschutz-Test. Das Versuchsfahrzeug trifft mit 40% Überdeckung auf der Fahrerseite auf eine deformierbare Barriere. Die Einlaufgeschwindigkeit beträgt 64km/h.

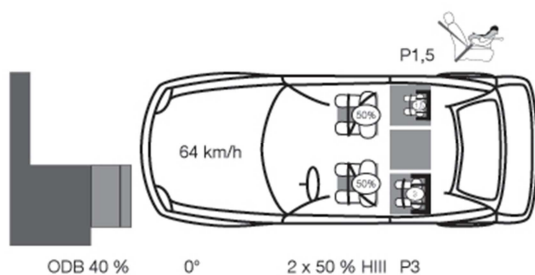


Abbildung 18: Skizze der Kollisionskonfiguration beim EuroNCAP-Test ¹⁴

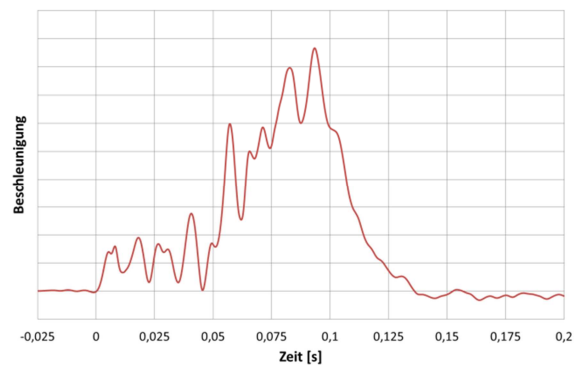


Abbildung 19: Beispiel eines typischen Verlaufes der Längsbeschleunigung beim EuroNCAP Test

Die Teilüberdeckung mit dem Crashelement führt zu einer deutlichen Rotation des Fahrzeuges während der Kollision. Für den Insassen entsteht dadurch die Gefahr, den Airbag zu verfehlen und mit

¹² aus [10, 2010b], Seite 24

¹³ aus [10, 2010b], Seite 31

¹⁴ aus [10, 2010b], Seite 24

dem Kopf beispielsweise an der harten A-Säule anzuschlagen. Es gab für diesen Fall eigene Entwicklungen mit asymmetrischen Airbags die den Kopfanschlag an der A-Säule verhindern sollten [84]. Diese haben sich aber bis dato nicht durchgesetzt. Neben der Rotation stellt insbesondere die längere Dauer des Pulses eine große Anforderung an die Rückhaltesysteme dar. Der Airbag muss lange genug hart bleiben, sodass auch beim 50%-Dummy ein Durchschlag des Kopfes an der Instrumententafel verhindert werden kann.

Die Auslegung der Rückhaltesysteme erfolgt in der Entwicklungsphase mittels Schlittenversuchen, in denen die rotatorische Beschleunigung in der Regel nicht abgebildet werden kann. Hier muss also davon ausgegangen werden, dass sich die Rückhalteeigenschaften im realen Versuch etwas von der Auslegung unterscheiden.

Bei der Bewertung des Insassenschutzes werden die unterschiedlichen Körperregionen untersucht und daraus eine Punktzahl errechnet. Je nach Belastungsniveau können für Kopf/Nacken, Brust, Oberschenkel/Knie und Unterschenkel maximal 4 Punkte beim Unterschreiten definierter Grenzwerte für einzelne Verletzungskriterien erreicht werden. Im Unterpunkt „Occupant Protection“ beim EuroNCAP Rating wird das Testfahrzeug auch noch hinsichtlich Seiten-, Pfahl- und Heckaufprall untersucht. Zusammen mit den anderen Unterpunkten „Child Occupant Protection“, „Pedestrian Protection“ und „Safety Assist“ wird eine Gesamt-Sterne-Anzahl ermittelt.

3.2.2.3 FMVSS208

In den USA sind für Fahrzeuge, die für den Straßenverkehr zugelassen werden sollen, auch Crashtests ohne Gurt vorgesehen. Dabei gibt es eine Vorschrift, bei der das Fahrzeug mit bis zu 40km/h in eine starre Barriere fahren muss, welche gegenüber der Fahrtrichtung um 30° verdreht sein kann.

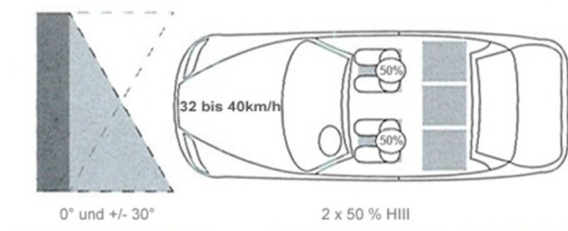


Abbildung 20: Skizze der Kollisionskonfiguration beim ungegurteten FMVSS208 Frontal-Test¹⁵

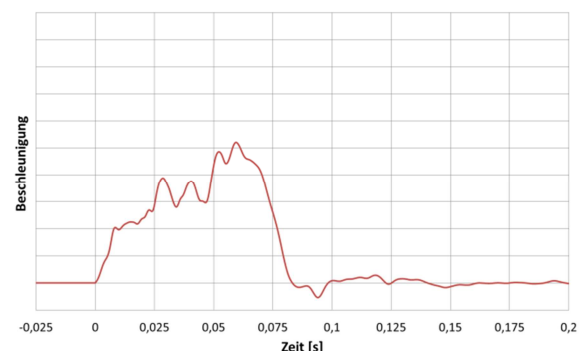


Abbildung 21: Typischer Verlauf der Längsbeschleunigung beim ungegurteten FMVSS208-Frontal-Test bei 0°

Diese Anforderung stellt bei der Auslegung des Airbagsystems die Maximalanforderung hinsichtlich Rückhaltewirkung dar. Der nicht angegurtete Dummy rutscht im Sitz nach vorne bis er mit den Knien an der Instrumententafel anschlägt. Aufgrund der fehlenden Rückhaltung des Oberkörpers führt dieser Kontakt zu einer Rotation des Dummies nach vorn. Um einen Anschlag des Dummies an der Windschutzscheibe verhindern zu können, muss der Airbag für diese Konfiguration relativ hart abgestimmt werden.

Diese notwendige harte Abstimmung führt umgehend dazu, dass das Airbagsystem bei der 5%-Frau zu höheren Belastungen führt. Für diese beiden völlig gegenläufigen Anforderungen muss also ein guter Kompromiss gefunden werden.

Neben diesen drei beschriebenen Crashtests muss auch noch eine weitere Testkonfiguration berücksichtigt werden: Für die OoP-Untersuchungen wird genau jene Gasgenerator-Konfiguration gezündet, die auch bei einer Kollision mit geringerer Unfallschwere (26km/h, starre Barriere, 100%

¹⁵ aus [11, 2011a], Seite 43

Überdeckung) ohne Sicherheitsgurt aktiviert wird. Vereinfacht gesagt muss also ermittelt werden, wie der Gasgenerator ausgelegt sein muss, damit der Insasse bei diesem Crashtest noch ausreichend geschützt wird. Je schwächer der Gasgenerator dafür sein kann, umso bessere Voraussetzungen hat man bei den OoP-Tests, bei denen das Verletzungsrisiko durch einen direkten Anschluss des Airbags ermittelt wird.

Mit den verschiedenen zu untersuchenden Dummies und den drei verschiedenen Frontallastfällen spannt sich eine Matrix von insgesamt neun unterschiedlichen Konfigurationen auf, für welche die Rückhaltesysteme ausgelegt werden müssen.

3.2.3 Zeitliche Auslöseszenarien

Grundsätzlich ist vorgesehen, dass die Insassenschutzsysteme schon zu einem frühen Zeitpunkt, bzw. schon vor t_0 aktiviert werden. Mit denselben Systemen muss der Insasse aber auch sehr gut geschützt werden, im Fall, dass die Aktivierung mit herkömmlicher Sensorik zu wesentlich späteren Zeitpunkten erfolgt. Dies kann zum Beispiel der Fall sein, wenn die Fahrumgebungssensorik die Unfallsituation nicht richtig interpretieren kann.

Es muss also ein System gefunden werden, welches sowohl bei einer frühen Auslösung durch Fahrumgebungssensoren, als auch bei einer Aktivierung mittels konventioneller Sensorik für den Insassen ein hohes Schutzniveau bietet. Im Folgenden werden die spezifischen Anforderungen dieser beiden zeitlichen Auslöseszenarien detailliert beschrieben.

3.2.3.1 Frühauslösung

Die frühe Auslösung von irreversiblen Rückhaltesystemen bildet den Schwerpunkt dieser Untersuchung. Ziel ist es, einerseits Verbesserungsmöglichkeiten für den Schutz des Insassen während einer Kollision nachzuweisen und andererseits spezifische Anforderungen an die Aktorik abzuleiten.

Die Anforderungen an die verschiedenen Rückhaltesysteme sind dabei unterschiedlich, da die Zeiträume, die von der Aktivierung bis zur Bereitstellung von Rückhaltekräften vergehen, bei den einzelnen Systemen stark voneinander abweichen. Für jedes Rückhaltesystem gilt, dass unmittelbar bei Beginn der Vorverlagerung des Insassen Rückhaltekräfte aufgebracht werden sollen bzw. dass der Insasse unter Umständen sogar noch zusätzlich entgegen dem Crashpuls vorbeschleunigt wird. Damit ergeben sich unterschiedliche erforderliche Zündzeiten für das Airbagsystem und das Gurtsystem. Mit der Forderung, dass auch noch die Aggressivität der Rückhaltesysteme reduziert werden soll, stellt eine Triggerzeit von circa 80ms vor Erstkontakt einen guten Kompromiss dar.

Bei der frühen Auslösung des Airbags ergeben sich im Wesentlichen folgende spezielle Anforderungen: Damit er möglichst früh an der Fahrzeugverzögerung teilnimmt, muss die Airbagform nahe an den Insassen gebracht werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Insasse noch in seiner Norm-Sitzposition sitzt. Eine Vorverlagerung des Passagiers infolge eines der Kollision vorhergegangenen Bremsmanövers (vgl.: [26, 2009b]) bleibt in dieser Untersuchung unberücksichtigt. Wie vorhin beschrieben, muss also die Airbagform so gestaltet werden, dass bei einer frühen Aktivierung unterschiedlichen Dummies ein vergleichbares Schutzniveau geboten werden kann.

Ein weiterer sehr wichtiger Punkt bei der Auslegung des Airbagsystems für eine frühe Aktivierung ist, dass infolge der längeren Standzeit ein höherer Druckverlust kompensiert werden muss. Einerseits kann Gas durch Undichtheiten wie Vents, Nähte und das Airbagmaterial selbst austreten, andererseits spielt der Druckverlust durch die Abkühlung des Gases in diesem Fall eine wesentliche Rolle. Um diese Verluste zu kompensieren, kann entweder mehr Gasgeneratorleistung installiert werden, was aber Nachteile wie mehr Platzbedarf, Gewicht,... und auch eine größere Aggressivität des Airbags bei der Entfaltung mit sich bringt. Alternativ dazu kann der Airbag so dicht wie möglich ausgeführt werden, um die Verluste auf ein Minimum zu beschränken. Maßnahmen dafür wären ein „dichtes“ Airbagmaterial, Abströmquerschnitte, die während der Entfaltung verschlossen sind beziehungsweise

eine möglichst „kalte“ Befüllung des Airbags. Eine optimale Charakteristik des Gasgenerators würde mit einem kleinst möglichen initialen „Punch“ die Airbagklappe sicher öffnen und dann langsam und gleichmäßig den Luftsack bis zum Erreichen des Betriebsdruckes füllen.

Für das Gurtsystem ergeben sich bei einer frühen Auslösung ebenfalls einige spezielle Anforderungen, die sich von den herkömmlichen Vorgaben unterscheiden. Die Idee ist, durch eine längere Straffung mit geringerem Gurtkraftniveau eine noch frühere Anbindung des Insassen an die Fahrzeugverzögerung zu erreichen als mit heutigen, modernen Straffersystemen. Dazu muss die Straffaktorik auch in der Lage sein, über einen längeren Zeitraum das Strafniveau aufrecht zu erhalten. Grundsätzlich unterscheiden sich aber die Auslösestrategien für eine frühe und eine konventionelle Auslösung beim Gurtsystem weniger stark wie jene des Airbags, da zeitlich kein so großer Unterschied besteht.

Eine wesentliche Anforderung an das System ist, dass es gegenüber Abweichungen im Testsetup eine sehr robuste Schutzwirkung aufweist. Es ist anzunehmen, dass die Genauigkeit der Zeitspanne bis zur Kollision bei der Auslösung mit Fahrumgebungssensoren mit größeren Abweichungen behaftet sein kann. So muss also gewährleistet sein, dass die Rückhaltesysteme sehr robust ausgelegt sind, um auch bei Abweichungen vom idealen Soll-Auslösezeitpunkt noch ein Schutzniveau erreicht werden, welches gleich, oder höher ist als beim Referenzfahrzeug.

Die Frühauslösung stellt den Hauptfokus dieser Untersuchung dar. Die entwickelten Rückhaltesysteme müssen im Fall eines Versagens der Sensorik oder einer, für die Software nicht interpretierbaren Verkehrssituation, aber auch mit konventioneller Sensorik ausgelöst, gut funktionieren. Die sich dadurch ergebenden Anforderungen werden im Folgenden beschrieben.

3.2.3.2 Rückfallebene - konventionelle Auslösung

Auf absehbare Zeit wird die Mehrheit an Zündungen von irreversiblen Rückhaltesystemen noch mit konventionellen Triggersystemen erfolgen. Dies liegt daran, dass eine Falsch- oder „ungewollte“ Auslösung eines Airbags oder pyrotechnischen Gurtstraffers auf jeden Fall verhindert werden muss, da damit auch ein erhebliches Verletzungsrisiko verbunden ist. Falls die Sensorik und die hinterlegten Fahrumgebungsmodelle die Verkehrssituation nicht zweifelsfrei beurteilen können, wird die frühe Auslösung unterdrückt und die Rückhaltesysteme werden herkömmlich ausgelöst. Mit mehr Erfahrung und Verbesserungen im Bereich der Sensorik und der Auslösesoftware, wird die frühe Auslösung in Zukunft einen größeren Anteil einnehmen. Je größer der Anteil an frühzeitigen Auslösungen ist, umso mehr Gewichtung kann dieser Lastfall auch in der Abstimmung der Rückhaltesysteme einnehmen.

In dieser Untersuchung soll in erster Linie das Potential einer Frühauslösung aufgezeigt werden und daher wird diesem Lastfall größere Bedeutung als der Rückfallebene zugeschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass im Bereich der Sensorik und der entsprechenden Software in den nächsten Jahren noch große Verbesserungen erzielt werden, sodass die jetzt getroffenen Annahmen dann zuverlässig umsetzbar sind. Dennoch müssen die Rückhaltesysteme auch dann noch für die Rückfallebene ausgelegt werden.

Im Fall, dass die entwickelten Rückhaltesysteme mittels konventioneller Crashsensoren zwischen 10 und 25 Millisekunden nach t_0 ausgelöst werden, besteht eine Hauptanforderung darin, dass der Airbag schnellst möglich in Position kommt. In jeder Millisekunde geht „wertvoller Weg“ verloren, entlang dem der Dummy verzögert werden könnte. Eine rasche Positionierung ist also entscheidend.

Im Fall einer Auslösung des Airbags zu konventionellen Zeiten ist die Ausdehnung des Luftsackes in Fahrzeuginnenraumrichtung begrenzt, da ansonsten für den Insassen ein großes Risiko eines Anschusses bei der Entfaltung des Airbags besteht. Die optimale Airbagform für konventionelle Auslösung unterscheidet sich also wesentlich von jener, für eine frühzeitige Auslösung. Es kann davon ausgegangen werden, dass die bestehende Airbagform des Serienfahrzeugs einen bestmöglichen Kompromiss mit den heutigen Randbedingungen darstellt.

Die „Untergrenze“ für die Längsausdehnung der Airbagform stellt in dieser Untersuchung der Lastfall 5%-Frau in der Rückfallebene dar. Dem gegenüber bildet der 95%-Mann in der Frühauslösung die „Obergrenze“ des Volumens. In der folgenden Abbildung sind die drei untersuchten Dummies in ihren jeweiligen Normsitzpositionen dargestellt.

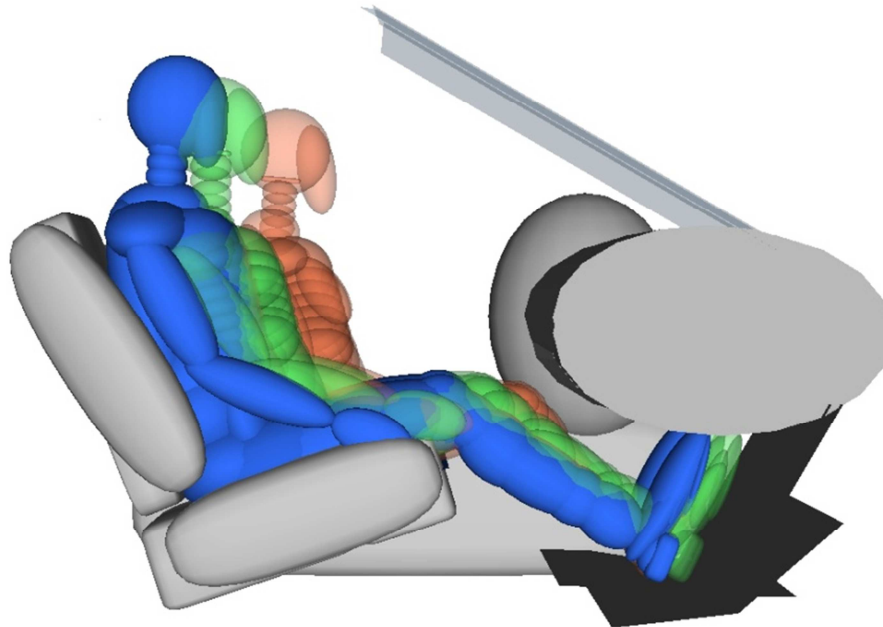


Abbildung 22: Unterschiedliche Normsitzpositionen von 95% Dummy (blau), 50% Dummy (grün) und 5% Dummy (rot)

Will man dieses Spektrum mit einer einzigen Airbagform abdecken, steht man vor dem Problem, dass man entweder einen Anschuss der 5%-Frau provoziert oder bei den größeren 50%- und 95%-Dummies keine Verbesserung erzielen kann.

Somit erscheint es unumgänglich, eine gewisse Adaptivität der Airbagform vorzusehen, um hier Verbesserungspotential erzielen zu können.

In weiterer Folge müssen unterschiedliche Airbagvolumina mit ein und demselben Gasgenerator befüllt werden, was dazu führen kann, dass der größere Airbag unter Umständen zu weich und der kleinere Airbag zu hart ist. Um dies zu kompensieren kann entweder eine steuerbare Abströmöffnung früher oder später geöffnet werden, es wird ein mehrstufiger Gasgenerator verwendet, oder es kommt eine Kombination dieser beiden Systeme zum Einsatz.

Wie oben beschrieben, ergeben sich für den Gasgenerator auch zwei sehr unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich der Entfaltungsdauer des Luftsacks. Um diese zu erfüllen, muss entweder ein mehrstufiger oder ein, in seiner Massenstrom-Charakteristik einstellbarer, Gasgenerator zum Einsatz kommen.

Als letzte Anforderung wird die OoP-Performance in Betracht gezogen, da man sich durch die frühe Auslösung in Verbindung mit einer „langsamen“ Befüllung des Luftsackes in diesem Lastfall besondere Verbesserungsmöglichkeiten verspricht.

3.2.4 OoP – Out of Position

In der amerikanischen Gesetzgebung (FMVSS 208) sind verschiedene Testkonfigurationen vorgeschrieben, anhand derer das Verletzungsrisiko des Insassen bei einem Anschuss durch den Airbag ermittelt werden soll. In Summe gibt es hier sieben Varianten mit verschiedenen Dummies in unterschiedlichen Sitzpositionen. Für die Beifahrerseite sind je zwei Tests mit dem dreijährigen und dem sechsjährigen Kinderdummy sowie ein Test mit dem einjährigen Kinderdummy in einem Kindersitz vorgesehen. Fahrerseitig wird die 5%-Frau in zwei unterschiedlichen Positionierungen getestet.

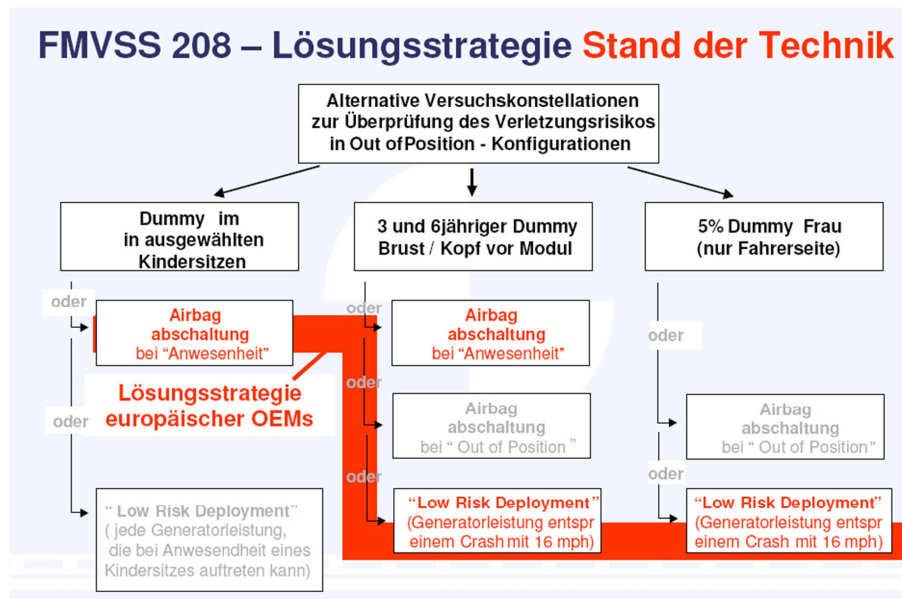


Abbildung 23: Schema der Testvorschriften für OoP gemäß der FMVSS 208 ¹⁶

Dabei wird es dem Fahrzeughersteller überlassen, ob er mittels geeigneter Sensorik die OoP-Situation detektiert und die Auslösung des Airbags unterdrückt, oder ob das Verletzungsrisiko mittels einer Reduktion der Aggressivität des Gasgenerators, dem sogenannten „Low-Risk Deployment“ minimiert wird. Im zweiten Fall muss für die beiden Kinderdummies (Hybrid III, 3 Jahre und 6 Jahre) dieselbe Gasgeneratorleistung aktiviert werden, wie bei einem Frontal-Crashtest mit 26km/h und dem 50%-Dummy ohne Sicherheitsgurt. Da die Sensorik zur OoP-Detektion aufwändig und teuer ist, wird von den OEMs überwiegend der zweite Weg beschritten.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie die Aggressivität des Airbags reduziert werden kann: Einerseits beeinflusst die Faltung sowie die Aufteilung des Airbags im Modulgehäuse maßgeblich das Verletzungsrisiko beim Austritt aus der Instrumententafel [60, 2001b]. Durch eine geeignete, optimierte Faltung können die Belastungen auf Kopf und Nacken teilweise erheblich gesenkt werden. Des Weiteren gibt es Entwicklungen, mittels Klappen am Luftsack oder im Modulgehäuse gezielt eine größere Gasabströmung zu erreichen, wodurch der Airbag während der Entfaltung weicher wird [22, 2006a]. Ganz wesentlichen Einfluss hat auch das Öffnungsverhalten der Airbagklappe in der Instrumententafel. Je weniger Widerstand diese dem Airbag beim Austritt leistet, umso weniger Druck baut sich auf, was mit einer geringeren Austrittsenergie einhergeht. Darüber hinaus haben auch die Form und die Position der Airbagklappe großen Einfluss auf die Insassenbelastungen. Diese Parameter werden aber in dieser Studie nicht weiter betrachtet, um die Vergleichbarkeit mit dem Referenzfahrzeug zu erhalten.

Eine sehr weit verbreitete Möglichkeit die Belastungen zu reduzieren besteht in der Aufteilung der Gasgeneratorleistung. So wird zum Beispiel für langsame Kollisionen und auch bei OoP nur die erste Stufe des Gasgenerators gezündet. Wenn es zu einem schweren Unfall kommt, bei dem die gesamte Rückhaltewirkung des Airbags notwendig ist, müssen beide Stufen mit einem zeitlichen Abstand gezündet werden.

Für die vorliegende Untersuchung des Verbesserungspotentials für den Insassenschutz durch frühzeitige Aktivierung von irreversiblen Rückhaltesystemen spielt die OoP-Problematik eine sehr wichtige Rolle. Insbesondere bei der Wahl des Gasgenerators muss daher schon in der Konzepterstellung auf diesen Lastfall Rücksicht genommen werden.

¹⁶ aus [76, 2008g], Seite 42

4 Früh ausgelöstes Airbagsystem

Wie im Kapitel 3.1 beschrieben, erfolgt die Untersuchung des Verbesserungspotentiales von früh ausgelösten Rückhaltesystemen schrittweise, beginnend mit dem Airbagsystem. In diesem Abschnitt werden die einzelnen Entwicklungsschritte für einen Beifahrer-Airbag beschrieben, welcher in der bestehenden Fahrzeug-Umgebung für eine Auslösung noch vor t_0 konzipiert wird. Für den Fall, dass die Fahrumgebungssensorik einen bevorstehenden Unfall nicht erkennt, wird dieses Airbagsystem auch für die konventionelle Auslösung mittels Beschleunigungssensoren (=Rückfallebene bzw. Backup) ausgelegt. Darüber hinaus wird auch das Verbesserungspotential durch die langsame Befüllung bei OoP-Situationen untersucht.

Es werden insbesondere die Unterschiede in den Anforderungen an die Aktorik beschrieben und getroffene Annahmen erläutert. Mit ersten Simulations- und Versuchsergebnissen wird das Potential einer Zündung eines an die speziellen Randbedingungen angepassten Airbags deutlich vor t_0 , bei ansonsten unveränderten Randbedingungen, aufgezeigt.

4.1 Neuartige Anforderungen an den Gasgenerator

Der Gasgenerator ist im Airbagsystem eine zentrale Komponente. Er produziert innerhalb kürzester Zeit eine ausreichend große Menge Gas, um den Airbag durch die Klappe in der Instrumententafel aus dem Container zu ziehen, vor dem Insassen zu positionieren und mit ausreichend Druck zu füllen, sodass der Insasse abgestützt werden kann. In modernen Fahrzeugen kommen unterschiedlichste Gasgenerator-Technologien zum Einsatz. Auf der Beifahrerseite werden dabei üblicherweise pyrotechnische oder Hybridgasgeneratoren verwendet.

Für den Gasgenerator ergeben sich durch die frühzeitige Auslösung und insbesondere durch die langsame Befüllung teilweise völlig neuartige Problemstellungen, die bestmöglich abgedeckt werden müssen. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Anforderungen an die Befüllung des Airbags näher beschrieben.

Abschließend wird der ausgewählte Gasgenerator und dessen Anpassung an die speziellen Ansprüche detailliert beschrieben.

4.1.1 Langsame Befüllung des Airbags

Neben der Möglichkeit, einen größeren Airbag zu realisieren, ist ein weiterer wesentlicher Gesichtspunkt bei der Auslösung des Airbags vor t_0 , die dadurch mögliche, deutlich langsamere Befüllung des Luftsackes. Durch die reduzierte Aggressivität bei der Entfaltung erhofft man sich signifikante Verringerungen der Insassenbelastungen in OoP-Situationen.

Der Airbag muss bei einem Unfall idealerweise genau zu jenem Zeitpunkt richtig positioniert und ausreichend befüllt sein, an dem sich der Insasse aufgrund des Crashpulses im Fahrzeug nach vorn verlagert. Dies passiert abhängig von der Unfallkonstellation etwa 20 bis 40 Millisekunden nach dem Erstkontakt. Ausgehend von einer frühest möglichen Zündung des Airbags 80 Millisekunden vor t_0 , muss der Airbag innerhalb von etwa 100 bis 120 Millisekunden befüllt werden. Verglichen mit einer konventionellen Auslösung dauert der Füllvorgang also etwa dreimal solange.

Ein idealer Gasgenerator müsste sofort nach der Zündung gerade so viel Druck im Luftsack aufbauen, dass die Airbagklappe in der Instrumententafel sicher geöffnet wird. In weiterer Folge sollte die Gasmenge langsam und gleichmäßig eingebracht werden, um den Luftsack sanft zu befüllen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Airbag auch eine gewisse Dynamik braucht, um sicher und reproduzierbar vor dem Insassen in Position gebracht zu werden. Unmittelbar vor Beginn der Vorverlagerung des Insassen sollte der Druck auf ein Niveau angehoben werden, mit dem von Beginn an Rückhaltekräfte auf den Insassen aufgebracht werden. Ein idealisierter, möglicher Verlauf des

Gasmassenstroms und die zugehörigen Verläufe von Airbaginnendruck und Airbagvolumen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

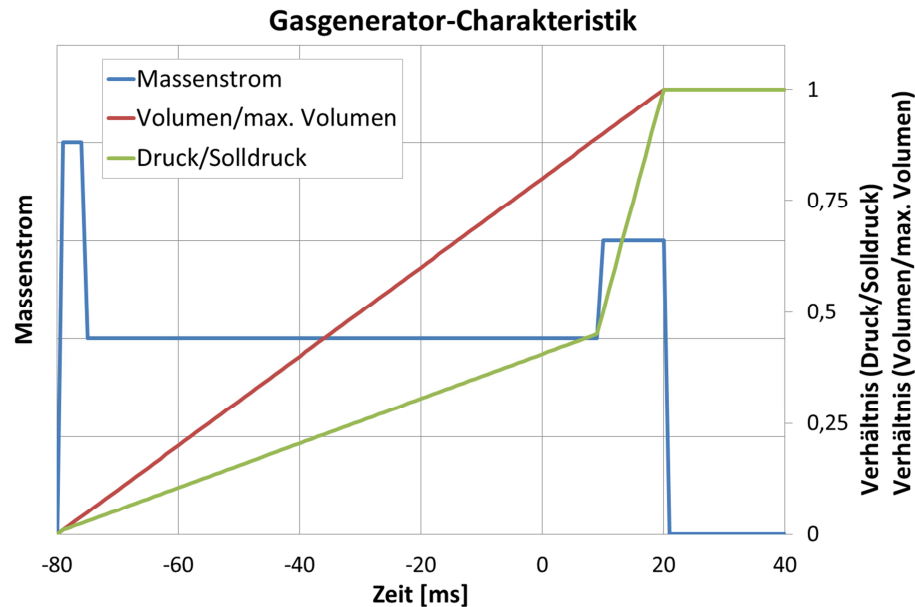


Abbildung 24: Idealierte Befüllung eines Airbags bei einer Zündung des Gasgenerators 80 Millisekunden vor t_0

In der Umsetzung mit Hardwarekomponenten muss unabhängig von der eingesetzten Gasgenerator-Technologie versucht werden, diese idealisierte Füllung bestmöglich nachzubilden. Die Bereitstellung des wünschenswerten hohen Druckes kurz vor der Vorverlagerung des Insassen könnte beispielsweise durch einen leistungsschwachen Gasgenerator mit konventioneller Abbrandcharakteristik realisiert werden.

Die „langsame“ Füllung ist eine völlig neuartige Anforderung an den Gasgenerator, welche mit den verschiedenen etablierten Gasgeneratortechnologien mehr oder weniger gut umgesetzt werden kann. Pyrotechnische Gasgeneratoren können durch Änderung der Tablettengröße des Treibmittels sowie der Änderung des Verhältnisses Treibmittel zu Inertstoffen flexibel in ihrer Abbrandcharakteristik verändert werden. Dies erfordert allerdings unter Umständen viel Entwicklungs- und Abstimmungsarbeit.

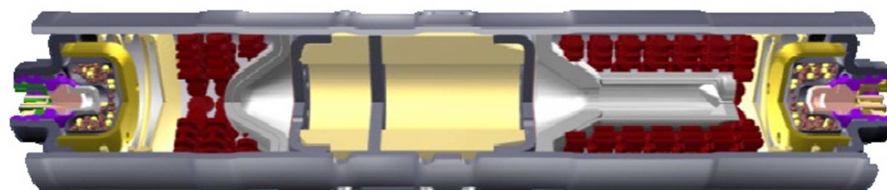


Abbildung 25: Skizze eines zweistufigen pyrotechnischen Gasgenerators ¹⁷

Die Herausforderung besteht darin, dass die Verbrennung stabil abläuft und dass die chemische Stabilität des Treibmittels bei hohen und niedrigen Temperaturen und über die gesamte Fahrzeuglebensdauer gewährleistet werden kann.

Beim Hybrid-Gasgenerator wird ein Teil des Gases komprimiert gespeichert. Durch die Zündung eines Treibsatzes wird der Druck im Gasgenerator derart gesteigert, dass eine Berstscheibe bei einem definierten Druck platzt und das Gas in den Airbag strömt.

¹⁷ aus [87], Seite 10

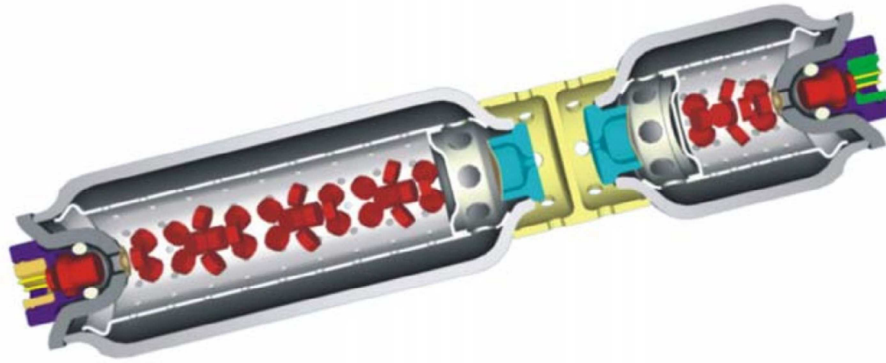


Abbildung 26: Skizze eines zweistufigen Hybrid-Gasgenerators ¹⁸

Der Vorteil dieses Gasgenerators liegt in der niedrigeren Gastemperatur und dem damit verbundenen geringeren Druckverlust des Airbags durch Abkühleffekte. Damit wäre unter Umständen schon eine geringere Leistung des Gasgenerators ausreichend, um die notwendige Rückhalteperformance auch über längere Standzeiten aufrecht zu erhalten. Nachteile sind das höhere Gewicht des Gehäuses und vor allem das Anliegen des vollen Druckes unmittelbar nach der Zündung. Dies kann in OoP-Situationen problematisch sein. Bei diesem Konzept kann eine Variation der Fülldauer relativ einfach durch eine Änderung des Abströmquerschnitts realisiert werden.

Ein neuartiges Gasgeneratorkonzept der Firma Autoliv ist den Aufbau betreffend einem Hybrid-Gasgenerator ähnlich. Aus separaten Druckbehältern werden Sauerstoff- und Wasserstoffgemische über Düsen mit einem definierten Querschnitt in eine Brennkammer geleitet.

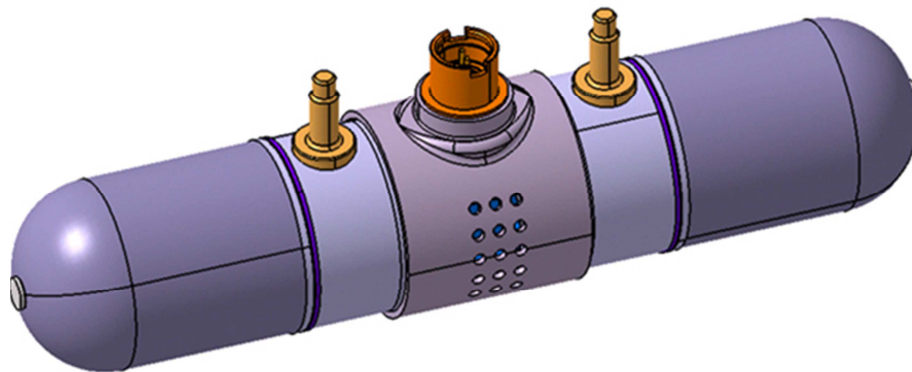


Abbildung 27: Skizze des neuartigen Gasgenerators der Firma Autoliv ¹⁹

In dieser Brennkammer kommt es zur chemischen Reaktion der beiden Gase. Das entstehende Verbrennungsgas strömt in den Airbag und füllt diesen. Die Charakteristik dieses Gasgenerators kann über die Menge an Wasserstoff, über den Fülldruck und über die Düsendurchmesser an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden. Der größte Massenstrom steht, ähnlich wie bei dem Hybrid-Gasgenerator, unmittelbar nach der Zündung zur Verfügung. Ein weiterer Nachteil ist die vergleichsweise hohe Gastemperatur, was zu stärkeren Abkühlverlusten führt.

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile der einzelnen Gasgeneratortypen, erscheint es mit dem zuletzt diskutierten Gasgenerator-Konzept am schnellsten und einfachsten möglich zu sein, die Befüllung des Luftsackes zu variieren. Somit wurde entschieden, diese Variante weiterzuverfolgen.

¹⁸ aus [87], Seite 9

¹⁹ mit freundlicher Genehmigung von Autoliv B.V. & Co. KG

4.1.2 Frühauslösung + konventionelle Auslösezeitpunkte

Wie schon im Kapitel 3.2.3.2 erläutert, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Umfoldsensorik im Fahrzeug jede denkbare Unfallsituation erkennen und richtig interpretieren kann. In so einem Fall kann, um eine etwaige Falschauslösung des Airbags zu verhindern, der Airbag nicht frühzeitig ausgelöst werden. Die Triggerung muss also über konventionelle Crash-Sensoren erfolgen. Damit muss der verwendete Gasgenerator neben der langsamen Befüllung des Luftsackes im Fall einer Auslösung vor t_0 auch für eine extrem schnelle Inflation bei konventioneller Aktivierung ausgelegt sein. In diesem Fall ist wiederum entscheidend, dass der Airbag schnellst möglich vor dem Insassen in Position gebracht und ausreichend befüllt wird, sodass die Vorverlagerung des Insassen abgebremst wird.

Wie können nun also mit einem einzigen Aggregat diese zwei sehr unterschiedlichen, gegenläufigen Anforderungen erfüllt werden?

Die „eleganteste“ Lösung wäre eine Art Druckspeicher, welcher über zwei unterschiedlich große Abströmquerschnitte verfügt.

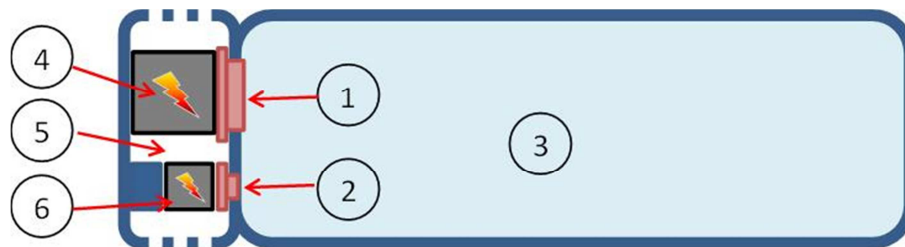


Abbildung 28: Möglichkeit eines Gasgenerators mit zwei unterschiedlichen Befüllungsgeschwindigkeiten

In der obigen Abbildung ist das Prinzip eines derartigen Gasgenerators dargestellt. Er verfügt über einen Druckspeicher (3) in dem die gesamte notwendige Gasmenge, die zur Füllung des Airbags notwendig ist, gespeichert wird. Druckverluste im Airbag durch Leckage und Abkühlung sind durch einen höheren Druck oder einen größeren Behälter kompensiert. Die Ausströmkammer (5) ist über zwei unterschiedlich große Bohrungen mit der Druckkammer (3) verbunden. Diese beiden Bohrungen sind mittels Bolzen (1) und (2) dicht verschlossen. Die beiden Bolzen stützen sich an den pyrotechnischen Aktuatoren (4) und (6) ab und bleiben so in Position. Bei der Zündung eines dieser Aktuatoren wird der jeweilige Bolzen durch den anliegenden Druck in die Ausströmkammer gedrückt und das Gas kann in den Airbag ausströmen.

Die beiden Bohrungen sind so bemessen, dass das Gas einmal innerhalb ca. 30 bis 40 Millisekunden ausströmen kann. Bei der kleineren Bohrung dauert der Ausströmvorgang aufgrund der Drosselung etwa 100 bis 120 Millisekunden. Ein möglicher Ablauf der Befüllung des Airbags ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

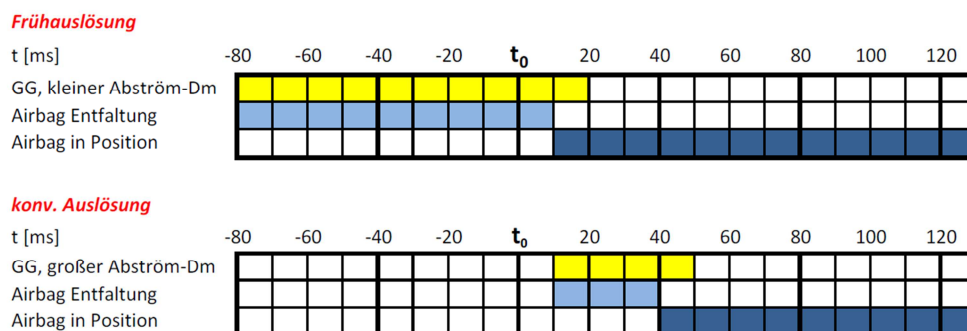


Abbildung 29: Möglicher zeitlicher Ablauf der Befüllung des Airbags mit einstufigem Gasgenerator

Der große Vorteil dieses Prinzips wäre, dass der Airbag mit der gespeicherten Energiemenge sowohl langsam im Fall der Frühauslösung, als auch schnell im Fall einer konventionellen Auslösung befüllt werden könnte. Es muss also nicht jeweils für die langsame und schnelle Füllung eine gewisse Menge Treibmittel mit unterschiedlichen Abbrandeigenschaften gespeichert werden. Dies hat Vorteile hinsichtlich Bauraum, Gewicht und Kosten des Gasgenerators. Ein derartiges Konzept wurde bisher noch nicht umgesetzt.

Eine weitere Möglichkeit, die beiden völlig unterschiedlichen Befüllungs-Arten in einem einzigen Aggregat unterzubringen wäre ein zweistufiger Gasgenerator mit je einer Stufe für die Frühauslösung und einer Stufe für die Rückfallebene. Dieses Konzept wäre im Prinzip mit jeder Gasgenerator-Technologie umsetzbar. Nachteilig ist, dass die doppelte Menge an Treibmittel gespeichert werden muss und bei einem Unfall dann je nach Auslösevariante nur eine davon aktiviert wird. Die jeweils andere Treibladung müsste nach dem Unfall entsorgt werden. Bei den stetig steigenden Anforderungen hinsichtlich Leichtbau und Kosteneinsparung im Fahrzeugbau erscheint dies als unattraktive Variante für einen Fahrzeughersteller.

Eine alternative Überlegung für einen zweistufigen Gasgenerator ist, die beiden Stufen so auszulegen, dass sie nur in Kombination den Airbag ausreichend befüllen können. Bei der Frühauslösung wird eine „langsame“ Gasgeneratorstufe aktiviert, die den Airbag zu einem Teil befüllt. Kurz vor Beginn der Vorverlagerung des Insassen wird eine zweite, „schnelle“ Stufe gezündet, die den Druck im Luftsack so erhöht, dass der Insasse früh zurück gehalten wird. So könnte durch die Zündung der zweiten Stufe auch gesteuert werden, dass der Innendruck zum gewünschten Zeitpunkt gesteigert wird. Bei einem länger andauernden Crashpuls (z.B.: EuroNCAP) könnte die Zündung beispielsweise später erfolgen, wodurch auch eine gewisse Anpassung der Rückhalteigenschaften an den Unfall möglich wäre. Folgende Abbildung zeigt einen exemplarischen Ablauf einer Aktivierung des Airbags für eine frühe bzw. konventionelle Auslösung:

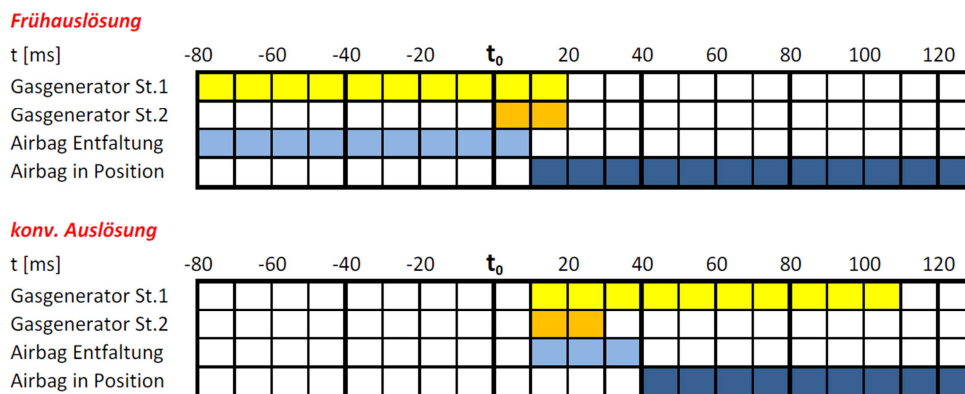


Abbildung 30: Möglicher zeitlicher Ablauf der Befüllung des Airbags mit zweistufigem Gasgenerator

Im Fall der Rückfallebene werden die beiden Stufen gleichzeitig oder mit geringem zeitlichen Versatz gezündet um den Airbag schnellst möglich zu befüllen. Die Aufteilung der gesamten Gasgeneratorleistung auf die beiden Stufen erfordert einiges an Abstimmungsarbeit. Durch einen größeren Leistungsanteil der „schnellen“ Stufe wäre auch noch eine weitere Verbesserung bei OoP-Situationen denkbar.

Eine weitere Annäherung an die „idealisierte“ Massenstrom-Kurve in Abbildung 24 würde der Einsatz einer dritten Gasgenerator-Stufe erlauben. Im Fall einer Frühauslösung wird die „langsame“ Gasgeneratorstufe aktiviert und kurz vor Beginn der Vorverlagerung des Insassen wird eine „schnelle“ Gasgeneratorstufe gezündet, um den Druck im Luftsack anzuheben und so möglichst früh eine hohe Rückhaltewirkung zu erreichen. Die „langsame“ Stufe wird dabei für den 26km/h Crashtest ausgelegt, um auch bei OoP-Situationen maximales Potential zu erreichen. Die restliche Gasmenge, die für die

Insassenrückhaltung bei einer Kollision notwendig ist, liefert die zusätzlich aktivierte, „schnelle“ Gasgenerator-Stufe.

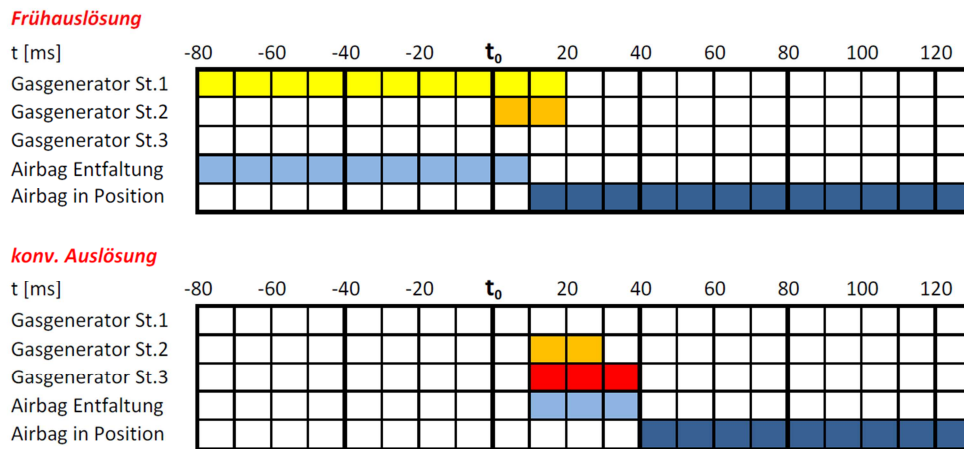


Abbildung 31: Möglicher zeitlicher Ablauf der Befüllung des Airbags mit dreistufigem Gasgenerator

Wie in der obigen Abbildung ersichtlich, werden im Fall einer konventionellen Auslösung zwei „schnelle“ Gasgeneratorstufen gleichzeitig oder mit geringem zeitlichen Versatz gezündet. Der Airbag wird dadurch schnellstmöglich in Position und auf Betriebsdruck gebracht. Diese Variante verspricht große Variabilität in der Anpassung der Rückhalteeigenschaften an den Insassen, beziehungsweise an die jeweilige Unfallschwere. Wie auch bei dem vorhin diskutierten Konzept ist in diesem Fall noch verstärkt von Nachteil, dass eine Stufe des Gasgenerators in jedem Fall entsorgt werden muss. Es erscheint auch unwahrscheinlich, dass in näherer Zukunft ein Airbagsystem mit drei Gasgeneratoren aufgrund der Anforderungen hinsichtlich Bauraum, Gewicht, Preis, Anzahl der Zündleitungen, ... in Betracht gezogen wird.

4.1.3 Umsetzung Gasgenerator

Als bester Kompromiss aus dem Befüllungsverhalten des Airbags im Vergleich zum idealisierten Verlauf der Airbagfüllung und der technischen Umsetzbarkeit des Konzeptes wurde ein zweistufiger Gasgenerator ausgewählt. Die Auslösestrategie der beiden Stufen ist in Abbildung 30 abgebildet und im Abschnitt 4.1.2 werden die Vor- und Nachteile dieses Konzeptes detailliert beschrieben.

Die beiden Gasgeneratorstufen werden mit zwei unterschiedlichen Funktionsprinzipien realisiert, beide Gasgeneratoren werden von der Firma Autoliv zur Verfügung gestellt. Die „langsame“ Füllung des Airbags mit der ersten Stufe wird mit einem eigens angepassten Wasserstoff-Gasgenerator (APG1) realisiert. Durch die geeignete Wahl der Abströmquerschnitte von Wasser- und Sauerstoff gelingt es, die Füllung des Luftsackes über einen Zeitraum von etwa 120 Millisekunden zu strecken. Die speziellen Anforderungen an diesen Gasgenerator sind, die Klappe in der Instrumententafel sicher zu öffnen und trotzdem so wenig aggressiv wie möglich bei der Füllung des Luftsackes zu sein. Dies ist insbesondere bei OoP-Situationen von großer Bedeutung. Um die gesetzlich vorgeschriebenen OoP-Tests auch mit dieser wenig aggressiven und damit vielversprechenden Konfiguration durchführen zu können, wird vorausgesetzt, dass der Gasgenerator über genügend Leistung verfügt, damit der 50%-Dummy in einem Frontal-Crashtest mit 26km/h und ohne Sicherheitsgurt ausreichend zurückgehalten werden kann. Aus der Auslösestrategie ergibt sich auch, dass der Airbag für die 5%-Frau im Falle einer konventionellen Auslösung mit nur dieser Stufe schnell genug gefüllt sein muss.

Für die zweite, kleinere Gasgeneratorstufe kommt eine Stufe eines pyrotechnischen Fahrgasgenerators zum Einsatz. Dieser Gasgenerator (ADPS-2T) ist zweistufig, die Auslegung erfolgt allerdings nur mit der schwächeren zweiten Stufe.

Je nach Lastfall und Insassenklasse werden nun entweder nur die erste Stufe (APG1) oder beide Stufen mit einem definierten zeitlichen Abstand ausgelöst. Durch eine spätere Zündung der zweiten Stufe (ADPS-2T) kann beispielsweise die Rückhaltewirkung des Airbags bei länger dauernden Pulsen, wie dem EuroNCAP-Puls, für einen längeren Zeitraum aufrecht erhalten werden.

Von den beiden Gasgeneratoren wurden Simulationsmodelle erstellt und diese anhand von Komponentenversuchen validiert. Einer dieser Versuche ist ein sogenannter Kannendruckversuch, in dem der Gasgenerator in einem druckdichten Behälter (Kanne) gezündet wird. Während des Versuchs wird der Innendruck im Behälter gemessen und die Messdaten dienen als Input für die Validierung des Simulationsmodells. In Abbildung 32 sind die Verläufe derartiger Messungen im Vergleich zu den zugehörigen Simulationen dargestellt.

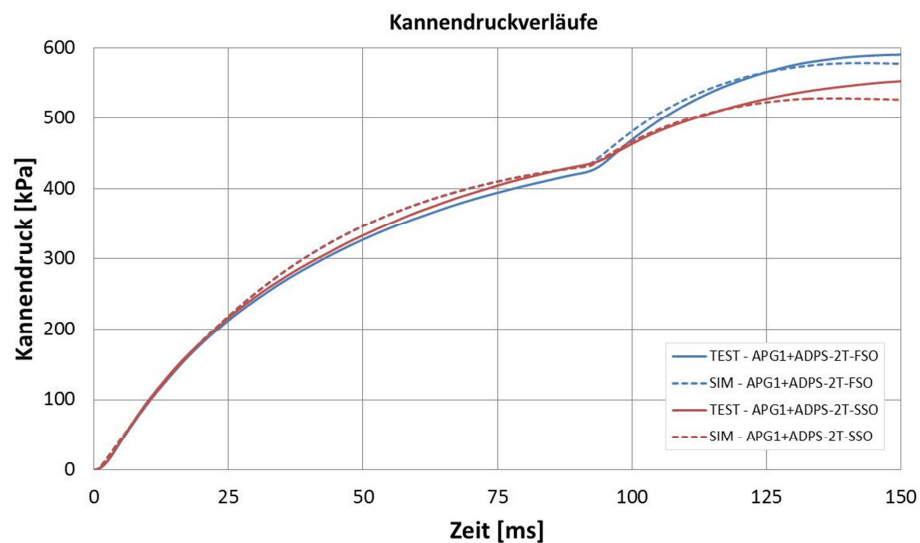


Abbildung 32: Druckverläufe aus Kannenversuchen und zugehörige Simulation

Dabei kann der Unterschied in der Leistung der beiden Stufen des pyrotechnischen Gasgenerators (FSO...First Stage Only, SSO...Second Stage Only) nachvollzogen werden. Letztere wurden jeweils 90 Millisekunden nach dem Wasserstoffgasgenerator gezündet. In der folgenden Abbildung sind die simulierten Massenstromverläufe der einzelnen Stufen dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass planmäßig nur die zweite Stufe des pyrotechnischen Gasgenerators zum Einsatz kommt.

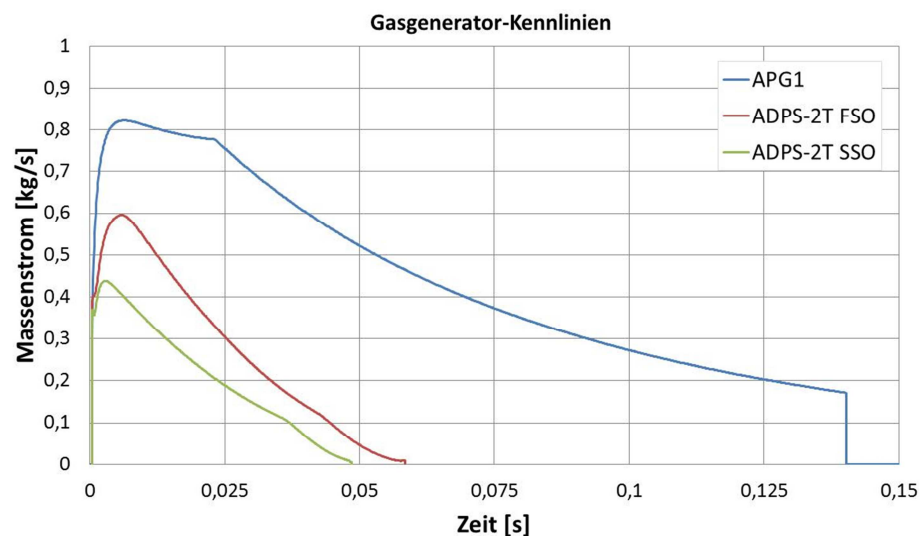


Abbildung 33: Massenstromverläufe aus Simulationsmodell

Nachdem das Modell der Gasgeneratoren gut validiert ist, müssen die Verluste während der Entfaltung und der Standzeit des Luftsackes sowie das Ausströmverhalten aus dem aktiven Vent im Simulationsmodell abgebildet werden. Dafür werden Horizontalimpaktor-Versuche durchgeführt. In genau definierten Randbedingungen wird der Airbag ausgelöst und mit einem geführten Impaktor definierter Masse beschossen. Dieser Versuch wird in einem Simulationsmodell nachgestellt, wobei durch Anpassung bestimmter Verlustparameter die gemessenen Beschleunigungsverläufe und die simulierten Kurven bestmöglich zur Übereinstimmung gebracht werden können. Somit sind Verluste durch Abkühlung, Leckage,... im Modell abgebildet und es können Aussagen über Rückhaltekräfte für den Insassen getroffen werden. Durch die möglichst physikalische Abbildung dieser Effekte ist gewährleistet, dass das Simulationsmodell in den verschiedenen Lastfällen prognosefähig ist.

4.2 Neuartige Anforderungen an den Airbag

In der Diskussion des theoretischen Potentials eines früh ausgelösten Airbags im Kapitel 2.1 wurde festgestellt, dass durch eine größere mögliche Airbagform die Belastungen für den Insassen deutlich reduziert werden können. Um dieses Potential zu heben, ist aber eine Variabilität der Airbagform zwingend notwendig, da die Anforderungen an die Geometrie des Airbags in den verschiedenen Lastfällen so unterschiedlich sind, dass sie mit einer einzigen Form nicht abgedeckt werden können. Der obere Grenzlastfall für die Größe des Luftsacks ist dabei der 95%-Dummy bei einer frühen Auslösung, der untere die 5%-Frau bei einer konventionelle Auslösung. Will man diese Lastfälle mit einer einzigen Form abdecken kann im einen Fall für größere Insassen keine Verbesserung erzielt werden und im anderen Fall werden kleine Insassen, die weiter vorne sitzen, vom Airbag angeschnitten. Um also durch eine frühe Auslösung des Airbags bei einer Frontalkollision das Verletzungsrisiko für alle Insassenklassen zu reduzieren, ist eine Variabilität der Airbagform erforderlich.

4.2.1 Airbagform

Um jedem Insassen den bestmöglichen Schutz bieten zu können, wäre eine stufenlos einstellbare Airbagform ideal, die in Abhängigkeit der Insassengröße und dessen Sitzposition angepasst werden kann. Im Experimental-Sicherheits-Fahrzeug ESF2009 wird ein Mechanismus vorgestellt, mit dem eine derartige Verstellmöglichkeit realisiert wurde [19]. Ein solches Konzept erscheint allerdings aufgrund seiner Komplexität in näherer Zukunft noch nicht in einem Serienfahrzeug umsetzbar. Darüber hinaus müsste für eine stufenlose Airbagform auch die Gasgenerator-Leistung adaptiert werden, um immer den optimalen Innendruck für eine frühe Ankopplung zu erreichen.

Ein denkbarer und einfacher umzusetzender Ansatz ist eine zweistufige Airbagform. So könnte beispielsweise eine große Airbagform für die frühe Auslösung ausgelegt werden und im Fall einer konventionellen Zündung wird eine kleinere Form aktiviert, um einen Anschlag des Insassen zu verhindern. Ein derartiges Airbagsystem wurde schon in anderen Untersuchungen [82, 2005e] umgesetzt und getestet. Die kleinere der beiden unterschiedlichen Airbagformen wurde dabei durch Zurückhalten von einigen innenliegenden, pyrotechnisch lösbaren Fangbändern aus der größeren Form realisiert. Die Gasmenge zur Füllung des Airbags wurde durch die Steuerung von aktiven Vents an die jeweilige Form angepasst.

Damit der Airbag möglichst schnell Rückhaltekräfte auf den Insassen aufbringen kann, müssen einige grundlegende Gestaltungsrichtlinien berücksichtigt werden. Um eine optimale Ankopplung des Insassen zu erreichen, sollte der Luftsack schon vor der ersten Vorverlagerung am Insassen anliegen und eine gewisse Vorspannung aufbauen. Es ist sehr wichtig, dass der Airbag dabei gleichmäßig und großflächig auf den Insassen Rückhaltekräfte aufbringt. Entscheidend für die Kopfbelastung ist auch, dass der Abstand zwischen Kopf und Airbag nicht allzu groß ist. Die Form muss darüber hinaus so gestaltet sein, dass sie sich auch stabil an der Instrumententafel und der Windschutzscheibe abstützt. Ansonsten weicht der Airbag unter der Last des Insassen zurück und wertvoller Weg zur Verzögerung

geht verloren. Insbesondere bei Airbagformen mit einer großen Ausdehnung in Fahrzeuginnenraumrichtung ist darauf zu achten, dass der Luftsack breit genug ist, um beim Eintauchen des Dummys nicht seitlich auszuweichen. Dies ist speziell für teilüberdeckte Kollisionen von großer Bedeutung. In Abbildung 34 ist eine mögliche Airbagform dargestellt, welche die obigen Kriterien erfüllen würde.

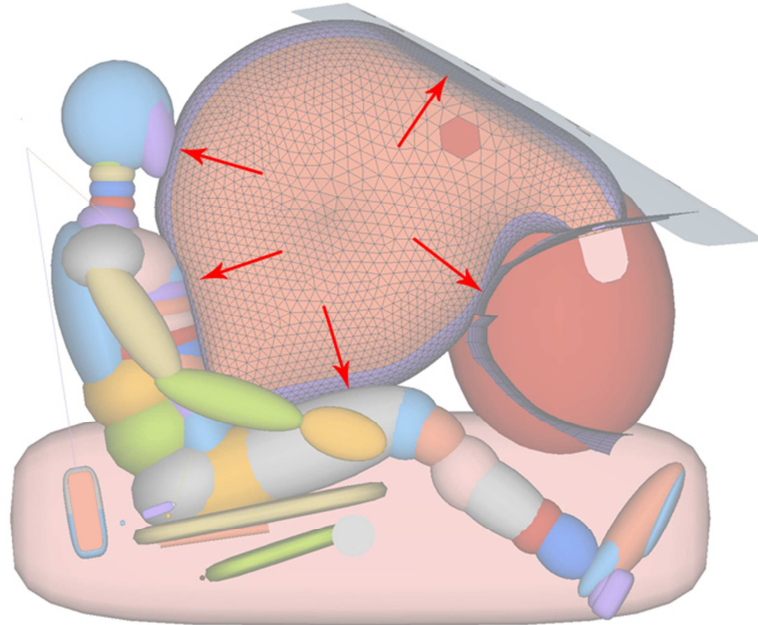


Abbildung 34: Mögliche „ideale“ Airbagform für 50%-Dummy

Eine weitere Anforderung an die beiden Airbagformen ist, dass sie sich in ihrem Volumen nicht allzu sehr unterscheiden. Ein sehr großer Volumenunterschied könnte die Abstimmung der Gasgeneratoren unter Umständen sehr schwierig machen. Bei einer größeren Längsausdehnung gewinnt der Airbag tendenziell auch an Breite und damit an Volumen. Dieser Effekt kann durch eine Quereinschnürung des Airbags gegebenenfalls reduziert oder auch kompensiert werden.

Wie sollen nun die beiden Airbagformen gestaltet werden, sodass alle unterschiedlichen Anforderungen bestmöglich abgedeckt werden? Die Grenzfälle sind, wie schon erläutert, der 95%-Dummy bei einer frühen Auslösung und die 5%-Frau bei konventioneller Auslösung. Alle anderen Konfigurationen liegen hinsichtlich der Position des Dummys zwischen diesen beiden Lastfällen. Es wird an dieser Stelle noch festgehalten, dass der Hauptfokus auf dem 50%-Mann und der 5%-Frau liegt. Der 95%-Dummy wird bei der Gestaltung der Airbagformen zwar berücksichtigt, die Auslegung erfolgt aber in erster Linie für die beiden kleineren Dummies. Im Folgenden wird untersucht, bei welchen Kombinationen aus Lastfällen sich die geringsten gegenläufigen Anforderungen hinsichtlich der Längsausdehnung der Airbagform ergeben: Eine Möglichkeit wäre, eine Form für die Frühauslösung und eine Form für die konventionelle Auslösung zu gestalten. Diese beiden Formen werden dabei jeweils für alle drei Insassenklassen aktiviert.

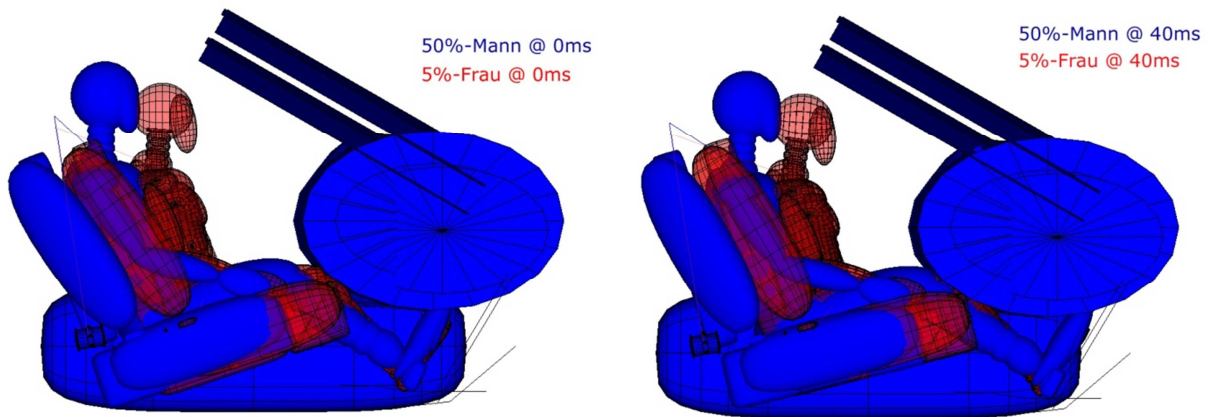


Abbildung 35: Platzverhältnisse für Airbagformen; Form 1: Normsitzposition bei Frühauslösung, Form 2: vorverlagerte Sitzposition bei konv. Auslösezeiten

Es zeigt sich dabei ein relativ großer Unterschied bei der Sitzposition der 5%-Frau und des 50%-Mannes, die Frau befindet sich um etwa 15 Zentimeter näher an der Instrumententafel. Um einen Anschluss der Frau durch den Airbag zu verhindern, könnte die Airbagform für die Frühauslösung nur minimal größer gestaltet werden als die heutige Serien-Airbagform. Die Form für die konventionelle Auslösung müsste in etwa der Serien-Airbagform entsprechen. Diese Kombination verspricht also kaum Verbesserungen des Insassenschutzes durch eine frühe Aktivierung des Airbags, insbesondere für den 50%- und 95%-Mann.

Alternativ wurde überlegt, die große Airbagform nur für den 50%-Dummy zu gestalten. Diese soll dann sowohl bei der frühen als auch bei einer konventionellen Auslösung und auch für den 95%-Dummy aktiviert werden. Die zweite Airbagform wird für die 5%-Frau gestaltet und kommt wiederum bei der Frühauslösung und der konventionellen Auslösung zum Einsatz.

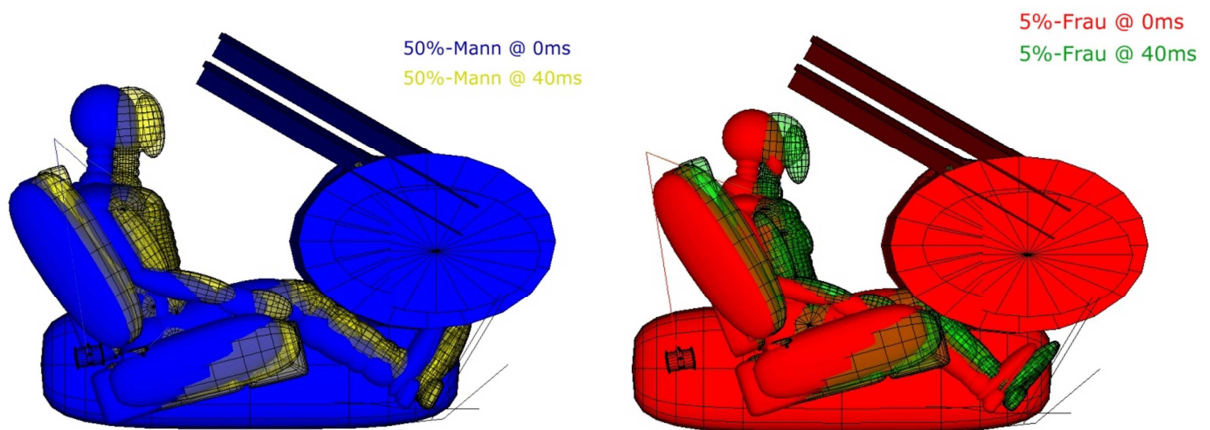


Abbildung 36: Platzverhältnisse für Airbagformen; Form 1: 50%- und 95%-Mann, Form 2: 5%-Frau

Bei dieser Variante unterscheiden sich die einzelnen Sitzpositionen wesentlich weniger stark, die jeweilige Airbagform kann also größer gestaltet werden. Die Form für die 5%-Frau kann besser an diesen Dummy angepasst werden, was vor allem hinsichtlich des neuen US-NCAP-Ratings Vorteile bringen könnte. Ohne die Berücksichtigung der 5%-Frau kann die Airbagform für die beiden großen Dummies auch deutlich größer gestaltet werden, was, wie im Kapitel 2.1 beschrieben, zu geringeren Insassenbelastungen führen könnte.

4.2.2 Ausgleich von höheren Gasverlusten

Während der Befüllung des Airbags kommt es zu einem Druckverlust als Folge von Leckagen und der Abkühlung des Gases. Bei der Frühauslösung können diese Effekte wesentlich länger wirken und spielen daher eine größere Rolle als bei der konventionellen Auslösung.

Zu Leckagen kommt es hauptsächlich über das Gewebe, welches in der Regel gasdurchlässig ist. In Airbags sind auch Abströmöffnungen, sogenannte Vents, vorhanden wodurch der Airbag nachgiebiger wird und der verfügbare Verzögerungsweg des Insassen ausgenutzt werden kann. Diese Vents sind bei konventionellen Airbags permanent offen, was dazu führt, dass eine größere Menge an Gas entweichen kann. Weitere Leckagen treten an den Nähten am Luftsack und im Modulgehäuse bei der Anbindung an den Gasgenerator auf.

All diese Verluste verursachen einen Druckverlust im Airbag, was zur Folge hat, dass der Insasse den Bag weiter komprimieren muss, bevor sich durch einen ausreichenden Innendruck Rückhaltekkräfte aufbauen. Dieser Weg geht für eine kontrollierte Verzögerung des Insassen verloren, was automatisch zu höheren Belastungen führt. Um den zur Verfügung stehenden Raum optimal auszunutzen, müssen Rückhaltekkräfte von Beginn der Vorverlagerung auf den Insassen aufgebracht werden.

Eine Möglichkeit, um zum richtigen Zeitpunkt ausreichend Druck im Luftsack bereitzustellen ist, die Verluste durch Leckage und Abkühlung im Gasgenerator durch Mehrleistung zu kompensieren. Dies bewirkt allerdings, dass der Gasgenerator größer und schwerer wird. Darüber hinaus führt die größere gespeicherte Energiemenge auch dazu, dass es in OoP-Situationen tendenziell zu höheren Belastungen kommt.

Die andere Möglichkeit besteht darin, nach Möglichkeit die Verluste zu minimieren. Der Druckverlust durch die Abkühlung kann grundsätzlich durch eine niedrige Gastemperatur verringert werden, was Vorteile für einen Hybrid-Gasgenerator bedeuten würde. Leckageverluste können minimiert werden, indem beispielsweise ein mit Silikon beschichtetes Airbaggewebe verwendet wird. Dies spielt insbesondere bei dem Wasserstoff-Gasgenerator der Firma Autoliv eine große Rolle, da dieser ein vergleichsweise „sauberes“ Verbrennungsgas produziert. Herkömmliche Gasgeneratoren entwickeln eine Menge an Partikeln, die die Poren im Luftsackgewebe von innen her „verstopfen“ und so den Airbag dichter machen. Bei der Zündung des Wasserstoff-Gasgenerators entstehen nur durch die pyrotechnische Zündpille Partikel, das Gas kann daher leichter durch das Luftsackgewebe entweichen. Hinsichtlich des Druckverlustes im Airbag und der Minimierung der Gasgeneratorleistung im Fahrzeug erscheint der Einsatz eines mit Silikon beschichteten Luftsackgewebes (z.B.: dTex 480 g/m², 25g Silikon) auf jeden Fall sinnvoll. Die fehlende Entweichung des Gases durch das Gewebe muss allerdings bei der Abstimmung der Vent-Durchmesser für die „Härte“ des Airbags berücksichtigt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Verluste des Airbags ist die Minimierung der offenen Querschnitte im Luftsack. Um dem Airbag eine gewisse Nachgiebigkeit zu verleihen müssen immer Abströmquerschnitte wie beispielsweise Vents mit einer definierten Fläche vorgesehen werden. Diese sind bei konventionellen Airbags einfache Öffnungen, durch die das Gas permanent ausströmen kann. Im Fall der Befüllung über einen längeren Zeitraum kann hier eine nicht unwesentliche Menge Gas entweichen, die im Gasgenerator vorgehalten werden muss.

Um diesen Effekt zu minimieren, könnte der gesamte notwendige Abströmquerschnitt in zwei Vents aufgeteilt werden, wobei eines davon erst während der Kollision geöffnet wird. Je nach Wahl der Durchmesser der beiden Vents, lässt sich so ein Großteil der Verluste verhindern.

Darüber hinaus eröffnet ein aktives Vent die Möglichkeit, die Rückhalteeigenschaften des Airbags an die Unfallschwere, beziehungsweise an den Insassen anzupassen. Die Effektivität eines solchen Systems wurde schon in verschiedenen Studien nachgewiesen [78, 2009f] [71, 1998c] [76, 2008g].

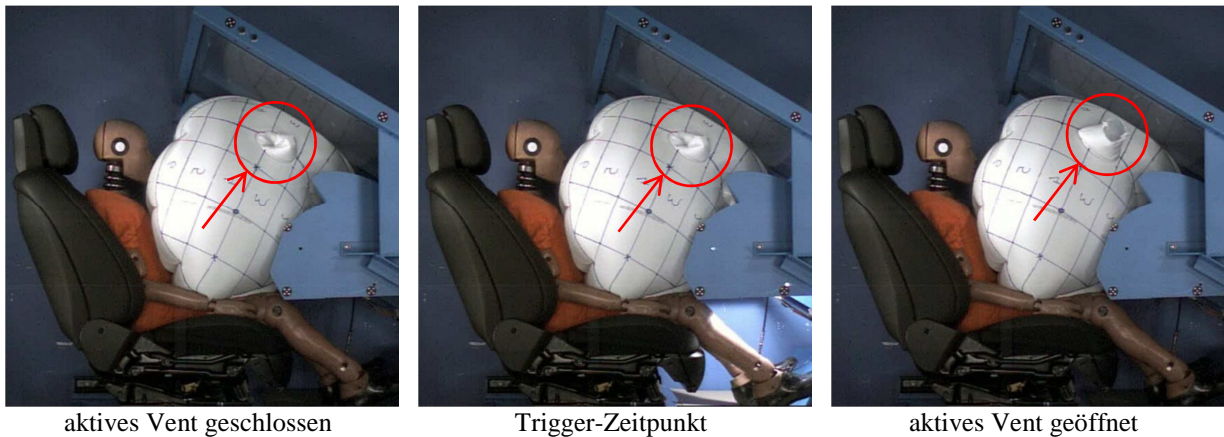


Abbildung 37: Variante eines aktiv geöffneten Vents²⁰

Die Abstimmung der Venturdurchmesser ist wiederum durch zwei Grenzlastfälle bestimmt. Die größten Rückhaltekräfte sind beim 50%-Dummy im ungegurteten FMVSS208-Lastfall notwendig. Der Airbag muss für diesen Fall sehr straff sein, um einen Durchschlag des Kopfes an die Windschutzscheibe oder die Instrumententafel zu verhindern. Um dies zu erreichen, muss die Abströmöffnung möglichst klein sein. Bei einer Konfiguration mit einem Standard-Vent und einem aktiven Vent könnte dafür das aktive Vent geschlossen bleiben. Dieser Lastfall ist also für den Durchmesser des Standard-Vents maßgeblich.

Die 5%-Frau benötigt hingegen durch ihr wesentlich geringeres Gewicht einen nachgiebigeren Airbag, um möglichst sanft abgebremst zu werden. Für diesen Fall könnte das aktive Vent groß ausgelegt und schon sehr früh während der Kollision geöffnet werden, um eine größere Leckage und damit einen weicheren Airbag zu erreichen. Mit diesem Lastfall definiert man daher den Durchmesser des aktiven Vents.

Mit dieser Kombination sollten alle anderen Kombinationen aus Crashtests und Insassen abgedeckt werden können. Es ist auch hier wieder zu bemerken, dass der schwere 95%-Dummy bei der Auslegung der Venturdurchmesser nicht maßgeblich ist. Für diesen Dummy wird lediglich mit der ermittelten Kombination an Venturdurchmessern für jeden Lastfall ein optimaler Öffnungszeitpunkt des aktiven Vents ermittelt.

Minimale Leckageverluste könnten dadurch erreicht werden, dass nur ein aktives Vent verbaut wird, welches für jeden Lastfall zum richtigen Zeitpunkt geöffnet wird. Bei einem Airbag aus gasdichtem Gewebe und nur einem Vent ist davon auszugehen, dass diese Öffnung einen relativ großen Durchmesser haben müsste. Sehr große aktive Vents sind allerdings empfindlich bezüglich ihres Zündzeitpunktes. Die Rückhalteigenschaften des Airbags sind also wenig robust, wenn der Öffnungszeitpunkt des aktiven Vents Schwankungen unterliegt. Ein derartiges Verhalten ist bei der Auslegung von Rückhaltesystemen nicht erwünscht, weil es durch die unendliche Vielzahl an möglichen Unfallkonfigurationen bei der Auslösung des Airbags, beziehungsweise eines aktiven Vents immer zu gewissen zeitlichen Abweichungen vom „Soll-Auslösezeitpunkt“ kommen kann. Die Kombination aus einem kleinen Basisvent und einem aktiven Vent erfüllt die Anforderungen hinsichtlich der Verluste beziehungsweise einer gewissen Adaptivität und führt zu einem erstrebenswerten robusten Verhalten der Rückhalteigenschaften.

4.2.3 Umsetzung Airbag

Wie schon bei der Diskussion der Gasgeneratoren erwähnt, konnte die Firma Autoliv als Technologiepartner für dieses Projekt gewonnen werden. Neben dem Gasgenerator wird auch der Airbag und ein Modulgehäuse zur Verfügung gestellt.

²⁰ mit freundlicher Genehmigung von Autoliv B.V. & Co. KG

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile des mehrstufigen und des stufenlosen Konzeptes für die Airbagform wurde entschieden, ein Airbagsystem mit einer zweistufigen Form zu realisieren. Aufgrund der Voruntersuchung hinsichtlich der bestmöglichen Kombination verschiedener Lastfälle für die beiden Airbagformen, fiel die Wahl auf die Variante mit einer großen Form für den 50%- und 95%-Dummy und der kleineren zweiten Form für die 5%-Frau.

Als erster Schritt wurde die Form für die beiden großen Dummies gestaltet. Unterschiedlichste Varianten wurden dabei mittels Simulation hinsichtlich der auftretenden Insassenbelastungen verglichen und schrittweise optimiert. Das Ziel dabei war, für den 50%-Dummy in der Normsitzposition eine bestmögliche Ankopplung zu erreichen und in der vorverlagerten Position einen Anschluss zu verhindern. Dabei wurde auch die leicht unterschiedliche Sitzposition des 50%-Dummys in den beiden Rating-Lastfällen Euro- und US-NCAP berücksichtigt. In Abbildung 38 ist diese Form jeweils zu jenem Zeitpunkt dargestellt, bei dem der Airbag voll entfaltet ist:

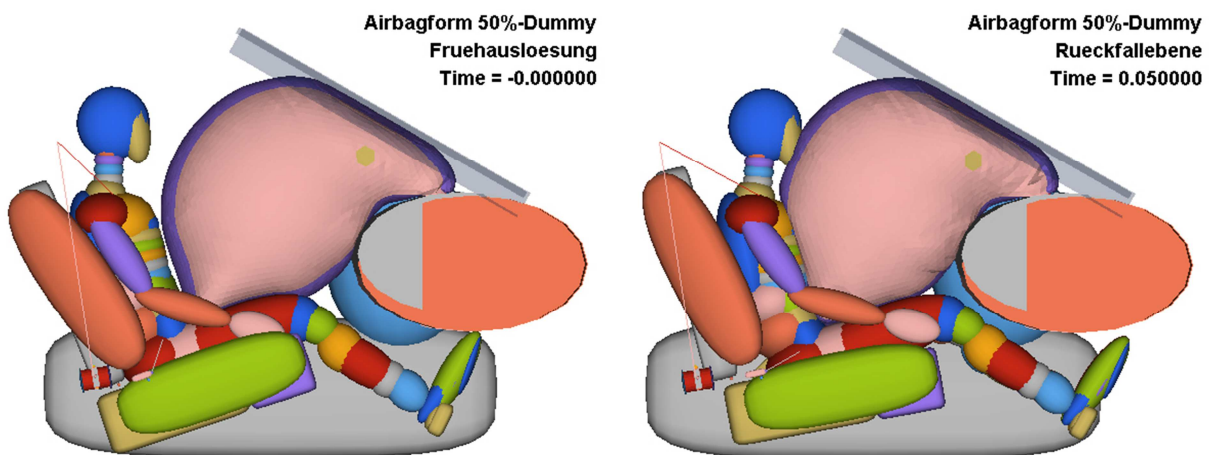


Abbildung 38: Airbagform für 50%- und 95%-Dummy im Fall einer Frühauslösung und der konventionellen Auslösung

In enger Abstimmung mit dem Luftsacklieferanten wurde die Geometrie auch hinsichtlich Fertigung und Integrität optimiert.

Ausgehend von der Airbaggeometrie für die beiden großen Dummies wurde in weiterer Folge versucht, durch Einschnüren des Luftsackes mittels innenliegender Fangbänder eine geeignete Geometrie für die 5%-Frau zu finden. Dabei wurden die Anzahl, die Position der Anbindungspunkte und die Länge der Fangbänder variiert um minimale Brusteingdrückung und Nackenbelastung zu erreichen. Diese stellen die beiden kritischen Verletzungskriterien beim US-NCAP-Rating ab dem Modelljahr 2011 dar.

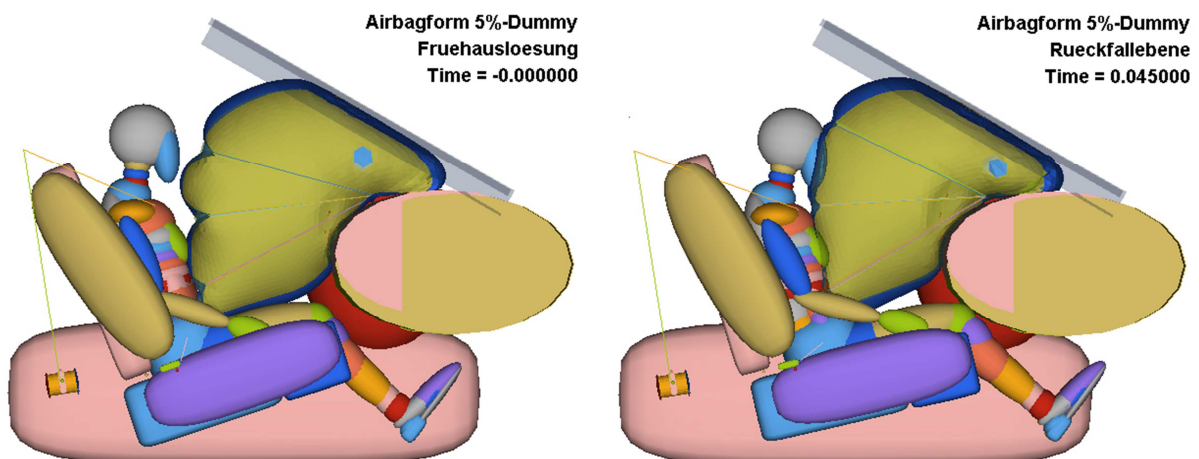


Abbildung 39: Airbagform für 5%-Frau im Fall einer Frühauslösung und der konventionellen Auslösung

In der obigen Abbildung sind auch deutlich die innenliegenden Fangbänder zu sehen, mit denen die Stirnfläche des Airbags zurückgehalten wird. Diese drei Fangbänder laufen zu einem stärkeren Fangband zusammen, welches mittels einer pyrotechnischen Aktorik bei Bedarf freigegeben werden kann.

Um die Abstimmung der einzelnen Gasgenerator-Stufen zu erleichtern, war ein Ziel bei der Gestaltung der einzelnen Formen ein möglichst geringer Volumenunterschied. In Abbildung 40 sind die zeitlichen Verläufe des Airbagvolumens für verschiedene Konfigurationen dargestellt.

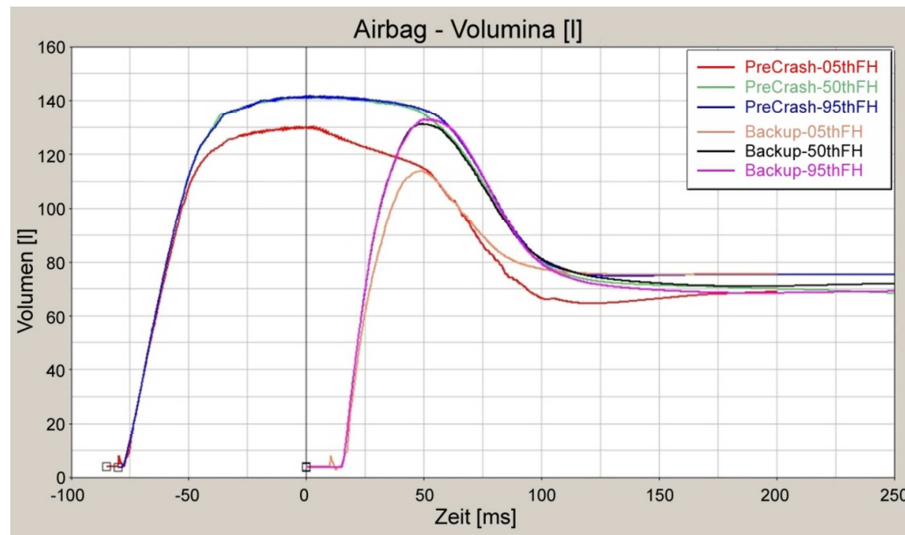


Abbildung 40: Verläufe des Airbagvolumens der beiden Formen bei unterschiedlichen Auslösungen

Es zeigt sich, dass das maximale Volumen des größeren Airbags bei etwa 140 Liter im Fall der Frühauslösung und etwa 130 Liter bei einer konventionellen Auslösung beträgt. Der Unterschied ergibt sich durch die Position des Dummies, der sich aufgrund der Fahrzeugverzögerung schon in Richtung der Instrumententafel vorverlagert hat. Der Airbag für die 5%-Frau hat bei einer Auslösung vor t_0 ein maximales Volumen von etwa 130 Liter und konventionell ausgelöst etwa 115 Liter.

Bei der Fertigung des Airbags mussten insbesondere im Bereich des Sackmundes (Anbindung des Luftsacks im Modulgehäuse) geringfügige Änderungen an der Vorgabegeometrie vorgenommen werden. Die Abweichungen in diesem Bereich ergeben sich aus der sehr vereinfachten Abbildung des Modulgehäuses im Simulationsmodell, auf Basis dessen der Airbag gefertigt wurde. Um sicher zu sein, dass die reale Airbagform mit jener der Simulation übereinstimmt, wurden die beiden Airbags hergestellt und in Standversuchen mit den entsprechenden Simulationsmodellen verglichen.

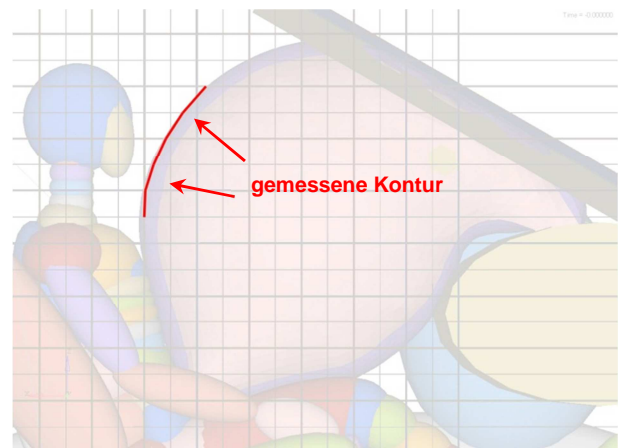


Abbildung 41: Kontrolle der Airbagform in der Simulation, 50%-Dummy

Dazu wurde mit einem 2D-Messsystem die Kontur der Stirnfläche des Airbags in der Versuchskarosse vermessen. Diese Messungen wurden dann mit einem Screenshot aus einer entsprechenden Simulation überlagert. In Abbildung 41 ist im rechten Bild die gemessene Kontur (rote Linie) im Bereich des Dummykopfes über der simulierten Airbagkontur dargestellt. Es zeigt sich dabei, dass die Simulation den realen Airbag sehr gut abbildet, bzw. dass der Airbag der Vorgabe sehr gut entspricht. Dasselbe wurde auch mit der eingeschnürten Airbagform für die 5%-Frau durchgeführt.

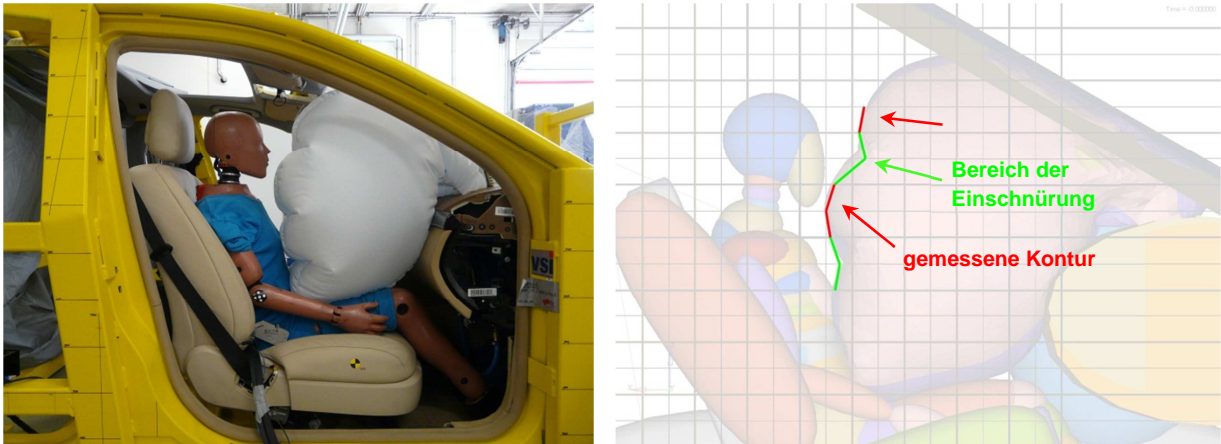


Abbildung 42: Kontrolle der Airbagform in der Simulation, 5%-Dummy

Im Bereich der Einschnürungen konnte die Vermessung der Kontur nur sehr schlecht vorgenommen werden, bei den „Ausbauchungen“ dazwischen zeigt sich aber wieder eine recht gute Übereinstimmung zwischen der realen Airbagform und dem Simulationsmodell.

4.3 Auslösestrategien

Vor der eigentlichen Auslegung der Rückhaltesysteme für die einzelnen Lastfälle wurden noch einige grundlegende Überlegungen hinsichtlich der Auslösestrategien durchgeführt. Die bereits vorweggenommenen Untersuchungen und Entscheidungen für ein bestimmtes Konzept von Gasgenerator und Airbagform sind ebenfalls Ergebnisse derartiger Überlegungen. Im Folgenden werden zwei mögliche Auslösestrategien anhand von Diagrammen veranschaulicht:

In Abbildung 43 wird eine Variante vorgestellt, bei der insgesamt vier Zündleitungen für pyrotechnische Aktuatoren notwendig sind. Diese setzen sich aus den beiden Gasgeneratoren, dem erforderlichen Aktuator für die Volumensteuerung und dem Aktuator für das aktive Vent zusammen. In dem Referenzfahrzeug sind im Vergleich dazu lediglich zwei Zündleitungen für die beiden Gasgenerator-Stufen notwendig.

Bei der Frühauslösung wird für alle Dummies die „langsame“ Gasgenerator-Stufe gezündet, es werden jedoch abhängig vom Insassen entweder die große oder die kleine Airbagform aktiviert. Diese Gasgenerator-Stufe ist so dimensioniert, dass sie den kleineren Airbag auf Betriebsdruck bringen kann. Aufgrund des größeren Volumens muss für die größere Form noch zusätzlich eine leistungsschwache pyrotechnische Stufe gezündet werden. Dies passiert abhängig vom Lastfall derart, dass etwa 30 bis 40 Millisekunden nach t_0 der volle Druck im Airbag anliegt. Ziel ist, den Dummy von Beginn der Vorverlagerung an bestmöglich an die Fahrzeugverzögerung anzukoppeln.

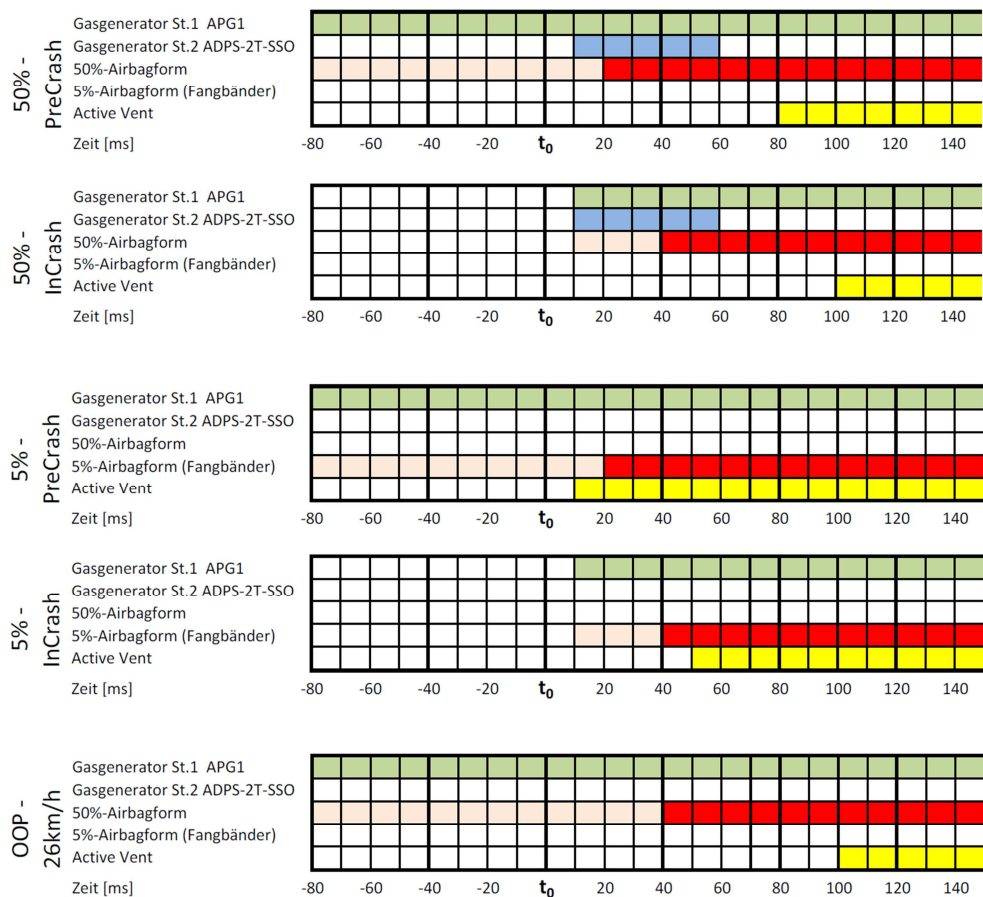


Abbildung 43: Mögliche Auslösestrategie für vier Zündkreise

Das aktive Vent wird je nach Lastfall so geöffnet, dass der Weg zur Vorverlagerung des Insassen bestmöglich ausgenutzt wird.

Im Falle einer konventionellen Auslösung werden für die große Airbagform beide Gasgenerator-Stufen gleichzeitig oder mit geringem zeitlichen Versatz gezündet, damit der Airbag schnellst möglich in Position gebracht wird und den Insassen abfangen kann. Bei der 5%-Frau ist denkbar, dass allein die „langsame“ Gasgeneratorstufe ausreicht um das kleinere Luftsackvolumen derart zu befüllen, dass schnellst möglich Rückhaltekräfte auf den Insassen aufgebracht werden können. Falls sich heraus stellt, dass die Befüllung des Airbags auf diese Art und Weise zu langsam ist, kann zusätzlich die pyrotechnische Stufe gezündet werden. Es muss dann allerdings das aktive Vent deutlich früher geöffnet werden, damit der Airbag nicht zu hart wird.

Für OoP-Situationen soll nur die langsame Stufe gezündet werden, was aber bedeutet, dass der Insasse in dieser Konfiguration auch im ungesicherten 26km/h-Crash ausreichend zurück gehalten werden kann. Es ist anzunehmen, dass das aktive Vent aus diesem Grund erst relativ spät oder gar nicht geöffnet werden kann.

Da ein zusätzlicher Zündkreis für einen pyrotechnischen Aktuator zusätzlichen Aufwand bei einer ganzen Reihe von Bauteilen nach sich zieht, ist es wünschenswert, die Anzahl aufs Minimum zu reduzieren. Im Folgenden wird eine Variante vorgestellt, die mit einer Zündleitung weniger auskommt als die oben diskutierte Option, und dabei nur wenig Einbußen hinsichtlich Variabilität hat:

Die Idee ist, die Volumensteuerung mit der zweiten, kleinen Gasgeneratorstufe zu koppeln. Sobald also die zweite Stufe des Generators gezündet wird, werden auch die Fangbänder für die kleine Airbagform freigegeben.

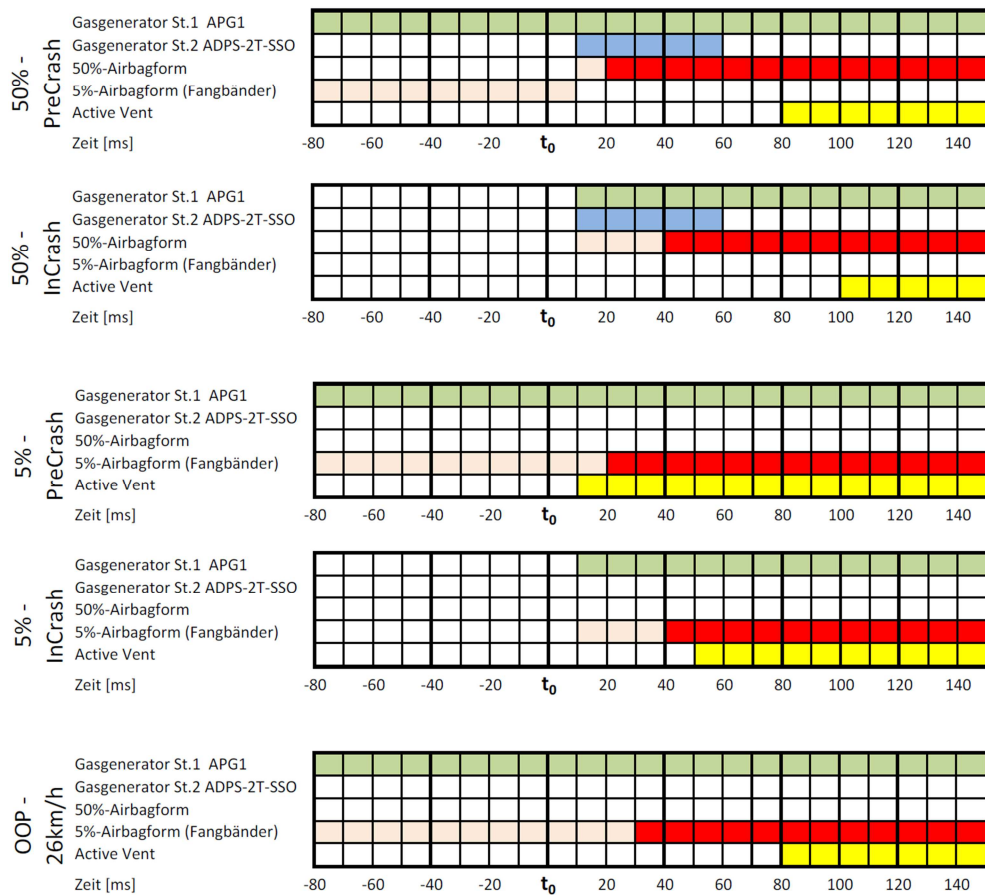


Abbildung 44: Mögliche Auslösestrategie für drei Zündkreise

Dies führt dazu, dass sich bei der Frühauslösung für den 50%- und 95%-Dummy zuerst die kleine Form entfaltet und erst knapp nach t_0 die Bänder für die große Form freigegeben werden. Dabei besteht allerdings die Gefahr, dass dieser späte Umschaltvorgang eventuell zu einem Anschluss des Dummys führt.

Im Fall einer konventionellen Auslösung mit der 5%-Frau kann mit dieser Variante die zweite Gasgeneratorstufe nicht mehr aktiviert werden, da ansonsten auch gleichzeitig die große Airbagform ausgelöst werden würde, was mit ziemlicher Sicherheit zu einem massiven Anschluss mit entsprechendem Verletzungsrisiko führen würde.

Zuletzt muss der OoP-Test mit der kleinen Airbagform durchgeführt werden. Es ist aber davon auszugehen, dass dies für OoP keinen gravierenden Unterschied macht, da die für OoP relevante Entfaltung bis etwa 30 Millisekunden nach t_0 ziemlich ähnlich sein sollte.

Für dieses Projekt wurde die Strategie mit den vier Zündkreisen verfolgt, damit man sich in der frühen Phase dieser Untersuchung keine Detail-Probleme einhandelt, die nicht direkt zur Potentialabschätzung eines früh ausgelösten Airbags beitragen. Es wurden aber zu den einzelnen Problemstellungen der Variante mit drei Zündkreisen Prinzipsimulationen durchgeführt und etwaige Schwierigkeiten bei der Umsetzung dieser Strategie aufgezeigt.

Für die gewählte Auslösestrategie erscheinen die konventionelle Auslösung mit dem „langsamen“ Gasgenerator für die 5%-Frau und der ungegurtete 26km/h-Crash für den 50%-Mann als die kritischen Konfigurationen. Diese Fragestellungen wurden in separaten Simulationen untersucht um sicher zu gehen, dass kein systematischer Fehler im Konzept gemacht wurde.

In den nun folgenden beiden Kapiteln werden die Auslegung der Rückhaltesysteme und die Untersuchung des Verbesserungspotentials für den Insassenschutz beschrieben, beginnend mit der OoP-Problematik:

4.4 Ergebnisse: OoP-Performance

Wie im Kapitel 2.2 beschrieben, stellt die durch eine frühe Auslösung mögliche sanftere Entfaltung des Airbags einen wesentlichen Teilaspekt dieser Untersuchung dar. Mit dem vorliegenden Simulationsmodell können jedoch die Fragestellungen nach dem Verbesserungspotential des Insassenschutzes bei derartigen Belastungen nicht beantwortet werden. Für eine Bewertung der Interaktion zwischen dem Dummy und dem Airbag während der Entfaltungsphase ist das verwendete Madymo-Modell (Uniform Pressure Methode) nicht geeignet (vgl. [8, 2004a], [55, 2006c]). Somit wird die Reduktion der Airbag-Aggressivität und der damit verbundenen niedrigeren Insassenbelastung anhand von Versuchen nachgewiesen.

4.4.1 Ergebnisse Versuchsserie 1

Im ersten Schritt wurde lediglich der Serien-Gasgenerator in dem bestehenden Beifahrer-Airbagmodul durch einen Treibsatz ersetzt, mit welchem eine Befüllung des Luftsackes über einen längeren Zeitraum möglich war. Somit ist der Einfluss einer geänderten Luftsackgeometrie sowie der Faltung auf die Belastungswerte des Dummies weitgehend eliminiert und etwaige Verbesserungen können direkt der langsamen Befüllung zugeordnet werden. Für diese Versuche wurden Vorstufen zu dem im Kapitel 4.1.3 beschriebenen Gasgenerator verwendet, und es wurden unterschiedliche Befüllzeiträume untersucht um deren Einfluss auf die Belastungskennwerte zu untersuchen. In drei Versuchskonfigurationen wurden dabei jeweils zwei Versuche durchgeführt, um auch Aufschluss über die Versuchsstreuung zu erhalten.

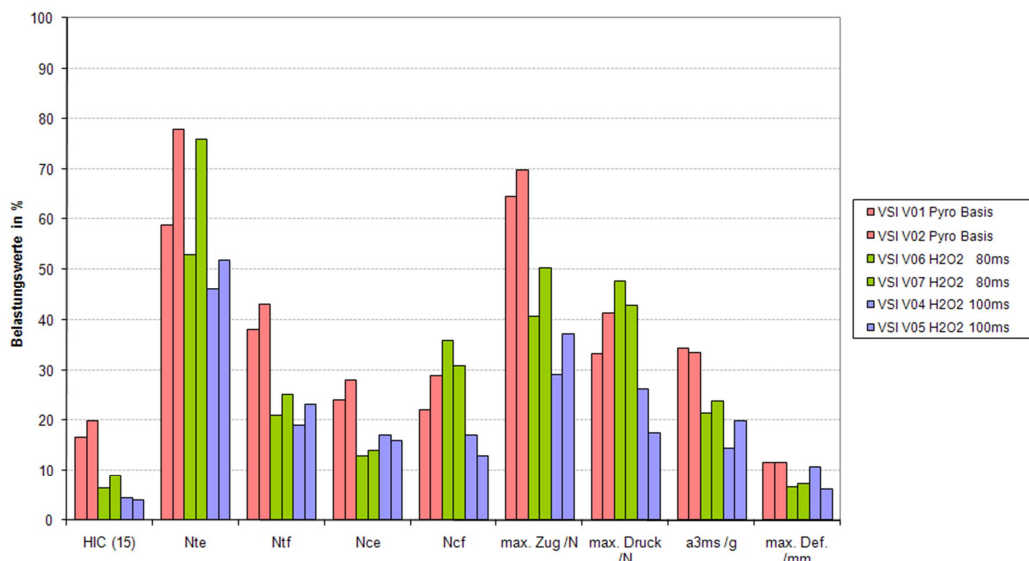


Abbildung 45: Ergebnisse OoP-Versuche Jänner 2009 - HIII, 3y, Pos 2

In der obigen Abbildung werden exemplarisch die wichtigsten Verletzungskriterien des dreijährigen Kinderdummys in Position 2 (Kopf vor Instrumententafel²¹) dargestellt. Dabei zeigt sich ein deutlicher Trend, dass die Belastungswerte mit zunehmender Dauer der Befüllung stetig abnehmen. Es ist weiters ersichtlich, dass insbesondere jene Werte, die im Fall der Serien-Konfiguration hoch sind, reduziert werden können. Die Nackenzugkraft reduziert sich deutlich, was auch mit einem niedrigeren NTE-Wert einhergeht. Der ohnehin schon niedrige HIC-Wert der Serienabstimmung fällt bei der langsamen Füllung des Airbags über 100ms nochmals wesentlich geringer aus.

Diese Verbesserungen ergeben sich in vergleichbarem Ausmaß auch für die Konfiguration mit dem dreijährigen Kinderdummy in Position 1 (Brust vor Instrumententafel²²). Die in der amerikanischen

²¹ vgl. [65], S22.4.3 Position 2 (head on instrument panel)

²² vgl. [65], S22.4.2 Position 1 (chest on instrument panel)

Gesetzgebung vorgeschriebenen Tests mit dem sechsjährigen Kinderdummy wurden nicht durchgeführt, da davon ausgegangen wird, dass der kleine Dummy aufgrund der geringeren Masse die kritischere Konfiguration darstellt.

Es muss noch beachtet werden, dass beim pyrotechnischen Serien-Gasgenerator nur die erste der beiden Stufen gezündet wurde. Der Wasserstoff-Gasgenerator wurde hingegen mit voller Leistung geschossen. Trotz dieses tendenziellen Nachteils des Wasserstoff-Gasgenerators ergab sich die beschriebene Verbesserung gegenüber der Serie. Es hat sich also bestätigt, dass ein langsamer gefüllter Airbag weniger aggressiv ist und zu niedrigeren Insassenbelastungen im Falle einer OoP-Situation beitragen kann.

Von dem untersuchten System wurden die Rückhalteeigenschaften im Falle einer Crash-Belastung nicht weiter bestimmt. Das Verhalten des Airbags ließ jedoch darauf schließen, dass der Airbag tendenziell zu weich war, um zum Beispiel bei einer US-NCAP-Belastung mit einem 50%-Dummy ausreichend Rückhaltewirkung aufzubringen. Damit ergibt sich ein Problem in der Argumentation der aufgezeigten Verbesserungen. Letztere könnten sich ja zumindest teilweise nicht von der langsamen Füllung, sondern vom geringeren Innendruck im Airbag ableiten.

Um sicher zu gehen, dass die Verbesserungen ausschließlich durch die langsame Füllung erreicht werden, muss mit derselben Hardware auch eine, mit dem Serienairbag vergleichbare Rückhalteperformance unter Crash-Belastungen nachgewiesen werden.

Bei den ersten Versuchen wurde festgestellt, dass die Abgase des verwendeten Wasserstoff-Gasgenerators wesentlich „reiner“ sind, als jene des Serien-Gasgenerators. Die Partikel und Verbrennungsrückstände die vom pyrotechnischen Serien-Gasgenerator ausgestoßen werden, belegen die Innenseite des Airbags und führen dazu, dass der Airbag „dichter“ wird. Im Gegensatz dazu sind die Verbrennungsgase des Wasserstoff-Gasgenerators nahezu rückstandfrei, wodurch sie leichter durch das Airbaggewebe durchtreten können und dieses nicht „verstopfen“. Als Konsequenz wurde daher das verwendete Airbagmaterial geändert.

Anstelle des herkömmlichen dTex700-Gewebes des Serienairbags wurde für die folgenden Versuche ein beschichtetes Gewebe gewählt. Die Silikonbeschichtung führt zu einem höheren Gewicht des Luftsacks, was sich im Fall eines Anschusses negativ auswirken kann. Um annähernd dasselbe Gewicht des Airbags zu erreichen, wurde ein beschichtetes dTex480-Gewebe ausgesucht.

Neben dem Material haben auch noch die Form und insbesondere die Faltung des Airbags sehr großen Einfluss auf die Insassenbelastung im Falle einer OoP-Situation. Um vergleichbar mit dem Serienairbag zu bleiben und nur den Einfluss der langsamen Füllung des Airbags zu untersuchen, wurde die Originalform mit dem geänderten Gewebe kopiert. Darüber hinaus wurde auch die Faltung des Serien-Airbags übernommen und bestmöglich nachgebaut. Der Airbag und der neuartige Gasgenerator wurden wiederum ins das Serien-Modulgehäuse integriert. In Summe unterscheiden sich die Versuchs-Module also im Gasgenerator und dem verwendeten Airbag-Gewebe. Die restlichen Einflussgrößen wurden nicht verändert.

Mit diesem Setup wurde eine weitere Versuchsserie von insgesamt 12 Versuchen durchgeführt.

4.4.2 Ergebnisse Versuchsreihe 2

Anhand eines Standversuches wurde vorab die gewünschte Aufblaszeit des Airbags von ca. 100 Millisekunden bestätigt. Diese Aufblaszeit ergibt sich aus der Überlegung, dass der Serienairbag mit seinem Volumen von ca. 120 Liter kleiner ist als jener, der für die Untersuchungen zur Frühauslösung (ca. 140 Liter) zum Einsatz kommen soll. Somit wurde vereinfacht angenommen, dass der Gasgenerator für die Füllung des kleineren Airbags etwa 100 Millisekunden benötigen müsste, damit der größere Airbag dann 40 Millisekunden nach t_0 (Beginn der Vorverlagerung; 120 Millisekunden ab Zündung) vollständig befüllt und auf Betriebsdruck ist. In Abbildung 46 und Abbildung 47 wird die langsame Befüllung des Luftsacks (links) mit der konventionellen Füllung durch den Serien-Gasgenerator (rechts) verglichen.



Abbildung 46: Vergleich Airbag-Entfaltung 35ms

Es zeigte sich dabei, dass der Airbag eine vergleichbare Längsausdehnung wie bei der Füllung mit dem Seriengasgenerator hat, aber anstelle der geforderten 100 erst nach etwa 120 Millisekunden vollständig gefüllt ist. Dies wurde jedoch für diese Versuchsserie akzeptiert.

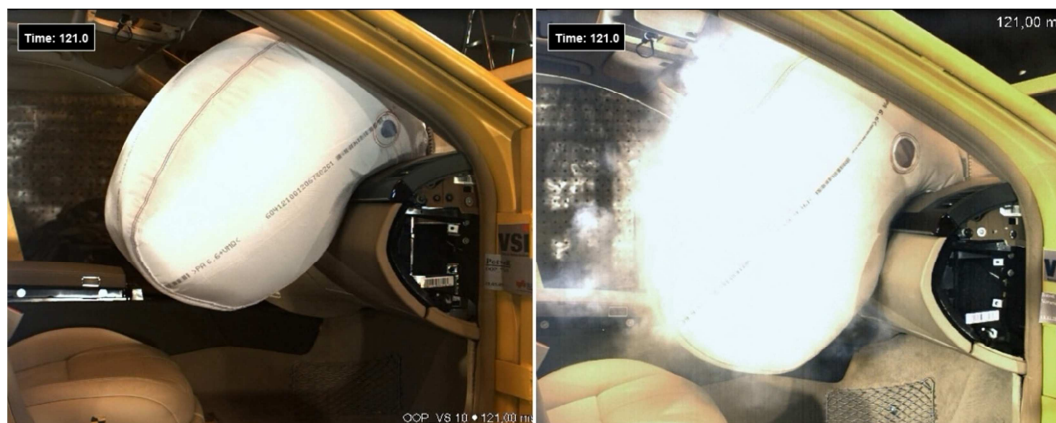


Abbildung 47: Vergleich Airbag-Entfaltung 120ms

Beim ersten Test mit dem dreijährigen Kinderdummy entfaltete sich der Airbag sehr ungünstig, was zu extrem hohen Belastungen führte. Es schien, als würde das Brustteil des Airbags im Modulgehäuse stecken bleiben. Der zu kleine, entfaltete Teil des Luftsackes wurde durch den Gasgenerator so hart befüllt, dass beispielsweise der NTE-Wert mit einem Ergebnis von 1,3 den gesetzlich erlaubten Maximalwert von 1,0 deutlich übertraf.

Es wird angenommen, dass der Luftsack durch den Wechsel auf das beschichtete Gewebe mehr Widerstand beim Austritt aus dem Serienmodulgehäuse hat. Dazu tragen eine höhere Reibung zwischen dem beschichteten Gewebe und dem Modulgehäuse (ca. 30%) sowie das größere Packmaß aufgrund der Handfaltung bei. Um das „Herausschlüpfen“ des Airbags aus dem Modulgehäuse zu erleichtern, wurde die Faltung im Vergleich zum Serienairbag geringfügig modifiziert.

Die Aufteilung des Luftsacks in ein Kopf- und ein Brustteil wurde derart verändert, dass eine Falte des Airbaggewebes aus dem Brustteil zum Kopfteil dazugelegt wurde.



Abbildung 48: Schnitt durch Modulgehäuse mit „Serien-Faltung“



Abbildung 49: Schnitt durch Modulgehäuse mit modifizierter Faltung (1 Falte aus dem Brustteil ins Kopfteil)

Daraus erhoffte man sich zweierlei Effekte: Einerseits wird dadurch das Airbagvolumen in den ersten ca. 30ms (wesentlicher Zeitraum für Insassenbelastung) größer, was mit einem geringeren Innendruck und in weiterer Folge mit einer niedrigeren Insassenbelastung einhergeht. Zweitens befindet sich im Brustteil weniger Material, wodurch es lockerer gepackt wird. Dies sollte das „Herausschlüpfen“ des Brustteils deutlich vereinfachen. In den beiden obigen Abbildungen ist die Änderung der Faltung ersichtlich.

Diese Veränderung wirkte sich positiv aus, das Verhalten des Airbags erwies sich aber in den folgenden Versuchen als schlecht reproduzierbar. Der Hauptgrund dafür liegt in der Handfaltung des Luftsackes. Darüber hinaus tragen die vergleichsweise langsame Füllung des Airbags und der erhöhte Widerstand beim Austritt aus dem Serienmodul dazu bei, dass geringste Abweichungen in der Faltung dazu führen, dass Teile des Gewebes erst zu spät aus dem Modul gezogen werden. Derartige Unterschiede bei der Entfaltung wirken sich bei den OoP-Versuchen sehr stark auf die Belastungswerte aus und führen zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Um dennoch eine Aussage über die Insassenbelastungen im Vergleich zum Serien-Airbagsystem treffen zu können werden die Ergebnisse zweier Versuche (VS17 und VS20) betrachtet, die hinsichtlich ihres Entfaltungsverhaltens und der Belastungswerte einigermaßen vergleichbar sind:

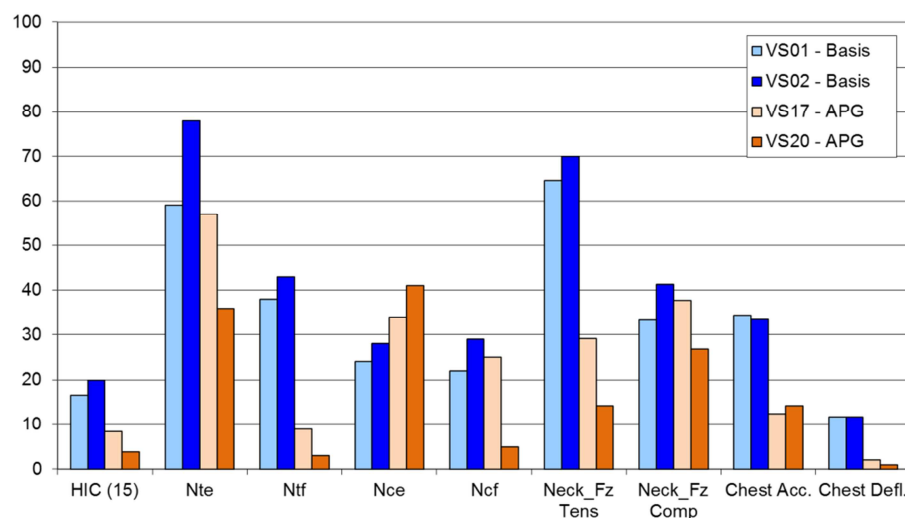


Abbildung 50: Vergleich zur Basis, HIII 3y, Position 2 (Kopf vor IP)

Es zeigt sich dabei im Vergleich zu Versuchen mit dem Serienairbag (VS01 und VS02), dass durch die langsame Befüllung des Luftsackes insbesondere die höchsten Belastungswerte deutlich reduziert werden können. Nach wie vor stellt der NTE-Wert mit knapp unter 60% des zulässigen Höchstwertes bei den gesetzlichen Grenzwerten das kritische Verletzungskriterium dar.

4.4.3 Nachweis Rückhalteperformance des untersuchten Airbags

Wie in der Einleitung bereits beschrieben, wurde in der ersten Versuchsreihe festgestellt, dass das Serien-Airbaggewebe in Kombination mit dem Wasserstoff-Gasgenerator scheinbar nicht dicht genug war. Da vermutet wurde, dass der Airbag zu weich war, um in einer Crash-Belastung ausreichend Rückhaltekräfte aufzubauen, waren auch die Versuchsergebnisse in den OoP-Konfigurationen in Frage gestellt.

Um sich hier abzusichern, wurde für die aktuelle Versuchsserie einerseits das beschichtete, dichte Airbag-Material verwendet und andererseits auch Tests durchgeführt, um die Rückhalteperformance des verwendeten Airbags nachzuweisen. Zu diesem Zweck wurden bei der Firma Autoliv entsprechende Horizontal-Impaktor-Tests durchgeführt.

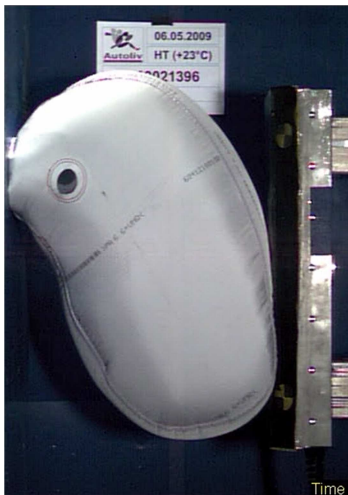


Abbildung 51: HI-Versuch 110ms nach Zündung (Zeitpunkt des Erstkontaktes)

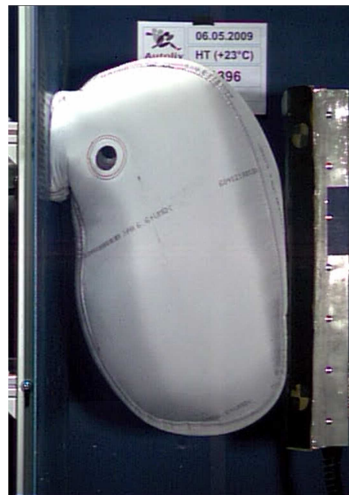


Abbildung 52: HI-Versuch 120ms nach Zündung



Abbildung 53: HI-Versuch 200ms nach Zündung (Umkehrpunkt des Impaktors)

In den obigen Abbildungen kann der Versuchsablauf nachvollzogen werden. Der Airbag wird auf einer Platte gezündet und die Last des Insassen wird durch einen linear geführten Impaktor nachgestellt. Der Impaktor hat eine Masse von 35 Kilogramm und wird, je nach abzubildendem Lastfall, mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in den Airbag geschossen.

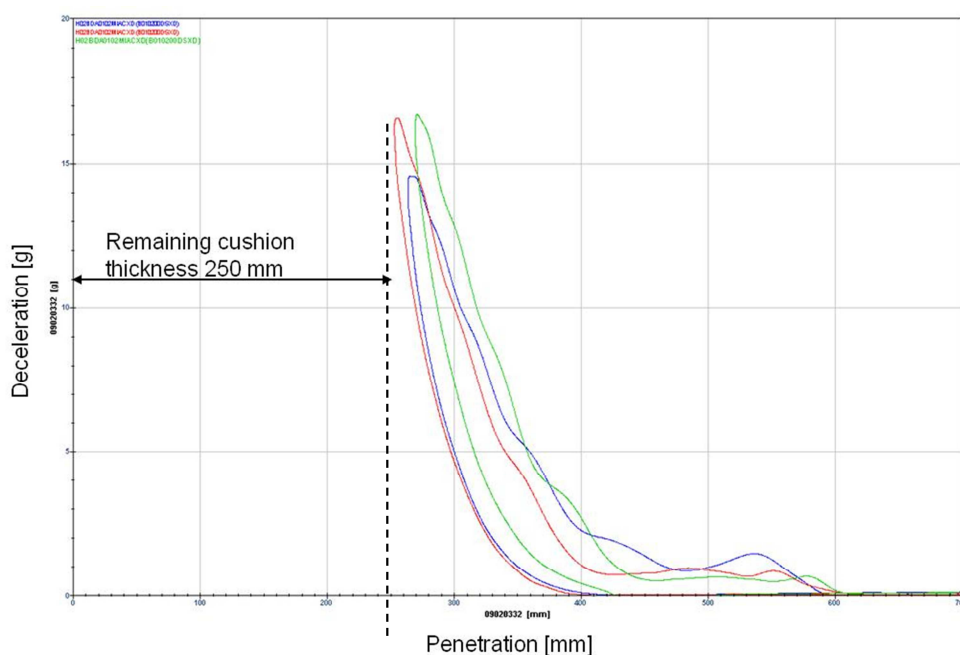


Abbildung 54: Kraft-Weg-Kurven verschiedener Horizontal-Impaktor-Tests

Für den Nachweis der Rückhalteperformance des, für die OoP-Versuche verwendeten, Airbagsystems wurden Tests mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 5m/s durchgeführt. Dabei ergab sich eine Resttiefe des Luftsackes von ca. 25 Zentimeter. Laut Auskunft der Experten von Autoliv, war dieser Wert vergleichbar oder sogar etwas höher als in Abstimmungen für Serienfahrzeuge. Der Nachweis der Rückhaltewirkung unter einer Crashbelastung war somit erbracht.

4.4.4 Zusammenfassung - OoP

In mehreren Versuchsreihen wurden in Summe 22 OoP-Versuche in unterschiedlichen Test-Konfigurationen durchgeführt. Das Ziel war, den experimentellen Nachweis zu erbringen, dass mittels einer langsamen Entfaltung des Airbags, dessen Aggressivität und das damit verbundene Verletzungsrisiko im Falle eines Anschusses des Insassen reduziert werden kann.

Neben der Entfaltungsdauer spielen für die OoP-Belastungswerte auch die Faltung und die Airbagform eine wesentliche Rolle. Um eine etwaige Verbesserung der langsamen Füllung zuweisen zu können, wurde die Form und Faltung des Serien-Airbags übernommen. Das Material des Serienairbags musste durch ein gasdichtes, beschichtetes Gewebe ersetzt werden, um mit dem verwendeten Gasgenerator ausreichend Rückhaltewirkung im Fall eines Unfalls zu erreichen.

Die Kombination aus der Prototypenfaltung und dem geänderten Material im unveränderten Serien-Modulgehäuse bereitete große Schwierigkeiten bei den Versuchen. Oftmals konnten Teile des Luftsackes nicht schnell genug aus dem Modulgehäuse gezogen werden, wodurch das effektive Luftsackvolumen viel zu klein blieb. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, musste die Faltung im Vergleich zur Serie geringfügig verändert werden.

Es zeigt sich, dass durch die vorgenommenen Änderungen in jedem Fall Verbesserungen erreicht werden können. Die genaue Zuordnung zur langsamen Entfaltung ist aber aufgrund der geänderten Faltung und dem unterschiedlichen Material nicht mehr unmittelbar möglich. Aufgrund der Probleme mit der Reproduzierbarkeit der Versuche konnten auch keine Tests in der Position 1 (Brust vor Instrumententafel) durchgeführt werden. Damit konnten zwar Verbesserungen aufgezeigt werden, eine eindeutige Potentialaussage ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich. In weiterer Folge des Projektes ist angedacht, mit der Airbagform für die Frühauslösung, die sich ja von der in dieser Betrachtung untersuchten Form deutlich unterscheidet, weitere Versuche für die Abschätzung des Verbesserungspotentials bei OoP-Situationen durchzuführen.

4.5 Ergebnisse: Früh ausgelöster Airbag mit Serien-Gurtsystem

Im ersten Schritt der Gesamtpotentialabschätzung bei In-Crash-Belastungen wird vorerst nur das früh ausgelöste Airbagsystem in Betracht gezogen. Als Gurt kommt der, zu den konventionellen Zeiten ausgelöste, Schlossstraffer mit dem degressiven Gurtkraftbegrenzer aus dem Referenzfahrzeug zum Einsatz.

Hierfür wurden eine Reihe von Impaktorversuchen durchgeführt, um ein geeignetes Simulationsmodell für das neuartige Airbagsystem zu erstellen. Als nächster Schritt wurden zur Validierung des gesamten Insassensimulationsmodells mit diesem Airbagsystem auch einige Schlittenversuche durchgeführt. Dabei konnte Erfahrung mit der frühen Auslösung und der größeren Airbagform gesammelt werden. Mit dem nun gut validierten Simulationsmodell wurden in weiterer Folge eine Reihe von Simulationen durchgeführt und für jede Kombination aus Crashpuls und Dummy eine optimale Parameterabstimmung gesucht. Die Simulationsergebnisse der wichtigsten Varianten (zum Beispiel: 50% EuroNCAP,...) sollten auch nochmals in Schlittenversuchen bestätigt werden. In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass das Simulationsmodell des neuartigen Airbagsystems nur für die frühe Auslösung validiert wurde. Die Simulationsergebnisse der konventionellen Auslösung sind daher mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

4.5.1 Versuchsauslegung mit APG + ADPS-2T

Vor der Abstimmung der gewählten Hardwarekomponenten (siehe Kapitel 4.1.3) für die einzelnen Konfigurationen muss noch die Größe der beiden Vents definiert und die zum Einsatz kommende Stufe des pyrotechnischen Gasgenerators festgelegt werden. Diese beiden Fragestellungen werden in Voruntersuchungen behandelt. Zunächst jene des Gasgenerators:

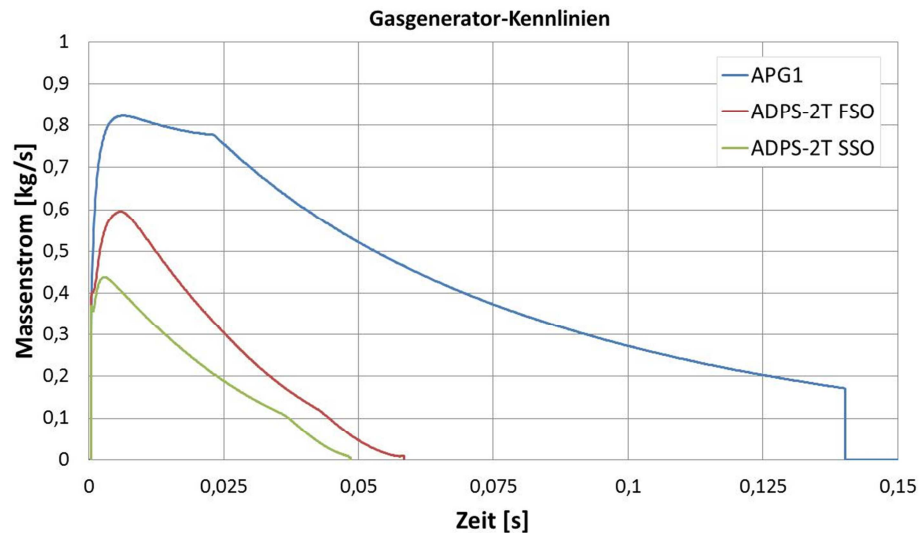


Abbildung 55: Berechnete Massenstromverläufe der drei Gasgenerator-Stufen

Es zeigt sich dabei, dass sowohl mit der stärkeren ersten Stufe (rote Kennlinie), als auch mit der etwas schwächeren zweiten Stufe (grüne Kennlinie) in etwa dieselben Werte der einzelnen Verletzungskriterien, als Maß für die Insassenbelastung, erreicht werden können. Der Einsatz der schwächeren Stufe hätte aber Vorteile hinsichtlich der Ventilierung des Airbags. Aufgrund der geringeren gelieferten Gasmenge muss auch weniger Gas abströmen, um die notwendige Nachgiebigkeit des Luftsackes zu erreichen. Dies ermöglicht den Einsatz von kleineren Vents, was sich vorteilhaft auf die Verluste während der Befüllungsphase auswirkt. Ein weiterer Aspekt ist, dass man bei den Versuchen noch eine gewisse „Leistungsreserve“ hätte, sollten sich größere Abweichungen gegenüber der Simulation ergeben. Aus diesem Grund wurde entschieden, bei der Versuchsserie die schwächere zweite Stufe des ADPS-2T-Gasgenerators zu verwenden.

Mit dieser Kombination an Gasgeneratoren wurden in weiterer Folge die Durchmesser der beiden Abströmöffnungen ausgelegt. Dabei erwies sich die Kombination aus einem aktiven Vent mit einem Durchmesser von 85 Millimeter und einem Standard-Vent mit 50 Millimetern Durchmesser als bester Kompromiss. So kann der Durchschlag des 50%-Dummys im ungegurten FMVSS208-Lastfall gerade verhindert werden und der Airbag ist nachgiebig genug, um mit einer frühen Öffnung für die 5%-Frau eine ausreichende Vorverlagerung zu ermöglichen.

Mit dem nun fixierten Hardware-Konzept müssen mittels umfangreicher Parametervariationen für die einzelnen Kombinationen aus Lastfällen und Insassen optimale Abstimmungen der freien Adaptionparameter gefunden werden. Die freien Parameter sind dabei die Zündzeitpunkte des aktiven Vents und des pyrotechnischen Gasgenerators. Es werden dabei Abstimmungen für die Frühauslösung bei 80 Millisekunden vor t_0 und für eine Auslösung zu den konventionellen Zündzeitpunkten ermittelt. Wichtig für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit dem Serien-Fahrzeug ist auch, dass in etwa derselbe Restabstand zwischen Dummykopf und Instrumententafel beziehungsweise Windschutzscheibe eingehalten wird. Im Folgenden werden exemplarisch die Ergebnisse für die beiden wichtigsten Lastfall-Dummy-Kombinationen vorgestellt:

4.5.1.1 50%-Mann, EuroNCAP

Die im Fall eines EuroNCAP-Crashtests auf den Insassen wirkenden Belastungen werden in Abbildung 56 dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse mit dem neuartigen Airbagsystem für den Fall einer frühen und einer konventionellen Auslösung mit dem Serienfahrzeug verglichen:

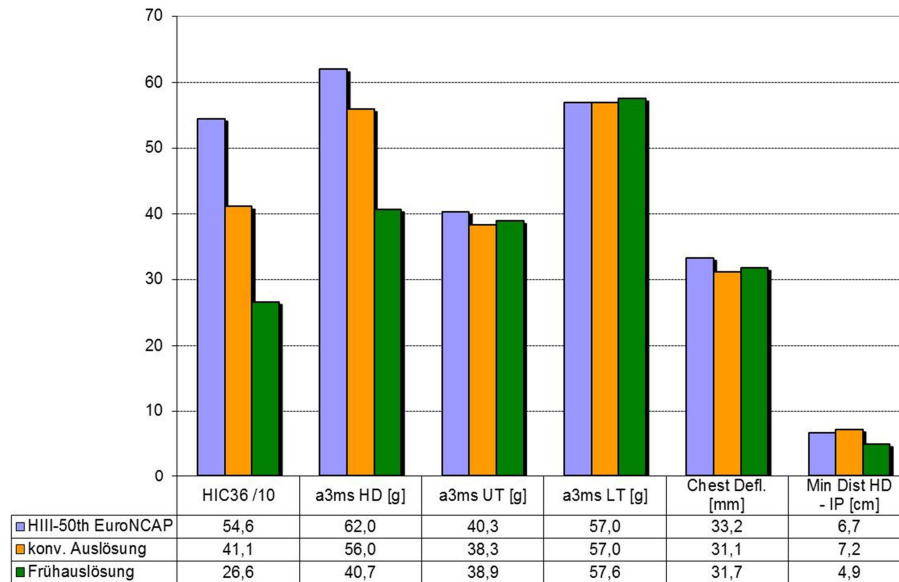


Abbildung 56: Auslegung für 50%-Mann, EuroNCAP

Es zeigt sich, dass sich insbesondere bei der Kopfbelastung eine deutliche Reduktion der Insassenbelastung ergibt. Damit einher gehen auch niedrigere Nackenbelastungen. Durch die bessere Rückhaltung des Dummies durch den Airbag, fallen auch die Belastungen der unteren Extremitäten geringfügig niedriger aus als im Serienfahrzeug. Bei der Belastung des Brustkorbes, welche auch wesentlich vom Gurtsystem bestimmt ist, können keine relevanten Verbesserungen erzielt werden.

Mit dem Wert der Kopfbeschleunigung des Referenzfahrzeuges wird beim EuroNCAP-Rating schon die volle Punktezah für den Kopf vergeben, wodurch sich die deutliche Verringerung der Kopfbelastung im Rating-Ergebnis nicht widerspiegelt. Um in diesem Lastfall Verbesserungen zu erreichen, muss in erster Linie die Brusteingdrückung und die Belastung der unteren Extremitäten reduziert werden, was leichter durch Änderungen im Gurtsystem erreicht werden kann.

Verringerungen der Kopfbelastungen ergeben sich sowohl bei der frühen als auch bei der konventionellen Auslösung, was auf die geänderte Airbagform zurückzuführen ist. Bei der konventionellen Auslösung koppelt der Kopf durch den späteren Druckaufbau im Airbag später an der Fahrzeugverzögerung an, worauf sich der höhere Maximalwert der Kopfbeschleunigung zurückführen lässt.

4.5.1.2 5%-Frau, US-NCAP

Ab dem Modelljahr 2011 kommt auf der Beifahrerseite beim US-NCAP Test die 5%-Frau zum Einsatz. Um Bestnoten beim Rating und die maximale Sterne-Anzahl zu erreichen, müssen ausgehend vom Referenzfahrzeug insbesondere die Werte der Brusteingdrückung und der Nackenbelastung reduziert werden. Abbildung 57 zeigt die Belastungskennwerte für die unterschiedlichen Konfigurationen, wobei im Fall des neu ausgelegten Airbagsystems jeweils die kleinere Luftsackform zum Einsatz kommt:

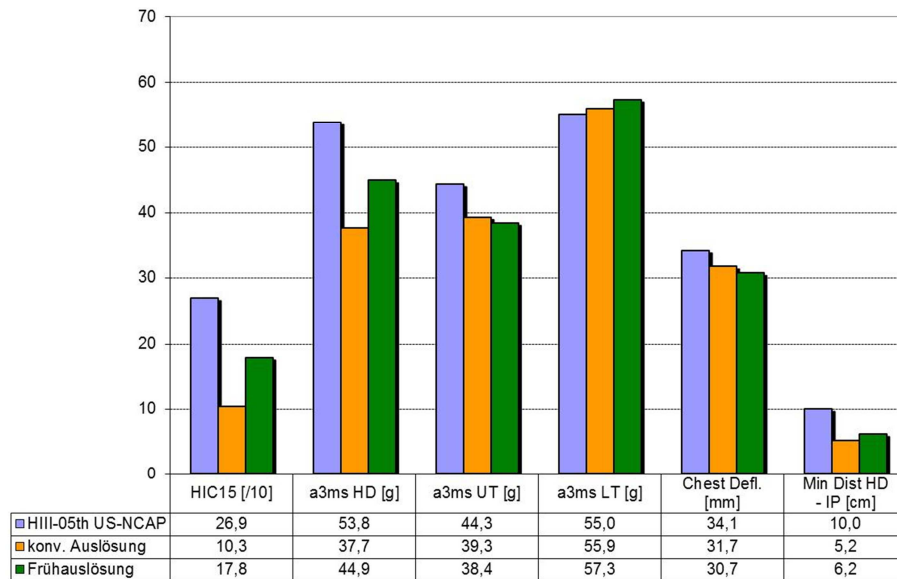


Abbildung 57: Auslegung für 5%-Frau, US-NCAP

Durch das neuartige Airbagsystem können bei diesem Lastfall wie auch schon beim oben diskutierten 50%-Dummy insbesondere die Kopfbelastung reduziert werden, wenn auch nicht im selben Ausmaß. In der obigen Abbildung fällt auf, dass für die Kopfbelastung im Fall der konventionellen Auslösung ein geringeres Niveau erreicht werden konnte, als bei der frühen Aktivierung des Gasgenerators. Dies ist allerdings kein endgültiges Ergebnis, da insbesondere die Modellvalidierung für die konventionelle Auslösung einige Unsicherheiten offen lässt. Auch die Brustbeschleunigung und Eindrückung können in gewissem Ausmaß verringert werden, für die volle Punktezahl beim zukünftigen US-NCAP-Rating sind allerdings weitere Schritte notwendig. Die Nackenbelastung und die Brusteingdrückung stellen hierfür Ansatzpunkte dar. Für die Versuchsserie, in der diese Simulationsergebnisse zum Teil validiert werden sollten, stand die kleine Airbagform für die 5%-Frau noch nicht zur Verfügung. Um trotzdem auch für die 5%-Frau schon zu diesem Zeitpunkt Versuchsdaten mit einem früh ausgelösten Airbag zu erhalten, wurde zusätzlich eine Abstimmung für die 5%-Frau mit der großen Airbagform gesucht.

Neben diesen beiden Lastfällen wurden auch noch die auftretenden Belastungen beim ungegurtenen FMVSS208- sowie beim US-NCAP-Lastfall mit dem 50%-Dummy untersucht. Darüber hinaus wurden zur Absicherung der Systemintegrität auch Untersuchungen mit dem 95%-Dummy in verschiedenen Crash-Konstellationen angestellt. In den beiden Verbraucherschutztests konnten dabei auch für den schweren 95%-Dummy deutliche Verbesserungen erzielt werden. Einzig für den ungegurtenen Lastfall erscheint die Abstimmung des Airbagsystems für den schweren Dummy mit den gewählten Abströmquerschnitten in Kombination mit dem Gasgenerator als zu schwach.

In einer Serie von sechs Schlittenversuchen mit dem 50% und dem 5%-Dummy konnten die Ergebnisse der Simulation weitgehend bestätigt und somit die Prognosefähigkeit des Simulationsmodells für frühe Auslösezeitpunkte nachgewiesen werden. Bei den Versuchen traten auch einige Probleme auf, die mit der langsamen Befüllung und der daraus resultierenden geringeren Dynamik des Airbags in direktem Zusammenhang stehen. Durch den langsamen Austritt aus der Instrumententafel neigt der Airbag dazu, in den Spalt zwischen dem Handschuhfach und den Knien des Dummies zu fallen. In weiterer Folge verhängt sich der Luftsack in dieser Position und kommt vor dem Insassen nicht richtig in Position. Aufgrund der Annahme, dieses Verhalten durch eine Änderung der Faltung des Luftsackes verbessern zu können, wurde dieses Problem bei den Versuchen behelfsmäßig durch eine Abstützung (Kartonplatte) im Bereich der Oberschenkel behoben, die ein Abrutschen des Luftsackes in diesen Spalt verhinderte.

Weiters traten im Zuge der Versuche Probleme durch ein Verdrehen des Airbags um die Fahrzeuglängsachse auf. Diese Tendenz ist auf die Einflüsse der schrägen Abstützflächen des Luftsacks (z.B.: Windschutzscheibe oder Instrumententafel) in Verbindung mit der vergleichsweise „sanften“ Ankopplung des Airbags am Insassen zurückzuführen. Diese Verdrehung führte bei den Versuchen dazu, dass die Abströmöffnungen von der Windschutzscheibe beziehungsweise der Instrumententafel verdeckt wurden und der Luftsack in Folge zu hart blieb.

Zusammenfassend konnten in dieser Versuchsserie die, aus der Simulation zu erwartenden Ergebnisse erzielt und einige Erfahrungen hinsichtlich des realen Entfaltungsverhaltens des langsam befüllten Airbags gesammelt werden. Für die folgenden Schlittenversuche konnten diese Erfahrungen genutzt werden, um das Airbagsystem derart zu überarbeiten, sodass diese Probleme nicht mehr auftreten.

4.6 Zusammenfassung – Früh ausgelöstes Airbagsystem

Als erstes Zwischenergebnis der vorliegenden Untersuchung wurde der Nachweis erbracht, dass mittels einer Auslösung des Airbags noch vor der eigentlichen Kollision in Verbindung mit einer „sanften“ Befüllung über einen längeren Zeitraum sowohl das Verletzungsrisiko in Out of Position-Situationen, als auch im Fall von Frontalkollisionen teilweise markant gesenkt werden kann. Es konnte beispielsweise bei den Kopfbelastungen im Vergleich zum Referenzfahrzeug eine Reduktion von bis zu 50% erreicht werden.

Um dieses Verbesserungspotential umsetzen zu können, ergeben sich aber eine Reihe von neuartigen Anforderungen an das Airbagsystem: Die wesentliche Änderung ist dabei, dass zwei zeitliche Szenarien beherrscht werden müssen, die zum Teil gegenläufige Anforderungen an die Hardware stellen. Einerseits sollte der Airbag bei einer frühen Auslösung für eine möglichst frühe Ankopplung nahe zum Insassen gebracht werden und ausreichend gefüllt sein. Andererseits darf im Fall einer konventionellen Auslösung kein Anschusssrisiko aufgrund einer zu großen Airbagform bestehen. Zum einen sollte der Luftsack bei einer Frühauslösung beziehungsweise OoP-Situation möglichst sanft über einen längeren Zeitraum befüllt werden, um die Aggressivität zu reduzieren. Zum anderen muss der Airbag bei einer konventionellen Auslösung schnellst möglich in Position gebracht werden, um nicht wertvollen Verzögerungsweg zu verlieren.

Es zeigt sich, dass es ohne ein gewisses Maß an Adaptivität der Luftsackgeometrie nicht möglich ist, Verbesserungen durch eine frühe Auslösung des Airbags zu erzielen. Aus diesem Grund wurden verschiedene Varianten an mehr oder weniger adaptierbaren Airbags untersucht und hinsichtlich ihres Verbesserungspotentials bewertet. Eine wesentliche Rolle spielte dabei neben den Belastungskennwerten des Insassen auch die Umsetzbarkeit des ausgewählten Systems im realen Serienfahrzeug. Eine zweistufige Airbagform stellte sich dabei als zielführendste Variante in Bezug auf die erreichbaren Vorteile und die Umsetzbarkeit heraus. Aus einem größerem Luftsack für 50%- und 95%-Mann wird durch Zurückhalten von mehreren Fangbändern eine kleinere Form für die 5%-Frau erzeugt. Die Fangbänder können mit einem pyrotechnischen Aktuator während der Kollision freigegeben werden.

Auch für den Gasgenerator ergeben sich durch die beiden verschiedenen Auslöseszenarien und die Variabilität im Airbagvolumen sehr unterschiedliche Anforderungen. Es wurden verschiedene Konzepte mit mehr oder weniger vielen Abstufungen in Betracht gezogen. Die wesentlichen Gesichtspunkte bei der Bewertung waren dabei die technische Umsetzbarkeit, der Platzbedarf in der Instrumententafel und die Anzahl der notwendigen unabhängigen Zündkreise. Als bester Kompromiss stellte sich ein zweistufiger Gasgenerator mit einer „langsamen“ und mit einer „schnellen“ Stufe heraus. Je nach Auslöseszenario und aktivierter Airbagform werden unterschiedliche Kombinationen dieser beiden Gasgeneratoren gezündet.

Bei einer frühzeitigen Auslösung des Airbags spielt der Druckverlust im Luftsack infolge von Abkühlung und Undichtigkeiten eine nicht zu unterschätzende Rolle. Eine Möglichkeit, diesen Effekt zu kompensieren wäre, mehr Gasgeneratorleistung vorzuhalten. Dies hat aber Nachteile in Bezug auf

Gewicht, Platzbedarf und auch die Aggressivität des Luftsackes während der frühen Phase der Entfaltung (OoP). In dieser Studie wurde der alternative Weg der Verlustminimierung vorgezogen. Ein wesentlicher Punkt ist dabei die Anfertigung des Luftsackes aus einem gasdichten Gewebe. Um die Leckagegasmenen durch die Vents zu minimieren, wurde der gesamte Querschnitt in ein immer offenes Standard-Vent und ein aktives Vent, welches mit einem pyrotechnischen Aktuator während der Kollision geöffnet werden kann, aufgeteilt. Dies hat auch noch den positiven Effekt, dass mit dem aktiven Vent die Rückhalteeigenschaften des Airbags auf den jeweiligen Insassen beziehungsweise Lastfall angepasst werden können.

In diesem ersten Schritt wurde nur das Airbagsystem untersucht. Es wurde derart abgestimmt, dass es in der bestehenden Fahrzeugumgebung und mit dem unveränderten Serien-Gurtsystem den bestmöglichen Insassenschutz erreicht. Im Vergleich zum Referenz-Fahrzeug konnten dabei insbesondere bei der Kopf- und Nackenbelastungen deutliche Verbesserungen erzielt werden.

In einer Reihe von Prinzipversuchen konnte auch nachgewiesen werden, dass durch die langsame Befüllung des Airbags die Belastungen für die Insassen im Fall eines Anschusses durch den Airbag reduziert werden können. Es muss dabei angemerkt werden, dass der Nachweis der OoP-Verbesserungen durch den Vergleich mit dem Serienairbagsystem erbracht wurde. Dazu wurde die dieselbe Airbaggometrie und eine zu jener des Serienairbags vergleichbare Faltung verwendet. Als nächster Schritt zur Bewertung der OoP-Eigenschaften des Gesamtsystems müssen in weiteren Versuchen die Absolutwerte der Verletzungskriterien mit dem neu entwickeltem Airbagsystem ermittelt werden.

Es wurde angemerkt, dass das Simulationsmodell des Airbags nur für die Frühauslösung validiert wurde. Für belastbare Aussagen zu den Insassenbelastungen bei konventionellen Auslösezeitpunkten müssen das Simulationsmodell überarbeitet und die Abstimmungen gegebenenfalls aktualisiert werden.

Als nächster Schritt bei der Entwicklung eines Gesamtsystems, welches für eine Auslösung vor t_0 ausgelegt ist, muss das Airbagsystem in Kombination mit einem neuartigen Gurtsystem abgestimmt werden. Dann sollte es auch noch möglich sein, die Belastungsniveaus der anderen Körperregionen, welche allein mit dem Airbag nicht verbessert werden konnten, zu reduzieren.

5 Frühe Straffung des Sicherheitsgurtes

In den Kapiteln 2.3 und 2.4 wurden die theoretisch möglichen Verbesserungen des Insassenschutzes mit Hilfe eines früh gestrafften Sicherheitsgurtes beschrieben. Durch eine Vorbeschleunigung des Insassen entgegen der Fahrtrichtung kann die Bewegungsenergie, die im Crash abgebaut werden muss, zum Teil schon vor der Kollision reduziert werden. Durch die Straffung des Gurtes wird auch zusätzlicher Verzögerungsweg gewonnen, auf welchem der Insasse sanfter abgebremst werden kann. Bei einem frühen Beginn der Vorbeschleunigung des Insassen, könnte bei geringeren und damit biomechanisch verträglicheren Gurtkräften eine, mit der Straffung über einen kürzeren Zeitraum, vergleichbare Verbesserung erzielt werden.

Im Gegensatz zum Airbag, scheint eine Vorbeschleunigung des Insassen mittels des Gurtes vergleichsweise einfach umsetzbar zu sein, da die Sitzposition und die Größe des Insassen keine wesentliche Rolle spielen. Der Gurt liegt zu Beginn der Straffung am Insassen an und kann ohne große zeitliche Verzögerungen Kräfte auf diesen aufbringen. Im Vergleich dazu, wäre für eine Vorbeschleunigung des Insassen mit dem Airbagsystem eine voll variable Airbagform notwendig. Mit nur einer einzigen Airbagform besteht für kleine Insassen, die weiter vorne sitzen, ein großes Anschusssrisiko, wohingegen Personen die weiter hinten sitzen, vom Airbag noch nicht einmal berührt werden.

Hinsichtlich der Einleitung der notwendigen Kräfte für die Vorbeschleunigung des Insassen hat der Sicherheitsgurt gegenüber dem Airbag auf jeden Fall Nachteile, weil die Belastungen „punktuell“ und nicht gleichmäßig über eine große Fläche aufgebracht werden.

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Verbesserungspotentiale und die möglichen Probleme der Vorbeschleunigung des Insassen mittels Gurt detailliert untersucht. Es werden dabei auch neuartige Anforderungen an die Strafffaktorik diskutiert und eine Möglichkeit zur Umsetzung beliebiger Straff- und Kraftbegrenzungscharakteristika bei Entwicklungsversuchen für Rückhaltesysteme vorgestellt.

5.1 Grenzen für frühe Gurtstraffung

In den folgenden Kapiteln wird die Umsetzbarkeit einer frühen und dafür lang anhaltenden Straffung mit geringem Kraftniveau diskutiert. Des Weiteren werden mögliche Problemstellungen untersucht, die mit heutigen Straffstrategien nicht oder in geringerem Maße auftreten.

5.1.1 Fuß- und Beinkinematik

Im Laufe der Untersuchungen zu einer frühen Straffung des Beckengurtes zeigte sich eine Problematik auf, welche sich insbesondere negativ auf die Belastungen der unteren Extremitäten auswirkt.

Durch die Straffung des Beckengurtes werden das Becken und damit auch die Oberschenkel, sowie die Unterschenkel des Insassen wenige Zentimeter weit zurückgezogen. In Folge dessen bewegt sich auch der Fuß vom Prallblech im Fußraum nach hinten. Somit können die Füße dann während des Crashes auf einem längeren Weg beschleunigen und treffen mit einer höheren Geschwindigkeit auf dem Prallblech auf. Damit einher gehen wesentlich höhere Unterschenkelbelastungen. In Abbildung 58 und Abbildung 59 sind die Verläufe der Längsposition und der Längsgeschwindigkeit des rechten Fußes in einer exemplarisch ausgewählten Simulation dargestellt:

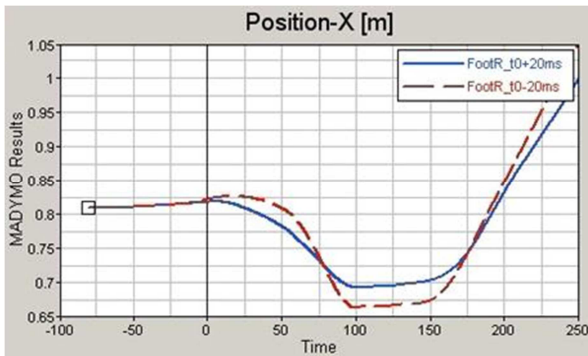


Abbildung 58: Längsbewegung des Fußes bei unterschiedlichen Straffzeitpunkten

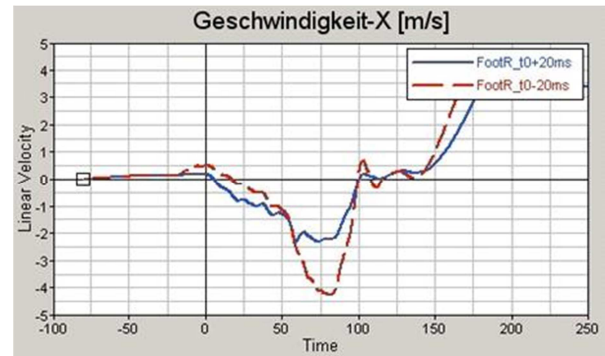


Abbildung 59: Längsgeschwindigkeit des Fußes relativ zum Fußraum bei unterschiedlichen Straffzeitpunkten

Ein weiterer Effekt ist, dass die Füße am Prallblech höher aufprallen als bei einer Straffung zu konventionellen Zeitpunkten. Dies führt dazu, dass der Kniewinkel flacher wird (siehe Abbildung 60), wodurch das Knie auch „steifer“ hinsichtlich axialer Lasten wird. Somit erhöhen sich auch die axialen Kräfte im Oberschenkel geringfügig.

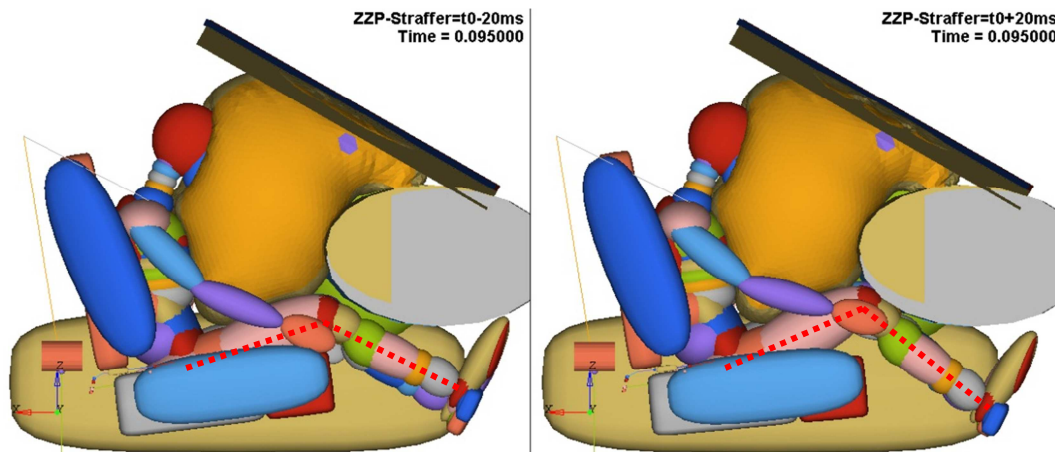


Abbildung 60: Vergleich der Kniewinkel bei unterschiedlichen Straffzeitpunkten

Dieser Effekt hat beim US-NCAP-Rating nur geringe Auswirkung, da hier lediglich die Belastungen der Oberschenkel bewertet werden. Beim EuroNCAP-Rating werden hingegen zusätzlich auch noch die axialen Kräfte sowie der Tibia-Index der beiden Unterschenkel berücksichtigt. Somit hat dieser Effekt auf die erreichbaren Punkte bei diesem Verbraucherschutz-Test erheblichen Einfluss.

Eine denkbare Lösung für diese Problematik wäre, die Beckenrückhaltung zu verbessern, um so den Anprall im Fußraum zu dämpfen. Eine verbesserte Beckenrückhaltung könnte einerseits erreicht werden, indem man das Durchrutschen des Beckengurtes im Gurtschloss verhindert. Dies führt zu einer geringfügigen Steigerung der Beckenbeschleunigung, bringt aber zusätzlich auch noch eine Reduktion der Brusteingdrückung mit sich [25, 2007c]. Als Alternative könnte ein Knie-Airbag dazu beitragen, die Beckenrückhaltung zu verbessern und damit die Belastung der Unterschenkel zu reduzieren [78, 2009f].

Nicht außer Acht gelassen werden darf der große Einfluss des Sitzes auf die Kinematik des Dummies während eines Unfalls. Der Beckengurt, mit dem der Dummy wesentlich zurückgehalten wird, ist in der Regel direkt am Sitz montiert. Dies hat den Vorteil, dass die Gurtgeometrie (Position der Anbindungspunkte relativ zum Insassen) für verschiedene Sitzpositionen annähernd gleich bleibt. Jede Nachgiebigkeit des Sitzes wirkt sich dadurch aber direkt als „Kraftbegrenzung“ im Beckengurt aus und kann sogar dazu führen, dass die verbesserte Beckenrückhaltung aufgrund der lang anhaltenden Straffung durch eine stärkere Verformung des Sitzes kompensiert wird. So lässt es sich auch erklären,

dass es in den Simulationen auch trotz starker Straffung im Beckengurt nicht gelungen ist, einen Kniekontakt des Dummies mit der Instrumententafel zu verhindern.

Wesentlichen Einfluss auf diese Problemstellung hat auch die Gestaltung des Fußraumes. Es ist durchaus möglich, dass sich das Wegziehen der Füße vom Prallblech bei anderen Beinstellungen weniger ausgeprägt oder sogar noch stärker auftritt, als in dem in dieser Studie betrachteten Fahrzeug. In jedem Fall muss dieser Effekt bei der Untersuchung von frühen Straff-Zeitpunkten berücksichtigt werden.

5.1.2 Gurtgeometrie – Ziehen nach Hinten mit Einschränkungen

Zusätzlich zu den neuartigen Anforderungen an das Straffaggregat selbst, müssen auch bei der Positionierung der Gurthanbindungspunkte einige Überlegungen berücksichtigt werden, damit eine effektive Vorbeschleunigung des Insassen entgegen der Fahrtrichtung realisiert werden kann.

Insbesondere die Zugrichtungen der Straffaggregate beeinflussen maßgeblich die Effektivität der Straffung. Grundsätzlich gilt, je direkter die Straffung in Fahrzeuglängsrichtung erfolgt, umso besser kann der Insasse nach hinten gezogen werden. Somit wäre eine Straffung der Gurte direkt in Fahrzeuglängsrichtung optimal.

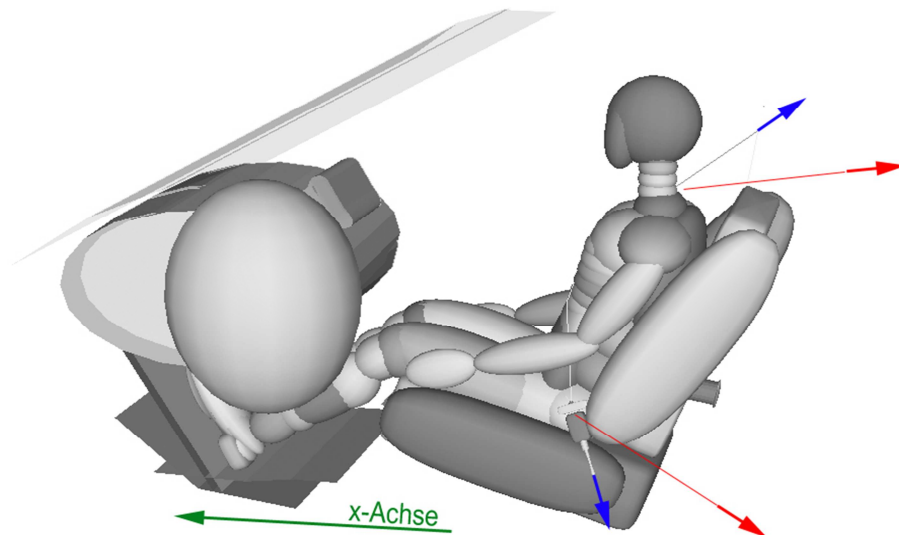


Abbildung 61: Gurtzugrichtungen (blau: in Serienfahrzeugen umgesetzt, rot: theoretisch optimal für eine Vorbeschleunigung des Insassen entgegen der Fahrtrichtung)

Bei der Positionierung der Anbindungspunkte spielen aber auch noch andere Problemstellungen eine große Rolle:

Im Verlauf des Unfalls sinkt der Insasse in den Sitzpolster ein und bei einer ungünstigen Gurtführung kann es dazu kommen, dass der Beckengurt über den Hüftknochen rutscht, was mit schweren Unterleibsverletzungen verbunden sein kann [15, 2007b]. Um dieses sogenannte „Submarining“ zu verhindern, wird in heutigen modernen Fahrzeugen die Sitzstruktur rampenförmig gestaltet und die Zugrichtung des Beckengurtes zeigt schräg nach unten.

Um eine effektive Bewegung des Insassen nach hinten durch die Straffung des Gurtes zu erreichen, müssten die Gurthanbindungspunkte ein Stück weit hinter den Anbindungspunkten heutiger Fahrzeuge liegen. Unter der Annahme, dass die Anbindung des Beckengurtes am Sitz erfolgt, gibt es keinen Unterschied der Straffung bei verschiedenen Sitzpositionen beziehungsweise Dummies. Durch die fixe Position des Gurtumlenkers an der B-Säule, hat es auf die Zugrichtung des Schultergurtes allerdings schon einen Einfluss, ob sich der Sitz in der vordersten oder hintersten Position befindet. Tendenziell gelingt die Vorbeschleunigung der 5%-Frau aufgrund des flacheren Gurtwinkels besser als für größere Dummies, die weiter hinten sitzen.

5.1.3 Vorbeschleunigung des Insassen ohne Freigabe der Rückenlehne

Im Abschnitt 2.3 wurde erläutert, wie die Insassenbelastungen durch eine Vorbeschleunigung des Insassen entgegen der Fahrzeugbewegung reduziert werden könnten. Ein Knackpunkt bei dieser Betrachtung war allerdings, dass davon ausgegangen wird, dass der Insasse Freiraum nach hinten hat. Dieser Platz für eine Rückwärtsbewegung des Insassen muss aber erst durch eine aktive Rückverlagerung der Rückenlehne geschaffen werden. Dabei stellt sich die Frage, was passiert, wenn sich im Fahrzeugfonds ebenfalls Insassen befinden. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass eine Verschiebung der Rückenlehne nach hinten im Allgemeinen möglich ist, wird zunächst untersucht, ob auch ohne diese Maßnahme Verbesserungen durch eine länger anhaltende Straffung erzielt werden können:

Bei einer Vorbeschleunigung des Insassen ist darauf zu achten, dass der Insasse aus seiner Normsitzposition möglichst parallel zurückgezogen wird. Eine Straffung allein mit dem Schultergurt würde dazu führen, dass der Oberkörper des Insassen zurückgezogen wird. Damit einher geht ein größeres Risiko für schwere Abdomenverletzungen, da der Beckengurt aufgrund des steiler werdenden Beckenwinkels bei der Vorverlagerung des Insassen leichter über den Beckenknochen rutschen kann. Die Straffung allein am Beckengurt führt zu einer „Klappmesser-Bewegung“ des Insassen im Sitz. Der Dummy wird durch den Beckengurt nach hinten und unten in den Sitz gezogen, wodurch in den Oberkörper eine Rotationsbewegung nach vorn eingeleitet wird. So verringert sich der, für die Insassenbelastung maßgebliche Abstand zwischen Kopf und Instrumententafel. In Abbildung 62 ist die Bewegung des Dummys bei den beschriebenen Straff-Varianten dargestellt:

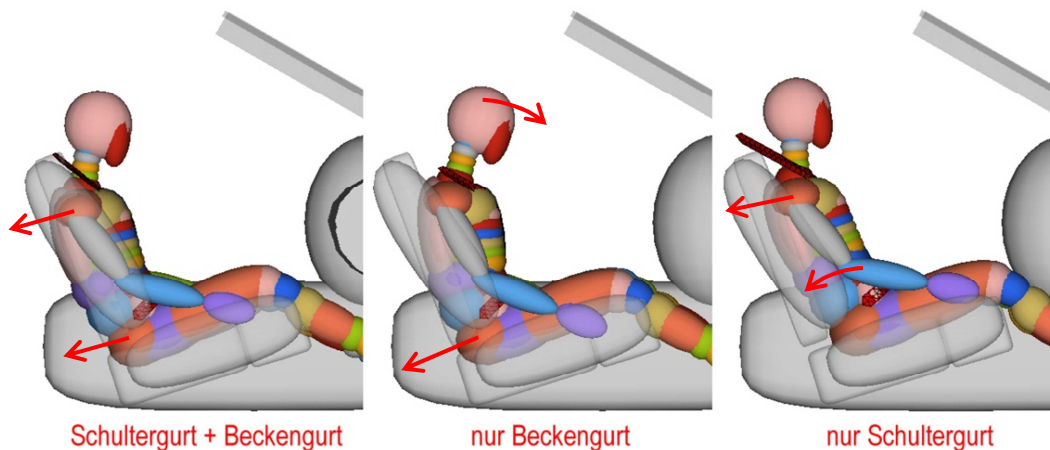


Abbildung 62: Dummykinematik mit den unterschiedlichen, möglichen Straffvarianten

Im Optimalfall muss also sowohl der Becken- als auch der Schultergurt gestrafft werden. Ohne eine Freigabe der Rückenlehne wird der Insasse allerdings direkt in den Sitzpolster gezogen. Dabei muss beachtet werden, dass der Schaum des Sitzes beziehungsweise die gesamte Rückenlehne durch die Straffung vorgespannt werden. Somit wird der Insasse bei der Vorverlagerung in gewissem Maße durch die Rückfederung des Sitzes wieder nach vorn beschleunigt. Dieser Effekt kann unter Umständen die Verbesserungsmöglichkeiten durch den gewonnenen Weg und die Vorbeschleunigung überkompensieren und die Belastungen auf den Insassen sogar noch vergrößern.

In einer Variation der Straffzeitpunkte bei ansonsten gleichen Randbedingungen (Straffniveau, Kraftbegrenzungsniveau,...) wurde untersucht, wie weit der Dummy effektiv in den Polster gezogen wird. Dabei wurde ein generisches Straffermodell verwendet, welches eine zeitliche und über den Straffweg konstante Kraft (in diesem Fall 3500N) aufbringen kann. Die Gurtgeometrie, also die Position der Anbindungspunkte blieb gegenüber dem Serienfahrzeug unverändert. In der Abbildung 63 sind die Trajektorien von Kopf, Brust und Becken für die verschiedenen Straffzeitpunkte

dargestellt. Die Bewegung während der Vorverlagerung ist jeweils mit dem roten Pfeil markiert. Der grüne Pfeil entspricht der Bewegung des Dummys in der Rebound-Phase.

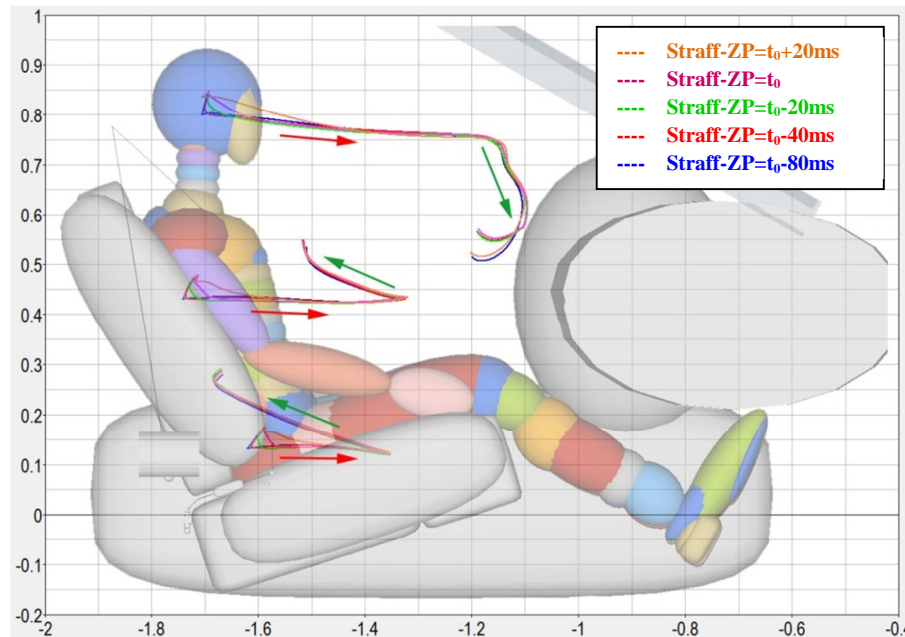


Abbildung 63: Trajektorien von Kopf, Brust und Becken bei unterschiedlichen Straff-Zeitpunkten ohne Freigabe der Rückenlehne; Straffung mit ca. 3,5kN

Bei genauer Betrachtung der einzelnen Trajektorien zeigt sich, dass es erst bei einer Straffung vor t_0 zu einer Bewegung des Insassen entgegen der Fahrtrichtung kommt. Dieser Zeitpunkt ist allerdings stark abhängig von der Form des Pulses und der anliegenden Straffkraft.

Ab einem Straffzeitpunkt von 20 Millisekunden vor t_0 bewegen sich das Becken und der Brustkorb des Dummys effektiv nach hinten. Es zeigt sich weiters, dass bei einem Beginn der Straffung 80 Millisekunden vor t_0 eine nur unwesentlich weitere Rückverlagerung des Insassen erreicht wird, als bei einem Straffbeginn 40 Millisekunden vor t_0 .

In den Trajektorien des Beckens spiegelt sich die Zugrichtung des Beckengurtstraffers wider. Bei den Varianten mit einem Straffzeitpunkt vor t_0 wird das Becken etwa in einem Winkel von 45° nach hinten und unten gezogen. Dadurch wird das Becken in den Sitzpolster gepresst, was dazu führen kann, dass aufgrund einer besseren Ankopplung des unteren Beckenknochens über den Sitzkeil, schneller höhere Rückhaltewerte erreicht werden können.

Eine Vorbeschleunigung des Insassen entgegen der Fahrtrichtung noch vor dem Unfall kann also bei unveränderter Gurtgeometrie und ohne eine „Freigabe“ oder eine aktive Rückverschiebung der Rückenlehne nur in sehr begrenztem Ausmaß erreicht werden. Für jeden Insassen und jede Unfallsituation gibt es eine Abstimmung, bei der die Summe der Verbesserungen aufgrund der abgebauten Geschwindigkeit beziehungsweise des gewonnenen Weges maximal ist. In weiteren Untersuchungen muss geklärt werden, wie viel Potential bleibt, wenn eine Abstimmung gefunden werden muss, mit der alle Lastfälle abgedeckt werden können.

In einer Untersuchung wurde für den 50%-Dummy im EuroNCAP-Lastfall und die 5%-Frau im US-NCAP-Lastfall ein Gurtsystem ausgelegt und die Auswirkung unterschiedlicher Straffzeiten auf die Insassenbelastungen ermittelt. Dabei kam das früh ausgelöste Airbagsystem zum Einsatz, dessen Verbesserungspotential schon in den vorhergegangenen Schlittenversuchen bestätigt wurde. Die Straffung des Gurtes erfolgte am Schultergurt über ein konventionelles Straff-Aggregat. Die Beckengurtstraffung erfolgt über eine eigens entwickelte, zum Patent angemeldete Aktorik, bei der die Straffkräfte konstant über den ganzen Straffweg und während der gesamten Straffdauer anliegen.

Dateiname		Basis FD	Straffer ZP=t0-17ms	Straffer ZP=t0	Straffer ZP=t0+17ms				
Euro-NCAP Bewertung									
		Werte	Punkte	Werte	Punkte	Werte	Punkte	Werte	Punkte
Kopf / Hals	HIC36	545,8		302,9		291,4		273,2	
	a3ms Kopf [g]	62		48,9		47,9		45,9	
	amax Kopf [g]	63,3	4,00	50,3	4,00	48,4	4,00	46,2	4,00
	Zugkraft [kN]	0,71		0,50		0,44		0,48	
	Scherkraft [kN]	0		0		0,00		0,00	
	Moment [N m]	33,904		35,488		33,016		32,34	
Brust	Brusteindrückung [mm]	33,2	2,4	23,6	3,771	22,7	3,9	22,5	3,929
	VC [m/s]	n/a		n/a		n/a		n/a	
Oberschenkel	Kraft max l. [kN]	2,85		2,79		2,84		2,91	
	Knieverschiebung l. [mm]	0,19	4	0,25	4	0,18	4	0,13	4
	Kraft max r. [kN]	1,58		1,08		0,85		0,75	
	Knieverschiebung r. [mm]	2,02		2,45		2,51		2,64	
Unterschenkel	Kraft max l. [kN]	4,38		4,37		3,82		3,59	
	Tibia Index l.	0,73	2,416	0,67	2,421	0,65	2,789	0,62	2,937
	Kraft max r. [kN]	2,75		3,96		2,72		2,17	
	Tibia Index r.	0,45		0,49		0,39		0,4	
Euro-NCAP Score		12,816		14,192		14,689		14,866	

Abbildung 64: Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Straffzeitpunkten 50%-EuroNCAP

Es zeigt sich dabei beim 50%-Mann im EuroNCAP-Lastfall, dass durch die Straffung an allen drei Anbindungspunkten mit den länger anhaltenden Straffkräften die Brusteindrückung deutlich reduziert werden kann. Im Vergleich zur Referenz sind die Maximalwerte rund ein Drittel niedriger. Zusätzlich zum Gurt wirkt sich hier aber auch die veränderte Airbagform aus, wie am Beispiel des Verlaufes der Brusteindrückung bei einem Straffzeitpunkt von t_0+17ms (siehe Abbildung 65) kurz erklärt wird: Der größere Airbag tritt schon ab circa 20 Millisekunden vor Kollisionsbeginn mit dem Dummy in Interaktion, was durch den ersten Anstieg der Brusteindrückung erkennbar ist. Der steile Anstieg ab 20 Millisekunden nach t_0 begründet sich durch die Straffung des Gurtes und in weiterer Folge durch die Vorverlagerung des Dummies unter der Crashbelastung. Im Vergleich dazu führt im Referenzfahrzeug die Straffung des Beckengurtes im Schloss 17 Millisekunden nach t_0 zum ersten Anstieg der Brusteindrückung. Der Airbag tritt in diesem Fall erst nach ca. 60 Millisekunden mit dem Insassen in Kontakt was sich in dem schnelleren Anstieg der Brusteindrückung ab diesem Zeitpunkt auswirkt. Aufgrund des durch die Straffung gewonnenen Weges kann die Kraftbegrenzung auf niedrigerem Niveau erfolgen, was zu der geringeren maximalen Brusteindrückung führt. Die unterschiedlichen getesteten Straffzeitpunkte scheinen kaum Auswirkung auf die Brusteindrückung zu haben.

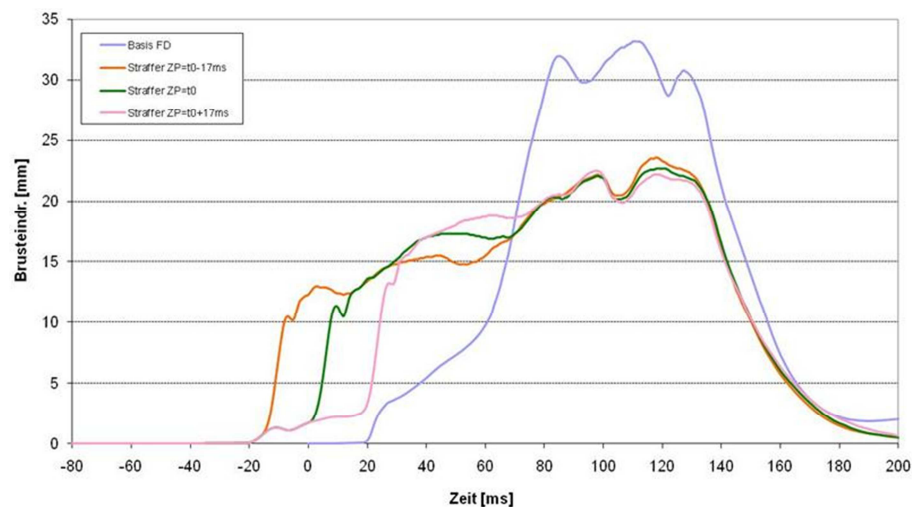


Abbildung 65: Verläufe der Brusteindrückung bei unterschiedlichen Straffzeitpunkten

Insbesondere die Belastungen der Unterschenkel erhöhen sich jedoch deutlich, wenn die Straffung zu einem früheren Zeitpunkt erfolgt, was mit den Erläuterungen im Abschnitt 5.1.1 begründet werden kann. Diese Untersuchung wurde auch mit unterschiedlich hohen Strafniveaus wiederholt, es zeigte sich aber stets dasselbe Ergebnis.

Bei den Untersuchungen mit der 5%-Frau im US-NCAP Rating zeigen sich auch in der Gesamtpunktezahl bei einer frühen Straffung deutlichere Verbesserungen. In Abbildung 66 ist ersichtlich, dass bei einer Straffung im zeitlichen Bereich zwischen 10 und 15 Millisekunden vor t_0 (Strafniveau ca. 3000N) eine minimale Belastung auftritt.

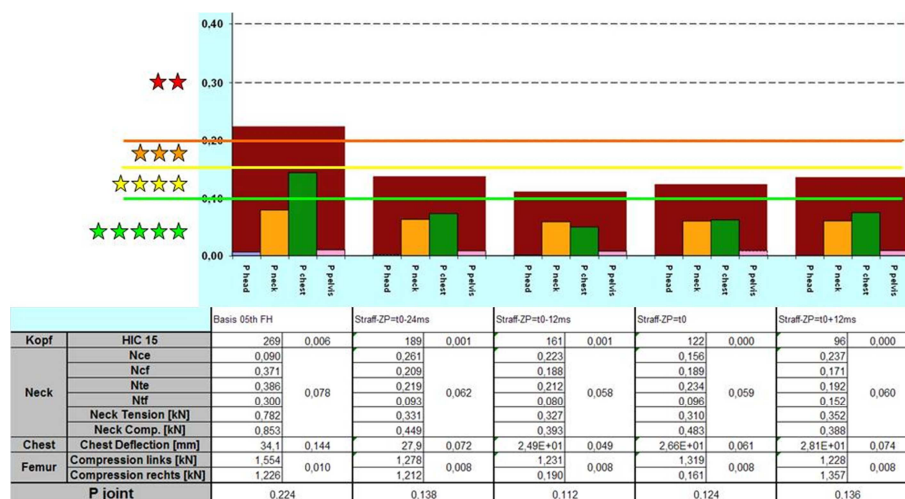


Abbildung 66: Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Straffzeitpunkten 5%-USNCAP, v.l.n.r.: Basis, t_0-24ms , t_0-12ms , t_0 , t_0+12ms

Bei einer noch früheren Straffung treten in allen Körperregionen wieder höhere Belastungen auf, wohingegen es bei späteren Straffzeitpunkten zu einer stärkeren Brusteingdrückung jedoch zu einer geringeren Kopfbelastung kommt. Auch in diesem Fall wurden verschiedene Strafniveaus simuliert, die Ergebnisse blieben tendenziell gleich.

5.2 Umsetzung einer längeren Straffung

Herkömmliche pyrotechnische Gurtstraffer haben die Aufgabe innerhalb kürzester Zeit die Gurtlose zu entfernen und so für eine schnellst mögliche Ankopplung des Insassen an der Fahrzeugverzögerung zu sorgen. Beispielsweise sorgt im Fall des Schlosstraffers des Referenzfahrzeuges ein pyrotechnischer Aktuator dafür, dass ein Kolben verschoben wird, der den Gurt einzieht. Sobald der Innendruck im Straffer nachlässt, blockiert der Kolben, sodass der Gurt nicht wieder ausgezogen werden kann. Aufgrund von Undichtheit und Abkühleffekten können diese Aggregate die Straffkraft aber nicht über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten. Allein durch eine frühere Aktivierung eines Gurtstraffers, wie er in aktuellen Fahrzeugen zum Einsatz kommt, kann also keine länger anhaltende Straffwirkung erzielt werden. In Abbildung 67 sind die Kraftverläufe im Beckengurt für verschiedene Zündzeiten des Serien-Schlossstraffers dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass die Gurtkraft innerhalb weniger Millisekunden wieder auf annähernd Null absinkt. Die Basis stellt dabei einen Lastfall mit konventionellem Auslösezeitpunkt dar.

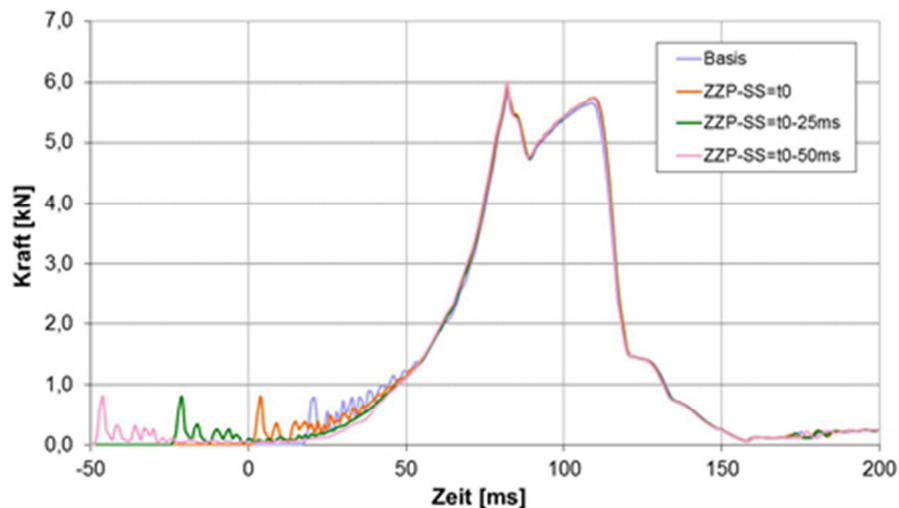


Abbildung 67: Verlauf der Beckengurtkraft mit Serienstraffer am Gurtschloss für verschiedene Straffzeitpunkte

Es gibt Untersuchungen zur Abschätzung der Effektivität von mehrstufigen pyrotechnischen Gurtstraffern [64, 1998b]. Mit derartigen Systemen kann durch eine zeitlich versetzte Zündung von mehreren unabhängigen, kleineren Treibladungen über einen längeren Zeitraum eine Straffkraft aufgebracht werden. Um jedoch mit einem derartigen System einen bestimmten zeitlichen Verlauf der Gurtkraft zu realisieren, ist eine sehr aufwändige Abstimmung mit vielen Prinzipversuchen notwendig. Die Auslegung des Gurtsystems für ein Serienfahrzeug kann nicht unabhängig von den restlichen Rückhaltesystemen erfolgen und wird daher größtenteils numerisch mittels Mehrkörper- oder Finite-Elemente-Simulationen durchgeführt. Dabei werden verschiedene theoretische Gurtkraftverläufe hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Insassenbelastung untersucht. Zur Absicherung der Simulationsergebnisse sind aber auch Komponenten- beziehungsweise Schlittenversuche erforderlich. Es wird also ein Aggregat benötigt, mit dem der Verlauf der Straffkraft, der sich in der Simulation als optimal herausgestellt hat, im Realversuch bestmöglich nachgebildet werden kann. Insbesondere während der Entwicklungsphase, in welcher Randbedingungen teilweise noch flexibel sind oder verschiedene Kraftverläufe getestet werden sollen, ist eine möglichst flexible Aktorik notwendig. Mit einem mehrstufigen pyrotechnischen Straffer wäre beispielsweise für jedes zu testende Straffniveau beziehungsweise für unterschiedliche Straffzeitpunkte jeweils eine aufwändige Entwicklungsschleife für den auf diesen Fall abgestimmten Straffer notwendig. Dies ist zeitaufwändig und teuer, weswegen als Alternative dazu für dieses Projekt eine flexible Aktorik für die Straffung und Kraftbegrenzung des Beckengurtes entwickelt wurde. Diese wird im Folgenden kurz beschrieben.

5.2.1 Entwicklung einer variablen Gurtaktorik

Mit einem konventionellen Straffaggregat können jene Gurtkraftverläufe, die notwendig sind um eine länger wirkende Straffung mit geringerem Niveau zu erreichen, nicht ohne Weiteres umgesetzt werden. Im Zuge dieses Projektes sollten aber die Thematik der Straffung noch vor t_0 anhand von Simulationen untersucht und die Ergebnisse auch mit Versuchen bestätigt werden. Da keine Aktorik verfügbar war, mit der verschiedene Straffvarianten einfach getestet werden konnten, wurde eine Diplomarbeit gestartet, die zum Ziel hatte, ein System zu entwickeln, mit dem beliebige Kraftverläufe einfach umgesetzt werden können [59, 2010g]. Im ersten Schritt stand nur die Rückhaltung des Beckens im Vordergrund.

5.2.1.1 Anforderungen/Konzept

Bei der Entwicklung dieses Aggregates ergaben sich folgenden Anforderungen: Als Einsatzgebiet sind Entwicklungsversuche von Rückhaltesystemen in einer frühen Phase sowie die Untersuchung von neuen Straff- und Kraftbegrenzungskonzepten gedacht. Es war also nicht das Ziel, neuartige

Gurtkomponenten für Fahrzeuge zu entwickeln. Mit dieser Aktorik soll es möglich sein, dass Simulationsergebnisse von „optimalen“ Gurtkraftverläufen in Entwicklungsversuchen schnell und einfach umgesetzt werden können. Aufwändige und teure Entwicklungsschleifen von pyrotechnischen Aggregaten können so also reduziert aber im Hinblick auf die Serienentwicklung keinesfalls ersetzt werden.

Hinsichtlich der Straffung wurde als Ziel festgelegt, dass Kräfte am Aggregat bis ca. zehn Kilonewton über einen ausreichend langen Zeitraum aufrechterhalten werden können. Eine wesentliche Anforderung war dabei, dass das Strafniveau und die Dauer einfach veränderbar sind. Der Zeitraum bis zum Anliegen der vollen Kraft sollte dabei nicht langsamer sein als bei einem pyrotechnischen Gurtstraffer. Um die Auswirkung der Straffung an verschiedenen Gurtanbindungspunkten untersuchen zu können, wurde festgelegt, dass eine beidseitige Straffung am Gurtendbeschlag und am Gurtschloss realisiert werden kann. Als maximaler Straffweg wurden beidseitig 100 Millimeter festgelegt. Damit steht am Beckengurt etwa der doppelte Straffweg eines konventionellen Schlosstraffers zur Verfügung.

Nach einer Rückverlagerung des Beckens aufgrund der Straffung erscheint es auch notwendig, dass der Abstand zwischen Knie und Instrumententafel wieder kontrolliert ausgegeben werden kann. Somit war für die Aktorik auch eine Kraftbegrenzungsfunktion erforderlich, die einfach und schnell in ihrer Charakteristik verändert werden kann.

Neben diesen Grundanforderungen ergeben sich auch noch einige weitere Anforderungen, die für einen sinnvollen Einsatz dieser Aktorik notwendig sind: Das System muss möglichst kompakt ausgeführt sein, damit es im begrenzten Bauraum im Bereich des Sitzes eingebaut werden kann. Im Fall, dass eine Montage direkt am Sitz gewünscht ist, spielt auch die Masse des Systems eine große Rolle, da diese die Bewegung des Sitzes während der Kollision beeinflusst.

Mit diesen Anforderungen wurden verschiedene Konzepte ausgearbeitet und bewertet. Jene Variante, welche das Lastenheft am besten erfüllte, wurde in weiterer Folge konstruiert, gebaut und getestet. Als bestes Gesamtsystem stellte sich eine Kombination aus einem pneumatischen Straffer und einer hydraulischen Bremsvorrichtung als Kraftbegrenzer heraus. In Abbildung 68 ist der prinzipielle Aufbau des Systems dargestellt:

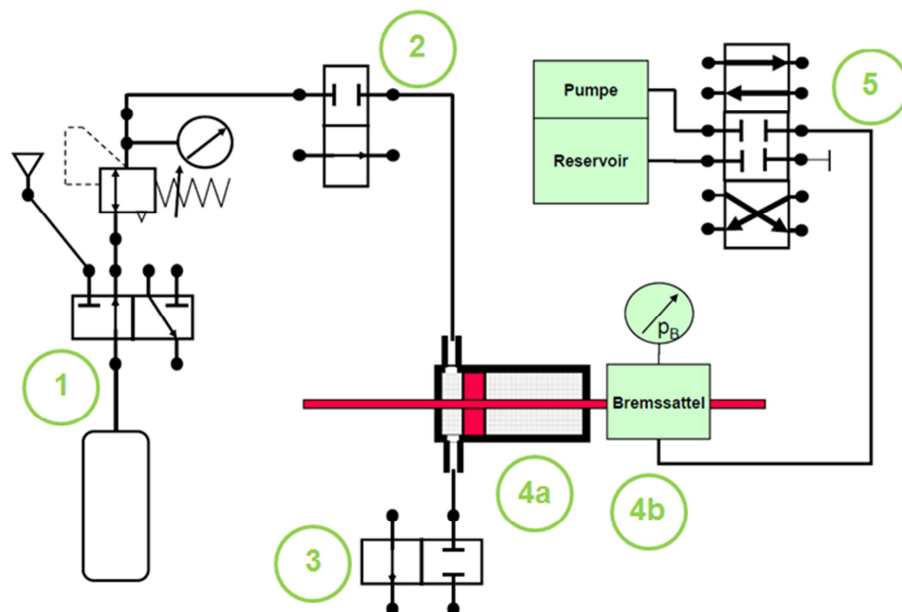


Abbildung 68: Prinzip-Schaltbild der voll variablen Prüfstandsgurtaktorik

Ein Test läuft dabei folgendermaßen ab: Vor dem Versuch wird die hydraulische Bremse (4b) von der Druckregleinheit (5) mit dem maximalen Druck beaufschlagt. Die Bremse wirkt auf die mit dem

Gurtband direkt verbundene Kolbenstange und blockiert diese in der Startposition. Das Entlüftungsventil (3) ist verschlossen und durch die Öffnung des Füllventils (2) wird der Strafferzylinder (4a) mit Gas gefüllt. Das gewünschte maximale Straffniveau bestimmt den Fülldruck, welcher in der Druckversorgung (1) eingestellt wird. Bis zum Straffvorgang ist der Zylinder also mit Druck gefüllt und die Kolbenstange wird durch die hydraulische Bremse fest gehalten.

Zum gewünschten Straffzeitpunkt öffnet das Hydraulikventil und der Bremsdruck wird innerhalb weniger Millisekunden abgebaut. Sobald die Haltekraft der Bremse einbricht, wird der Kolben durch den Straffdruck verschoben und das Gurtband eingezogen. Das Gesamtvolumen des pneumatischen Systems (Zylinder, Leitungen, Druckspeicher) ist so abgestimmt, dass sich der Druck und damit auch die Straffkraft durch die Verschiebung des Kolbens nur minimal verringert. Es steht also für den gesamten Straffweg eine annähernd konstante Straffkraft zur Verfügung. Da es hier im Gegensatz zu pyrotechnischen Aggregaten auch zu keinen Abkühleffekten kommt, bleibt das Kraftniveau auch über der Zeit konstant.

Ab einem bestimmten, vom Crashpuls abhängigen, Zeitpunkt übersteigt die Gurtkraft durch die Massenträgheit des Insassen während des Unfalls die Kraft, mit der der Gurt gestrafft wird. Der Kolben wird also wieder ausgezogen. Dieser Zeitpunkt kann im Versuch beispielsweise durch eine Wegmessung am Kolben ermittelt werden. Zu diesem Zeitpunkt wird der Hydraulikdruck in der Bremse so angehoben, dass der Auszugsvorgang durch die Reibkraft abgebremst wird. Je nach gewünschtem Kraftbegrenzungsniveau, kann der Bremsdruck niedriger oder höher eingestellt werden. Wenn der Druck im Strafferzylinder auch während der Kraftbegrenzungsphase wirkt, lassen sich geringe Kraftbegrenzungsniveaus nicht realisieren. Aus diesem Grund wird zusätzlich zur Erhöhung des Bremsdruckes auch ein eigens entwickeltes Entlüftungsventil (3) aktiviert, mit welchem der Gasdruck im Straffer innerhalb weniger Millisekunden abgebaut werden kann.

Im ersten Schritt werden in der Straff- und Kraftbegrenzungsphase nur konstante Kraftniveaus realisiert. Durch eine Vorgabe eines zeitlichen Verlaufes des Bremsdruckes noch während der Straffphase kann aber auch ein beliebiger Verlauf der Straffkraft realisiert werden. Ebenso kann während der Kraftbegrenzungsphase ein beliebiger Bremsdruckverlauf vorgegeben werden, was zu einem entsprechenden Verlauf der Gurtkraft führt. Theoretisch ist auch eine Regelung der Gurtkraft ohne Änderungen an der Aktorik denkbar. Dafür müsste eine geeignete Regelgröße und ein stabiler Regler entwickelt werden, die Ergänzungen betreffen also hauptsächlich die Software für den Betrieb der Aktorik.

Im Rahmen der Diplomarbeit von Peter Luttenberger [59, 2010g] konnten die Funktion dieses Systems und die Erfüllung der Anforderungen gemäß dem Lastenheft in einer Reihe von Prinzipversuchen erfolgreich nachgewiesen werden. Anschließend wurde die Aktorik in die bestehende Schlittenkarosse integriert und die Funktion in Realversuchen bestätigt. Im Folgenden werden diese Versuche kurz beschrieben und zusammengefasst.

5.2.1.2 Funktionsnachweis in Schlittenversuchen

Zunächst war es notwendig, eine geeignete Halterung für die beiden Aktuatoren am Sitz zu entwickeln. Aus Platzgründen war nur eine Montage der Straffer hinter dem Sitz quer zur Fahrtrichtung möglich. Der Gurt wurde auf der Seite des Endbeschlages und des Gurtschlösses jeweils mit einem Stahlseil direkt mit der Aktorik verbunden. Um die zusätzliche Masse am Sitz so gering wie möglich zu halten, wurden sämtliche Versorgungseinheiten (Pneumatik- und Hydraulikversorgung) entkoppelt auf der Karosse montiert. Die Betriebsmedien werden über flexible Hochdruckschläuche zugeleitet. In Abbildung 69 und Abbildung 70 sind die einzelnen Komponenten ersichtlich:

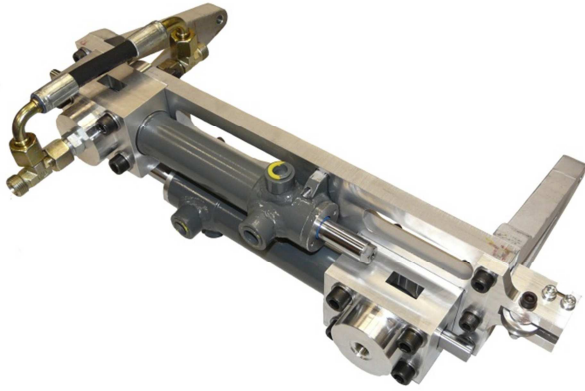


Abbildung 69: Gurtaktorik mit Halterung für beidseitige Straffung und Kraftbegrenzung des Beckengurtes

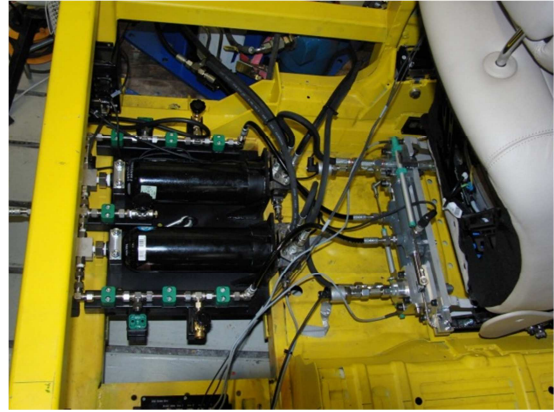


Abbildung 70: Foto der eingebauten Gurtaktorik samt der Versorgungseinheit in der Schlittenkarosse

In einer Reihe von Stand- und Schlittenversuchen konnte die Funktion der Aktorik erfolgreich nachgewiesen werden. Exemplarisch werden die Ergebnisse eines Schlittenversuches mit einem Hybrid III 50%-Dummy analysiert:

In Abbildung 71 sind die Verläufe der Drücke im Strafferzylinder (P_{Air}) und der Hydraulikbremse (P_{Br}) während des Versuchs dargestellt. Dabei kam aufgrund der Straffung an beiden Anbindungspunkten des Beckengurtes (GS...Gurtschloss, EB...Endbeschlag) jeweils ein Straffer und eine Bremse pro Seite zum Einsatz. Die Verläufe von Gurtschloss und Endbeschlag unterscheiden sich dabei geringfügig, da am Gurtschloss auch noch ein gewisser Anteil der Schultergurtkraft zu addieren ist. Die Druckabsenkung in der Hydraulik etwa 15 Millisekunden nach t_0 leitet die Straffung des Gurtbandes ein. Bis etwa 60 Millisekunden nach t_0 wird der minimale Hydraulikdruck (vom Druckregler begrenzt) gehalten. Zu Beginn der Straffung kommt es aufgrund von den, mit der hohen Einzugs geschwindigkeit des Kolbens verbundenen Nachströmverlusten des Gases aus dem Druckspeicher zu einer Druckabsenkung im Strafferzylinder etwa 25 Millisekunden nach t_0 .

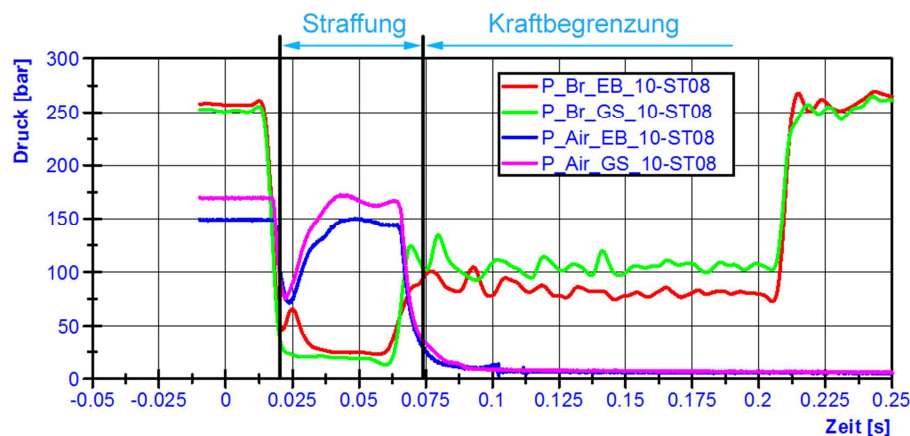


Abbildung 71: Verläufe des Straffdruckes und des Bremsdruckes

Diese Druckabsenkung hängt vom Straffdruck und von der Vorspannung des Beckengurtes aufgrund einer etwaigen vorhergegangenen Straffung des Schultergurtes in der B-Säule ab. In Abbildung 72 ist die Auswirkung des nicht konstanten Straffdruckes auf die Zugkraft im Beckengurt ersichtlich. Das Soll-Straffniveau von etwa vier Kilonewton stellt sich erst verzögert ein.

Ab etwa 60 Millisekunden nach t_0 übersteigen die Gurtkräfte durch die Vorverlagerung des Dummies die Straffkräfte und es erfolgt der Wechsel auf die Kraftbegrenzungsphase. Gleichzeitig mit der Entlüftung des Straffers wird der Bremsdruck angehoben, sodass sich das gewünschte Kraftbegrenzungsniveau (in diesem Fall sechs Kilonewton) einstellt.

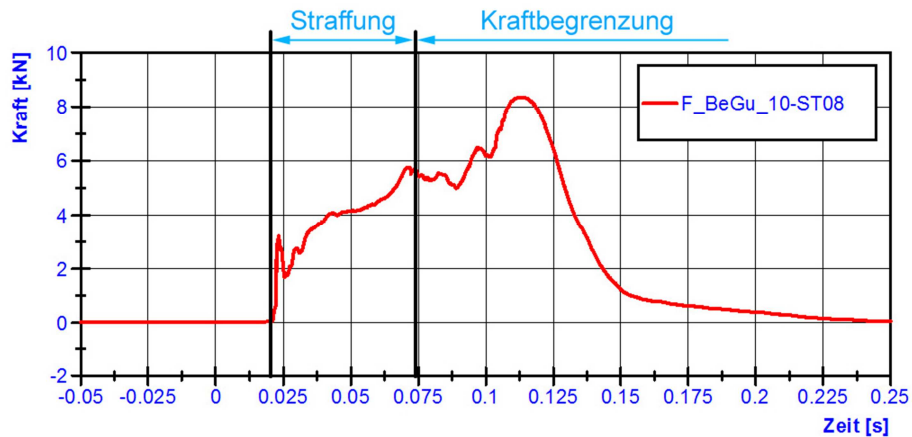


Abbildung 72: Kraftverlauf im Beckengurt

Beim vorgestellten Versuch wurde das Kraftbegrenzungsniveau nicht ausreichend hoch angesetzt. Der gesamte, während der Straffung eingezogene, Weg wurde wieder ausgezogen, was zu der erhöhten Gurtkraft ab etwa 100 Millisekunden nach t_0 führt.

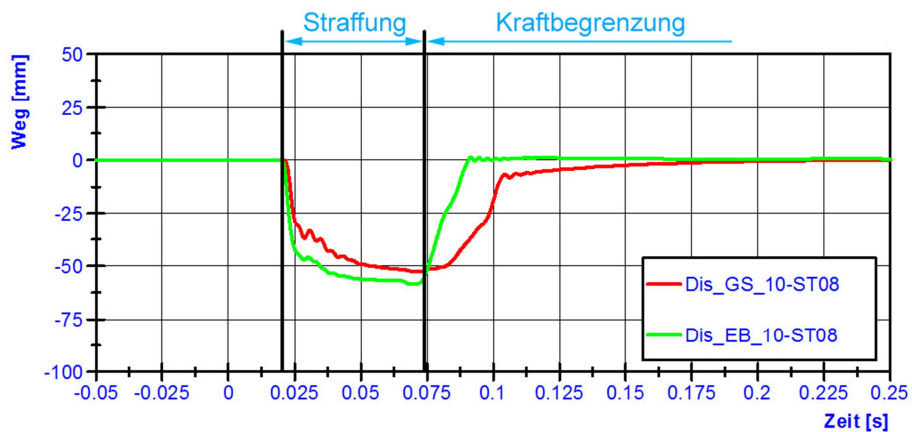


Abbildung 73: Straffwege an Endbeschlag und Gurtschloss

In Abbildung 73 sind die beiden Verläufe der Straffwege am Endbeschlag und Gurtschloss dargestellt. Es zeigt sich dabei, dass während der Kraftbegrenzungsphase, etwa 100 Millisekunden nach t_0 beide Straffer wieder vollkommen ausgezogen wurden. Damit lässt sich der Anstieg der Beckengurtkraft zu diesem Zeitpunkt erklären.

Neben diesem Versuch wurden noch weitere neun Schlittenversuche mit dem 50%-Mann beziehungsweise der 5%-Frau durchgeführt. Darüber hinaus wurden etliche Prinzipversuchsreihen durchgeführt, um einzelne Funktionen zu testen. Mögliche Ansatzpunkte für Verbesserungen in der Performance ergeben sich beim Nachströmverhalten des Gases aus dem Druckspeicher in den Strafferzylinder und beim Reibschluss zwischen Bremse und Kolbenstange.

Die Grundfunktionen dieser Prüfstands-Gurtaktorik sind also nachgewiesen. Um nun bei Entwicklungsversuchen beliebige Kraftverläufe testen zu können, muss lediglich die Vorgabe der Druckverläufe der Hydraulikbremse sowie der initiale Luftdruck im Straffer geändert werden.

5.3 Theoretische weitere Verbesserung durch Rückverschiebung des Sitzes oder Ausklinkung der Lehne

Im Abschnitt 5.1.3 wurde der Frage nachgegangen, in wie weit eine Vorbeschleunigung des Insassen möglich ist, wenn die Rückenlehne des Sitzes fixiert bleibt.

Unter der Annahme, dass die Zugrichtung des Gurtes aufgrund der Submarining-Problematik nicht wesentlich flacher gestaltet werden kann, soll nun untersucht werden, wie sich eine Freigabe der Rückenlehne auf die Kinematik des Insassen vor und während der Kollision auswirkt. Ein derartiges System wurde eigentlich für den Heckaufprall entwickelt (vgl.: [58, 1998a]), unter den Randbedingungen einer lang anhaltenden Straffung und Rückverlagerung des Insassen, ermöglicht es aber unter Umständen auch bei Frontalunfällen eine Reduktion der Belastungen.

Um einen solchen Mechanismus abzubilden, wird im ersten Schritt in der bestehenden validierten Simulationsumgebung einfach der Kontakt zwischen der Rückenlehne und dem Rücken des Dummys deaktiviert. In Abbildung 74 werden bei identischen Straff-Parametern die Trajektorien von Kopf, Brust und Becken des Dummys bei bestehendem Kontakt mit der Rückenlehne mit jenen ohne Kontakt verglichen. Erwartungsgemäß kann der Insasse wesentlich weiter nach hinten gezogen werden, wenn die Rückenlehne keinen Widerstand leistet. Es zeigt sich deutlich an der Trajektorie des Dummys, dass zu Beginn der Straffung etwa 45° nach unten gezogen wird, was in etwa der Gurtzugrichtung entspricht. Im weiteren Verlauf flacht die Kurve ab und entspricht etwa der Neigung des Sitzkissens.

Weiters ist in der folgenden Abbildung zu erkennen, dass sich bei der Variante mit freigegebener Rückenlehne der Dummy infolge des Crashpulses weiter nach vorne verlagert. Die Parameter von Gurt und Airbag, wie beispielsweise das Kraftbegrenzungsniveau im Schultergurt oder der Abströmquerschnitt im Airbag, sind allerdings für beide Varianten gleich.

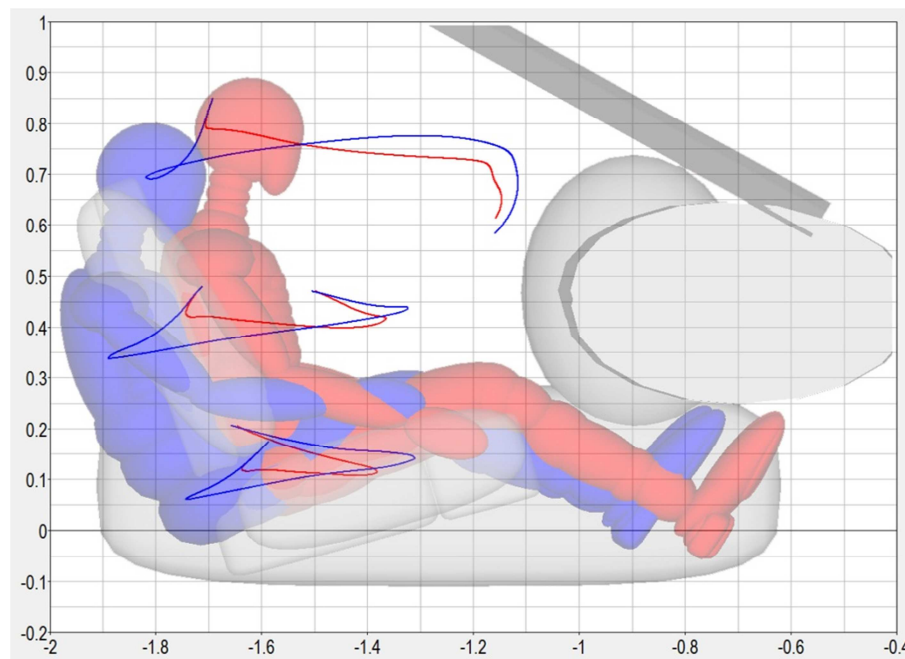


Abbildung 74: Bewegung des Dummys mit (rot) und ohne (blau) Kontakt mit der Rückenlehne

Aufgrund der unveränderten Gurtgeometrie ergibt sich bei der Rückverlagerung des Insassen das Problem, dass die Gurtwinkel sehr flach werden. Die Zugrichtung des Gurtes steht also fast im rechten Winkel zu der Bewegungsrichtung des Insassen wodurch auch keine Rückhaltekräfte aufgebracht werden können. Bei noch weiterer Rückverlagerung des Insassen kann es dazu kommen, dass weder der Schulter- noch der Beckengurt am Insassen anliegen.

Während dieser Phase wird der Dummy nicht zurückgehalten und er nimmt aufgrund des anliegenden Crashpulses Geschwindigkeit im Fahrzeuginnenraum auf. Erst wenn sich der Dummy wieder weit genug vorverlagert hat, sodass die effektiven Gurtkräfte der Bewegung des Insassen entgegenwirken, kann er wieder abgebremst werden. Im Endeffekt gewinnt man durch diese Maßnahme keinen zusätzlichen Verzögerungsweg, es wird lediglich die Vorverlagerung des Insassen zeitlich verschoben.

In Abbildung 75 ist der Bewegungsablauf des Insassen bei einem Straffbeginn 80 Millisekunden vor t_0 mit freier beziehungsweise gesperrter Rückenlehne dargestellt.

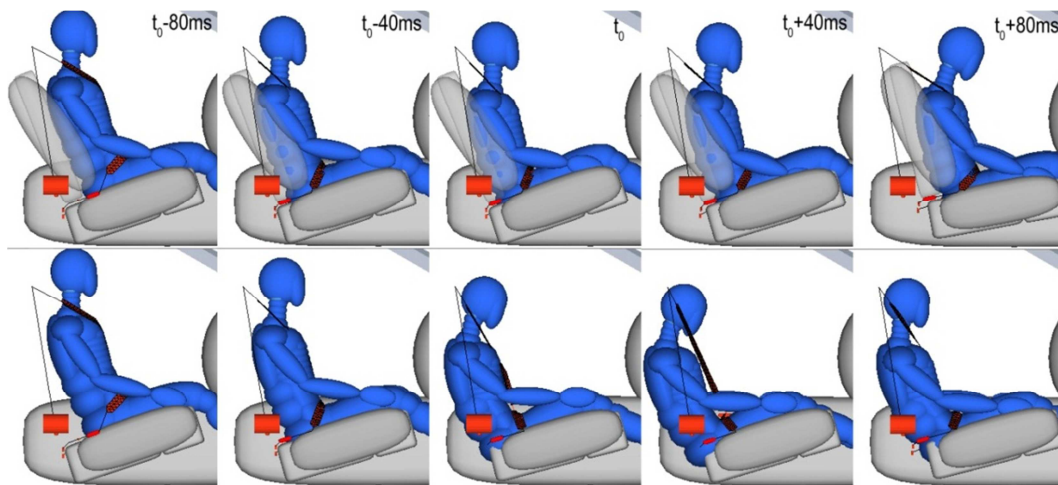


Abbildung 75: Kinematik des Insassen mit (oben) und ohne (unten) Kontakt mit der Rückenlehne

Insbesondere während des Zeitraums zwischen t_0 und circa 40 Millisekunden nach t_0 kann deutlich erkannt werden, dass aufgrund der Rückverlagerung des Dummies durch den Gurt keine Rückhaltekräfte aufgebracht werden können. In der folgenden Abbildung ist die Beckenbeschleunigung als Maß für die Rückhaltung abgebildet.

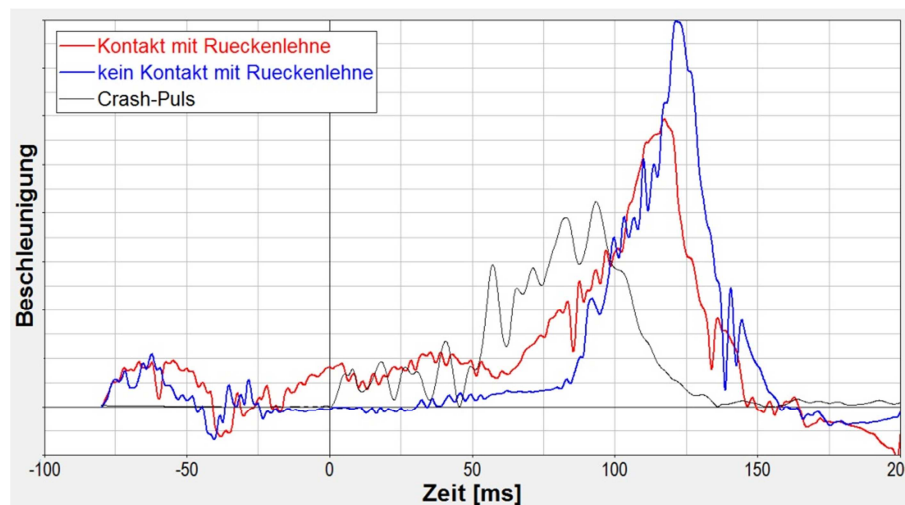


Abbildung 76: Verläufe der Beckenbeschleunigung mit und ohne Kontakt mit der Rückenlehne

Es werden dabei wieder die beiden Varianten wie in Abbildung 75 miteinander verglichen, die sich, abgesehen von der Freigabe der Rückenlehne, nicht unterscheiden. Bei der Variante mit der gesperrten Rückenlehne sieht man deutlich, dass unmittelbar nach Anstieg des Crashpulses das Becken optimal, also auf Niveau der Fahrzeugverzögerung, abgebremst wird. Ab circa 50 Millisekunden nach t_0 bleibt die Beckenbeschleunigung deutlich unter dem Crashpuls, was sich mit Nachgiebigkeiten im Gurtsystem (z.B.: Dehnung, Kraftbegrenzung) und im Sitz begründen lässt. Im Vergleich dazu wird das Becken im Fall der frei gegebenen Rückenlehne bis etwa 50 Millisekunden nach t_0 gar nicht abgebremst. Dies liegt an der Position des Dummies und der damit verbundenen ungünstigen Gurtzugrichtung. Erst ab circa 80 Millisekunden nach t_0 kann das Becken effektiv zurückgehalten werden, was auch in Abbildung 75 nachvollzogen werden kann.

Eine effektive Vorbeschleunigung des Insassen entgegen der Fahrzeugbewegung zur Reduktion der Aufprallenergie erscheint also nur in Kombination mit einer angepassten Gurtgeometrie sinnvoll. Dies

betrifft insbesondere Fahrzeuge, bei denen der Gurtumlenker an der B-Säule befestigt ist, beziehungsweise Sitzpositionen auf Höhe der B-Säule. Ansonsten kann der Insasse auf dem „gewonnenen“ Weg nicht verzögert werden, wodurch sich das Verbesserungspotential für die Belastungen in Grenzen hält. Um einen Abfall im Innendruck des Luftsackes noch vor dem Eintauchen des Insassen zu verhindern, müsste die spätere Insassenvorverlagerung auch bei der Triggerung des Airbags beziehungsweise bei der Abstimmung des Gesamtsystems berücksichtigt werden. Um das maximale Potential zu erzielen, müsste bei einer stärkeren Rückverlagerung des Insassen infolge einer Vorbeschleunigung auch die Airbagform entsprechend angepasst werden.

5.4 Zusammenfassung – Früh gestraffter Gurt

Im Kapitel 2.3 wurden die beiden theoretischen Verbesserungsmöglichkeiten des Insassenschutzes mit Hilfe einer frühen Straffung des Sicherheitsgurtes beschrieben. Einerseits kann durch die frühe Straffung eine Reduktion der Anprallgeschwindigkeit des Insassen im Fahrzeug erreicht werden. Andererseits gewinnt man durch die Rückverlagerung des Insassen zusätzlichen Verzögerungsweg, auf dem der Insasse sanfter abgebremst werden kann. Um diese Potentiale jedoch umsetzen zu können, müssen einige Voraussetzungen im Fahrzeug erfüllt sein:

Durch die Freigabe der Rückenlehne oder durch eine Rückverschiebung des gesamten Sitzes muss zusätzlicher Weg für eine effektive Vorbeschleunigung des Insassen entgegen der Fahrzeugbewegung geschaffen werden. Ohne einer dieser Maßnahmen kann davon ausgegangen werden, dass lediglich eine Rückverlagerung von etwa zwei bis drei Zentimetern erreicht werden kann, bevor die Reaktionskräfte der Rückenlehne eine weitere Rückverschiebung verhindern.

Um den gewonnen Weg des Insassen aufgrund einer deutlichen Rückverlagerung nach einer lang anhaltenden Straffung ausnutzen zu können, muss gewährleistet sein, dass die Gurtzugrichtung immer möglichst in Richtung der Bewegung zeigt. Je direkter in Bewegungsrichtung des Insassen gestrafft wird, umso effektiver kann der Insasse vorbeschleunigt werden. Soll dies für alle Insassenklassen und Sitzpositionen möglich sein, müssen die Gurtanbindungspunkte im Fahrzeug deutlich weiter nach hinten verschoben werden. Mit der daraus resultierenden flacheren Zugrichtung des Beckengurtes steigt allerdings das Risiko, dass der Beckengurt über die Hüftknochen rutscht und im Bereich des Abdomens möglicherweise schwere Verletzungen verursacht.

Eine Änderung der Gurtgeometrie wurde in dieser Studie nicht in Betracht gezogen, weswegen es an dieser Stelle auch keine weiteren Erkenntnisse über Verbesserungen und eventuelle Probleme durch die Vorbeschleunigung des Insassen gibt. Es wäre aber ein interessanter Anknüpfungspunkt für weitere Untersuchungen.

Um eine optimale Ankopplung des Dummies zu erreichen, erwies es sich als wichtig, dass sowohl am Becken- als auch am Schultergurt gestrafft wird. Bei einer Variation von Strafniveau und Straffzeitpunkt zeigte sich, dass aufgrund des Kontaktes mit der Rückenlehne eine Rückverlagerung des Dummies von nur wenigen Zentimetern erreicht werden konnte. Bei früher Straffung mit geringem Kraftniveau ergibt sich dabei der Vorteil der geringeren Aggressivität des Straffers. Bei späterer Straffung mit höheren Kräften kann unter der Voraussetzung eines relativ zum Puls passenden Straffzeitpunktes die Rückwärtsbewegung des Dummies genützt werden, um die Anprallgeschwindigkeit im Fahrzeuginnenraum geringfügig zu reduzieren.

Bei einer stärkeren Rückverlagerung des Insassen aufgrund der Straffung zeigte sich allerdings das Problem, dass es im Bereich der unteren Extremitäten zu einer Erhöhung der Belastungen kommen kann. Nach der Straffung kann die Ferse des Insassen entlang einer längeren „Freiflugstrecke“ Geschwindigkeit aufnehmen und schlägt dann härter an der Struktur im Fußraum an als bei einer späten Straffung. Die Rückwärtsbewegung des Beckens aufgrund der Straffung führt tendenziell auch zu einer Streckung des Knies. Das gestreckte Knie ist steifer gegenüber axialen Lasten im Oberbeziehungsweise Unterschenkel, was dazu führen kann, dass sich diese erhöhen. Insbesondere beim

EuroNCAP-Rating bewirken die höheren Belastungen des Unterschenkels, dass die Verbesserungen durch die frühere Ankopplung teilweise überkompensiert werden und die Gesamtpunktezahl sinkt.

Im Vergleich zum Referenzfahrzeug konnte durch die länger anhaltende Straffung des Gurtbandes an allen drei Anbindungspunkten eine deutlich frühere Ankopplung des Insassen an der Fahrzeugverzögerung erreicht werden. Damit verbunden konnte das Gurtkraftbegrenzungsniveau im Schultergurt reduziert werden, was sich in einer deutlichen Reduktion der Brustbelastungen auswirkte. Die Brust eindrückung stellt sowohl beim europäischen als auch beim amerikanischen NCAP-Rating-Test den kritischen Wert der Gesamtbelastung dar. Somit sind Verbesserungen dieses Verletzungskriteriums sehr wichtig.

Um die erwähnte, über den gesamten Weg konstant anliegende Straffkraft realisieren zu können, wurde im Zuge dieses Projektes eine spezielle Aktorik entwickelt, die mittlerweile auch als Patent angemeldet ist. Mit einer Kombination aus einem pneumatischen Strafferkolben und einer hydraulischen Bremse, die auf die Kolbenstange eingreift, lassen sich für Entwicklungsversuche sehr flexibel beliebige Kraftverläufe im Gurtband realisieren. Diese Aktorik soll bei der Entwicklung von neuartigen Gurtsystemen anstelle von pyrotechnischen Aggregaten zum Einsatz kommen. So können bereits in einer frühen Phase der Entwicklung Prinzipversuche durchgeführt werden, ohne dass dafür aufwändige Abstimmungsarbeiten für pyrotechnische Aggregate notwendig sind. Dies ist im Hinblick auf die Validierung der Simulationsmodelle in einer frühen Phase der Entwicklung von großem Vorteil.

6 Gesamtsystemabstimmung: Airbag + Gurtsystem

In den bisher beschriebenen Untersuchungen wurden im Wesentlichen unabhängig voneinander die Anforderungen an das Airbagsystem und das Gurtsystem abgeleitet, um damit bei einer Auslösung noch vor der Kollision bestmöglichen Schutz für den Insassen zu erreichen.

Dabei konnte gezeigt werden, dass sich durch eine geeignete Gestaltung des Airbags insbesondere die Kopfbelastungen deutlich reduzieren lassen. In einer Prinzipuntersuchung hinsichtlich der in OoP-Situationen auftretenden Belastungen konnten aufgrund der langsameren Befüllung des Luftsackes ebenfalls Verbesserungen der Insassenbelastungen nachgewiesen werden.

Simulationen zum Einfluss des Straffzeitpunktes zeigten auf, dass eine frühe Straffung des Gurtes unter Umständen zu einer höheren Belastung der unteren Extremitäten führt. Ohne eine Freigabe der Rückenlehne in Kombination mit einer Anpassung der Gurtgeometrie scheint eine Straffung deutlich vor t_0 insbesondere für den 50%-Mann im EuroNCAP-Lastfall keine wesentlichen Verbesserungen zu bringen. Diese Erkenntnisse sollten aber erst in Schlittentests bestätigt werden. Da für Versuche mit einer lang anhaltenden Straffung bei geringerem Kraftniveau keine geeigneten Aggregate zur Verfügung standen wurde, eine Aktorik entwickelt, mit der flexibel beliebige Gurtkraftverläufe am Becken realisiert werden können.

Bei den bereits diskutierten Versuchen mit dem früh ausgelösten Airbag traten einige Probleme bei der Positionierung des Luftsackes vor dem Insassen auf. Darüber hinaus zeigte der Airbag die Tendenz, sich aufgrund der schrägen Abstützflächen an der Windschutzscheibe beziehungsweise der Instrumententafel etwas zu verdrehen. Für die folgenden Versuche mit dem Gesamtsystem muss also auch das Airbagsystem weiter überarbeitet und dann gemeinsam mit dem zu einem frühen Zeitpunkt gestrafften Gurtsystem für die einzelnen Lastfälle abgestimmt werden. In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Schritte bis hin zu Auslegung des Gesamtsystems beschrieben.

6.1 Abstimmung Gurtsystem

In Voruntersuchungen zeigte sich, dass durch die Straffung an mehreren Anbindungspunkten und durch die länger anhaltende Straffkraft eine frühe Ankopplung des Dummys erreicht werden konnte. Im weiteren Verlauf der Vorverlagerung des Insassen blieben die Maximalwerte der Brusteindrückung deutlich unter jenen des Serien-Gurtsystems.

Ungünstigerweise ergaben sich bei der früheren Straffung jedoch deutliche Verschlechterungen der Belastungen der unteren Extremitäten. Insbesondere die Tibia-Belastung, also der Tibia-Index und die axialen Kräfte im Unterschenkel, erhöhten sich teils sehr stark, was beim EuroNCAP-Rating zu Einbußen führt.

Aus Vorgängerprojekten war bekannt, dass sich der aktuelle Sitz im Referenzfahrzeug unter der Crashbelastung stark relativ zur Karosse bewegt. Der Anbindungspunkt des Sitzendbeschlages verlagert sich bei einem EuroNCAP-Crash mit dem 50%-Dummy knapp 80 Millimeter nach vorn. Dies führt dazu, dass Änderungen der Straffung und Kraftbegrenzung im Beckengurt kaum an den Insassenbelastungen zu erkennen sind. Eine starke Rückhaltung des Beckens mit dem Gurt hat also kaum Auswirkung, da der Sitz relativ „weich“ ist und der Insasse mit dem Knie nur unwesentlich langsamer an der Instrumententafel anschlägt. Dies ist aber eine spezifische Eigenschaft dieses Sitzes, weswegen es notwendig wurde, dessen Verhalten zu optimieren. Aus einem vorhergegangenen Projekt waren dazu auch Komponenten verfügbar, mit denen der Seriensitz relativ einfach „versteift“ werden konnte.

Mit diesen Randbedingungen wurden optimale Kraftbegrenzungsniveaus am Schultergurt und am Beckengurt, beziehungsweise die Straffzeitpunkte und Strafniveaus ermittelt, bei denen sich minimale Insassenbelastungen einstellen.

6.1.1 Versteifung des Sitzes

Wie schon erwähnt, wurde in den Untersuchungen zum Gurtsystem festgestellt, dass auch trotz großer Änderungen an der Straffung beziehungsweise Kraftbegrenzung im Beckengurt die Rückhaltung des Beckens nur minimal verbessert werden konnte.

Aus diesem Grund wurde der Sitz mit einigen Anbauteilen versteift. In Abbildung 77 sind die beiden wesentlichen Versteifungselemente ersichtlich: Die tragende Struktur der Sitzfläche wird mittels zweier Halterungen mit der Sitzschiene beziehungsweise direkt mit der Karosse verbunden, wobei jedoch eine gewisse Bewegungsfreiheit (etwa 20mm) erhalten bleibt.

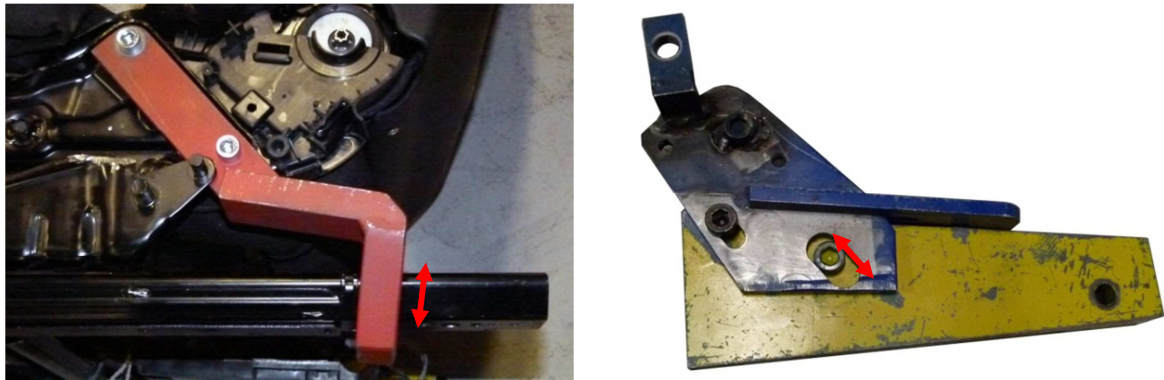


Abbildung 77: Anbindungsteile der Sitzstruktur an die Karosse

Zusätzlich zu diesen beiden Anbindungen wurde zur Verstärkung ein Metallbolzen in ein Querrohr unter der Sitzfläche gesteckt. Zuletzt wurde als weitere Abstützung der Sitzfläche nach unten ein Schaumblock angefertigt der sich im eingebauten Zustand zwischen der tragenden Struktur der Sitzfläche und der Bodenplatte der Versuchskarosse befindet.

Mit diesen Maßnahmen konnte erreicht werden, dass die Vorverlagerung des Sitzkissens und die Rotation der Sitzlehne deutlich reduziert werden konnten. Aus Vorversuchen war bekannt, dass sich der Gurtendbeschlag anstelle der ca. 80 Millimeter nun nur mehr etwa 40 Millimeter vorverlagert. Der Unterschied zu der Bewegungsfreiheit an den Anbindungspunkten von etwa 20 Millimeter ist auf eine Verformung des Sitzrahmens zurückzuführen.

Diese Änderung zeigte sofort den gewünschten Effekt bei der Rückhaltung des Beckens und insgesamt bei den Belastungswerten des Dummys. Man muss aber davon ausgehen, dass auch mit dem Seriensystem, mit dem das in dieser Studie entwickelte System letztendlich verglichen werden soll, mit dem steiferen Sitz niedrigere Insassenbelastungen erreicht werden können. Um die unterschiedlichen Rückhaltesysteme weiterhin vergleichen zu können, wurde der steifere Sitz in dem Modell des Referenzfahrzeuges eingefügt und neu berechnet.

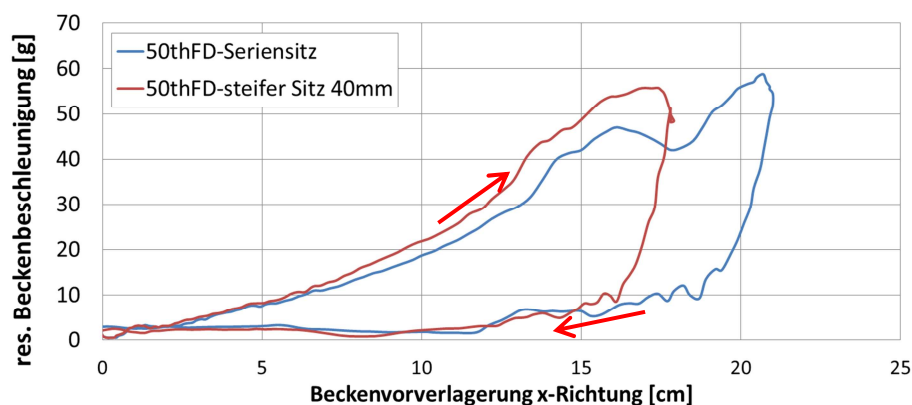


Abbildung 78: Vergleich der Beckenanbindung beim Seriensitz und dem versteiften Sitz

In der obigen Abbildung kann die Auswirkung des unterschiedlichen Verhaltens der beiden Sitze auf die Beckenbeschleunigung nachvollzogen werden. Bis zu einer Vorverlagerung des Beckens von etwa fünf Zentimeter unterscheiden sich die Beschleunigungsverläufe nur unwesentlich. Bis zu diesem Zeitpunkt ist die Rückhaltung des Beckens noch maßgeblich vom Beckengurt bestimmt. Im Verlauf der weiteren Vorverlagerung ist aber ersichtlich, dass mit dem versteiften Sitz schneller höhere Rückhaltekräfte erreicht werden. Die maximale Vorverlagerung des Beckens fällt um rund drei Zentimeter geringer aus als mit dem Seriensitz, was in weiterer Folge auch zu geringfügig niedrigeren Belastungen der unteren Extremitäten führt.

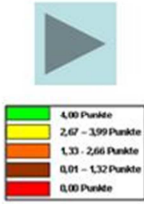

Dateiname		Basis 50thFD		Basis 50th FD steiferer Sitz 40mm	
Euro-NCAP Bewertung 					
					
		Werte	Punkte	Werte	Punkte
Kopf / Hals	HIC36	545,8	4,00	486,3	4,00
	a3ms Kopf [g]	62		59,1	
	amax Kopf [g]	63,3		61,4	
	Zugkraft [kN]	0,71		0,69	
	Scherkraft [kN]	0		0	
	Moment [N.m]	33,904		26,961	
Brust	Brusteindrückung [mm]	33,2	2,4	29,1	2,986
	VC [m/s]	n/a		n/a	
Oberschenkel	Kraft max l. [kN]	2,85	4	2,79	4
	Knieverschiebung l. [mm]	0,19		0,18	
	Kraft max r. [kN]	1,58		1,49	
	Knieverschiebung r. [mm]	2,02		1	
Unterschenkel	Kraft max l. [kN]	4,38	2,416	4,16	2,561
	Tibia Index l.	0,73		0,62	
	Kraft max r. [kN]	2,75		2,49	
	Tibia Index r.	0,45		0,46	
Euro-NCAP Score		12,816		13,547	

Abbildung 79: Untersuchung des Einflusses des steiferen Sitzes auf die Belastungswerte im Referenzfahrzeug

Wie in Abbildung 79 dargestellt, führt diese Änderung durchwegs in allen Körperregionen teilweise zu größeren Verbesserungen. Insbesondere die Reduktion der Brusteindrückung von etwa 4 Millimeter ist dabei für das Ergebnis im EuroNCAP-Lastfall vorteilhaft. In weiterer Folge gelten die Niveaus der Verletzungskriterien des Serienfahrzeuges mit dem versteiften Sitz als neue Referenz. Das Verbesserungspotential der früh ausgelösten Rückhaltesysteme wird aus dem Vergleich zu diesen Werten abgeleitet.

6.1.2 Auswahl des Schultergurtaggregates

Um eine Rotation des Oberkörpers durch die Straffung des Gurtes zu vermeiden, soll sowohl der Becken- als auch der Schultergurt gestrafft werden. Die Straffung am Beckengurt erfolgt beidseitig mit der im Abschnitt 5.2 beschriebenen Aktorik. In Prinzipversuchen mit dieser Aktorik zeigte sich, dass der Straffweg von beidseitig zehn Zentimeter aufgrund von Gurtlose beziehungsweise der lockeren Wicklung des Gurtbandes im Retraktor (Filmspuleffekt) bei höheren Kräften nicht ausreicht, um den Insassen effektiv nach hinten zu ziehen. Erst durch eine zeitlich gesehen etwas frühere Straffung des Schultergurtes konnte verhindert werden, dass der Beckengurtstraffer bis auf Anschlag eingezogen wurde.

Da für die Straffung beziehungsweise Kraftbegrenzung des Schultergurtes andere Anforderungen gelten als für den Beckengurt, konnte die entwickelte Aktorik hier nicht eingesetzt werden.

Insbesondere der erforderliche längere Weg während der Kraftbegrenzungsphase im Aufroller kann mit der für den Beckengurt entwickelten Aktorik nicht umgesetzt werden. Es wurde daher entschieden, einen konventionellen, pyrotechnischen Gurtautomat (Autoliv R30LLA) zu verwenden. Damit ergibt sich allerdings auch die Einschränkung, dass die Straffkraft nur im Beckengurt über einen beliebig langen Zeitraum aufrechterhalten werden kann.

Dieses Aggregat verfügt über einen zweistufigen, schaltbaren Gurtkraftbegrenzer, welcher in verschiedenen Kombinationen von Kraftniveaus erhältlich ist. Für die Versuchsabstimmung der einzelnen zu betrachtenden Lastfälle wurde in einer Reihe von Simulationen untersucht, welche Variante aus hohem und niedrigem Gurtkraftbegrenzungsniveau ideal mit dem früh ausgelösten Airbagsystem kombiniert werden kann.

Bei dieser Untersuchung muss wiederum eine Abstimmung gefunden werden, bei der die Anforderungen der ausreichenden Rückhaltung des 95%- beziehungsweise des 50%-Dummys und der ausreichenden Nachgiebigkeit des Gurtes für die 5%-Frau bestmöglich abgedeckt werden. Bei ansonsten konstanten Randbedingungen wurden daher die Parameter des Gurtsystems (hohes und niedriges Kraftbegrenzungsniveau, Umschaltzeitpunkt) und die frei wählbaren Parameter des Airbagsystems (Öffnungszeitpunkt aktives Vent, Zündzeitpunkt zweite Gasgenerator-Stufe) variiert.

In die nähere Auswahl fielen dabei die Kombinationen zwischen etwa fünf und vier Kilonewton für das hohe und circa zwei beziehungsweise drei Kilonewton für das niedrige Kraftbegrenzungsniveau. In Abbildung 80 sind die Verläufe der Gurtkraft im Schultergurt dargestellt, die sich bei den unterschiedlichen Kraftbegrenzerabstimmungen ergeben. Im Vergleich zeigt die strichpunktierte Linie den Verlauf der Schultergurtkraft, der sich mit dem degressiven Serien-Gurtkraftbegrenzer einstellt.

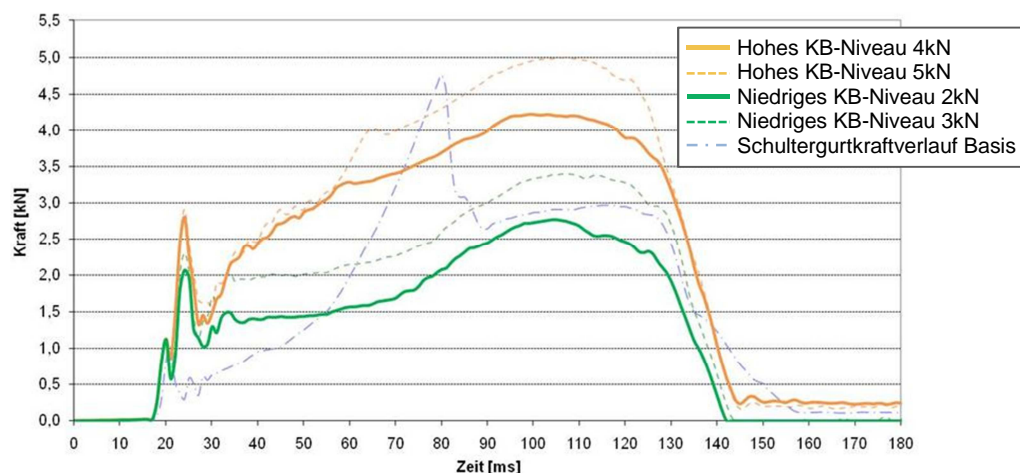


Abbildung 80: Schultergurtkräfte mit unterschiedlichen Kraftbegrenzern (50%-Dummy, EuroNCAP-Lastfall)

Die beiden dick ausgezogenen Linien sind dabei die Grenzkurven für das Aggregat mit Kraftniveaus von etwa vier und zwei Kilonewton und die dünneren gestrichelten Linien jene für etwa fünf beziehungsweise drei Kilonewton. Mit einem pyrotechnischen Aktuator kann zu einem beliebigen Zeitpunkt von dem hohen auf das niedrige Kraftniveau umgeschaltet werden. So lassen sich die Rückhalteeigenschaften des Gurtsystems in weiten Grenzen an den Insassen beziehungsweise die Unfallsschwere anpassen.

Als bester Kompromiss zwischen den einzelnen gegenläufigen Anforderungen an den Kraftbegrenzer (z.B.: Insasse, Crashpuls, ...) stellte sich die oben beschriebene Variante mit den Niveaus vier und zwei Kilonewton heraus. Mit dieser Konfiguration kann bei der leichten 5%-Frau durch ein frühes Umschalten auf das niedrige Kraftbegrenzungsniveau in Kombination mit einem früh geöffneten aktiven Vent des Airbags eine ausreichende Vorverlagerung und damit niedrige Belastungsniveaus

erreicht werden. Die Abstimmung des Gurtkraftbegrenzers hat maßgeblichen Einfluss auf die Brusteindrückung und die Belastung des Nackens im Zusammenspiel mit dem Airbag.

Mit der gewählten Kombination konnten in der Voruntersuchung mit dem früh ausgelösten Airbagsystem für die wichtigsten betrachteten Lastfälle jeweils gute Belastungsniveaus erreicht werden.

Damit sind die Randbedingungen vom Schultergurtsystem im Wesentlichen geklärt. Die Straffung des Beckengurtes erfolgt beidseitig in Endbeschlag und Gurtschloss mit der eigens entwickelten Prüfstandsgurtaktorik. Die Straffung im Schultergurt erfolgt pyrotechnisch wenige Millisekunden vor der Straffung im Beckengurt, um ein Einziehen bis zum Anschlag im Beckengurt zu verhindern. Die optimalen Straffzeitpunkte sowie das Strafniveau im Beckengurt müssen noch in weiteren Simulationen ermittelt werden.

Die Kraftbegrenzungsniveaus im Schultergurt betragen vier beziehungsweise zwei Kilonewton, der Umschaltzeitpunkt wird wiederum auf die jeweiligen Kombinationen aus Insasse und Crashpuls angepasst. Im Beckengurt kann ebenfalls eine Nachgiebigkeit realisiert werden, wodurch die Belastungen vom Becken und den unteren Extremitäten beeinflusst werden können. Auch dafür muss vor der endgültigen Systemabstimmung noch ein optimales Niveau gefunden werden, welches dann bei allen Testkonfigurationen gleich bleibt.

6.1.3 Abstimmung des Gurtsystems für Frühauslösung

Wie im Kapitel 5.1 beschrieben, ergeben sich bei der Straffung des Gurtbandes noch vor dem Anprall einige Probleme, die dazu führen können, dass in Summe eine nur sehr geringe oder keine Reduktion der Insassenbelastung erreicht werden kann.

In dieser Untersuchung wird weder eine Ausklindung der Rückenlehne noch eine Änderung der Gurtgeometrie in Betracht gezogen, wodurch sich eine starke Vorbeschleunigung des Insassen vor der Kollision nicht umsetzen lässt. Es soll aufgezeigt werden, in wie weit unter diesen Randbedingungen durch eine frühere Straffung bzw. die Straffung sowohl am Becken- als auch am Schultergurt, die Belastungen auf den Insassen reduziert werden können.

Im Abschnitt 5.1.1 wurde darauf hingewiesen, dass es bei der frühen Straffung des Beckengurtes zu einer Vergrößerung des Abstandes zwischen der Ferse des Insassen und dem Prallblech im Fußraum kommt. Im Verlauf der Vorverlagerung des Insassen durch die Crash-Beschleunigung nimmt der Fuß mehr Geschwindigkeit auf und schlägt dann härter im Fußraum an. Damit einher gehen höhere Belastungen der unteren Extremitäten. Insbesondere beim EuroNCAP-Lastfall, bei dem die Werte von Tibia-Kräften sowie der Tibia-Index in die Bewertung einfließen, führt dieser Effekt unter Umständen zu einer Verschlechterung des Gesamt-Ratings. Die besten Gesamtwerte konnten bei Aktivierung der Straffer zu konventionellen beziehungsweise geringfügig früheren Zeitpunkten erreicht werden. In diesen Fällen führt die Auslösung der Straffer dazu, dass das Becken des Insassen kurz vor dem Aufprall der Fersen am Prallblech abgebremst beziehungsweise zurückgezogen wird. Somit wird der Anprall wesentlich gedämpft, was die Verringerung der Belastungen bewirkt.

Diese Ergebnisse stammen aus einer Vielzahl von Simulationen in denen verschiedene Straffzeitpunkte und Straffstrategien (Abstimmung zwischen Schulter- und Beckengurtstraffung) analysiert wurden. Dabei muss bemerkt werden, dass das eingesetzte Simulationsmodell, insbesondere jenes des Sitzes, für die Rückwärtsbewegung des Dummys nicht im Detail validiert wurde. Somit sind die Aussagen mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

Um eine sichere Aussage treffen zu können, wurden mehrere Straffvarianten bei Schlittenversuchen geprüft. Einerseits sollte jene Variante getestet werden, bei der die minimalen Insassenbelastungen auftreten. Um die Ergebnisse der Simulation zu bestätigen beziehungsweise zu kontrollieren, wurde auch eine Variante mit einer Straffung noch vor t_0 getestet.



Abbildung 81: Anordnung der Fußraumkamera bei Schlittenversuchen

Um die Bewegung der Beine in Simulation und Versuch gut vergleichen zu können, wurde eine spezielle Fußraumkamera montiert. In der obigen Abbildung ist die Anordnung dieser Kamera ersichtlich.

Mit den final ausgewählten Komponenten des Gurtsystems müssen im Folgenden Abstimmungen für unterschiedliche Insassen sowie für verschiedene Unfallarten ermittelt werden. Im ersten Schritt wird dabei noch untersucht, mit welchem Niveau die Kraftbegrenzung im Beckengurt realisiert wird. Dabei ist es erforderlich, einen Kompromiss zwischen der Rückhaltung der beiden schweren Dummies und einer möglichen Vorverlagerung der 5%-Frau zu finden.

Sobald dies fixiert ist, kann durch die Variation der verbleibenden, frei wählbaren Parameter: Umschaltzeitpunkt vom hohen auf das niedrige Kraftbegrenzungsniveau beziehungsweise Straffzeitpunkt der drei Straffer, für jeden Dummy und jeden Lastfall eine Lösung mit minimalem Verletzungsrisiko gesucht werden.

6.2 Neuabstimmung Airbagsystem

Im ersten Schritt dieser Untersuchung wurde untersucht, inwieweit allein durch den früh ausgelösten Airbag Verbesserungen für den Insassenschutz erzielt werden können. Dafür wurden ein neuartiges Airbagsystem mit einer angepassten Luftsackform und ein eigens angepasster Gasgenerator entwickelt. Dieses System wurde in die ansonsten unveränderte Fahrzeugumgebung integriert. In einer Reihe von Versuchen konnten insbesondere für den Kopf deutliche Belastungsreduktionen erreicht werden. Bei den Versuchen traten aber auch einige Probleme, insbesondere bei der Positionierung und der Entfaltung des Luftsackes auf.

Als zweiter Schritt wurden einige Grundsatzuntersuchungen zu einer frühen Straffung des Gurtes durchgeführt und im Zuge dessen wurde eine Aktorik entwickelt, mit der im Versuch beliebige Gurtkraftverläufe realisiert werden können. Insbesondere die Brustedrückung konnte durch den frühen Anstieg aufgrund der Gurtstraffung in ihrem Maximalniveau deutlich reduziert werden.

In den folgenden Überlegungen sollen nun diese beiden Systeme zu einem Gesamtsystem kombiniert werden, mit dem, im Falle einer frühen Auslösung, die Insassenbelastungen minimal sind. Es besteht aber auch weiterhin die Anforderung, dass der Insasse auch im Falle einer Auslösung mit konventioneller Sensorik bestmöglich geschützt ist.

Zunächst muss das Airbagsystem nochmal überarbeitet werden, damit einerseits die Probleme aus den ersten Versuchsserien behoben werden und andererseits Gurtsystem und Airbagsystem optimal aufeinander abgestimmt sind.

Bei der Überarbeitung des Airbagsystems gibt es zwei große Problemstellungen: Erstens ist eine Verbesserung der Entfaltung und Positionierung des Airbags vor dem Insassen notwendig, damit die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse sowie optimale Rückhaltewirkung sichergestellt ist. Zweitens muss das gesamte Airbagsystem noch überarbeitet werden, damit es den Bauraumvorgaben aktueller Fahrzeuge entspricht. Dies ist ein nicht unwesentlicher Punkt für die Vergleichbarkeit des früh ausgelösten Rückhaltesystems mit jenem des Referenzfahrzeugs.

6.2.1 Überarbeitung Gasgenerator

Im Hinblick auf einen möglichen Serieneinsatz eines neuartigen Airbagsystems müssen einige Randbedingungen erfüllt werden, die nur indirekt Einfluss auf die Funktion und Performance des Systems haben. So gibt es beispielsweise für die Beifahrerseite definierte Modulvorgaben, die die Außenmaße und das Gewicht des Moduls beschränken. Darüber hinaus werden hier auch Fragestellungen der Montierbarkeit, der Positionierung der Steckverbindungen am Modul,... geregelt. Im Zuge der Überarbeitung des Airbags für die zweite Schleife an Schlittenversuchen, wurden auch derartige Anforderungen berücksichtigt. Diese Modifikationen am Modul führten zu geänderten Gasmassenverlusten, wodurch auch eine Neuvalidierung des Simulationsmodells notwendig wurde.

6.2.2 Überarbeitung Modulgehäuse – Behebung der Entfaltungsprobleme

Sowohl bei den bisher durchgeführten Schlitten- als auch OoP-Versuchen traten immer wieder Probleme bei dem Austritt des Luftsackes aus dem Modulgehäuse auf. Dabei muss bemerkt werden, dass für diese Versuche ein verstärktes Modulgehäuse aufgebaut wurde, welches in seinen Abmessungen insbesondere bei der Austrittsöffnung dem Serien-Modul entspricht. Eine Eigenheit dieses Gehäuses liegt darin, dass die Austrittsöffnung eine Engstelle für den Austritt des Luftsackgewebes darstellt.

Diese Verjüngung in Kombination mit dem geänderten Material (beschichtetes Gewebe), der manuellen Faltung des Airbags und der langsameren Füllung durch den Gasgenerator führt dazu, dass der Luftsack teilweise nur schwer aus dem Modulgehäuse austreten kann.

Dies wirkt sich bei den OoP-Versuchen sehr negativ aus, da der Luftsack zum Zeitpunkt des Kontaktes mit dem Dummy nur teilweise aus dem Modul ausgetreten ist. Im kleineren Volumen baut sich in weiterer Folge ein hoher Innendruck auf, welcher zu hohen Belastungen führt. In Abbildung 82 ist dieser Effekt deutlich erkennbar. Bei den Versuchen mit dem Serienairbag war der Luftsack immer vollständig aus dem Modul ausgetreten als es zum Kontakt mit dem Insassen kam.



Abbildung 82: Verhängen des Luftsackes beim Austritt aus der IP (links: OoP-Versuch, rechts: Schlittenversuch)

Das erschwerte Austreten des Luftsackes aus dem Modulgehäuse macht sich bei den Schlittenversuchen dadurch negativ bemerkbar, dass dem Airbag die Dynamik fehlt, um sich richtig vor dem Insassen zu positionieren und daher in weiterer Folge optimale Rückhaltewirkung aufzubauen. Ein Teil des Luftsackes bleibt bis zu einem Zeitpunkt, etwa 40 bis 60 Millisekunden nach

dem Zündzeitpunkt an der Austrittsöffnung in der Instrumententafel hängen und hält den Airbag zurück. Daraufhin fällt dieser in den Spalt zwischen den Knien und dem Handschuhfach, wo er sich in weiterer Folge auch trotz des steigenden Innendruckes nicht mehr loslösen kann. Durch diese falsche Positionierung des Airbags ergeben sich im Vergleich zur Simulation bei den Insassenbelastungen zum Teil deutliche Unterschiede insbesondere im Bereich des Nackens und bei der Brusteingdrückung. Bei den bisherigen Schlittenversuchen wurde, um dieses Problem zu vermeiden, eine Kartonplatte an der Instrumententafel befestigt, die verhindert, dass sich der Airbag zwischen Knie und Handschuhfach einklemmt. Zum Nachweis der Tauglichkeit dieses Konzeptes war es aber erforderlich, den Luftsack auch ohne die Kartonplatte richtig vor dem Insassen in Position zu bringen. Aus diesem Grund wurde entschieden, im Zuge der Überarbeitung des Airbagsystems von den Abmessungen der Öffnung des Serienairbags in der Instrumententafel abzuweichen. Die Austrittsöffnung im Modulgehäuse wurde in Fahrzeuginnenraumrichtung vergrößert, wodurch die Verjüngung des Schusskanals im Modul praktisch aufgehoben wurde. Die gewählte Öffnungsbreite entspricht dabei auch jener zukünftiger Fahrzeuge.

Diese Maßnahme hat zur Folge, dass die Serien-Instrumententafel für die folgenden Schlittenversuche nicht mehr verwendet werden kann, da ja die Öffnung für den geänderten Gasgenerator zu schmal ist. Für derartige Fälle verfügt die Firma Autoliv über ein einfaches System, mit welchem die Airbagklappe in ihren mechanischen Eigenschaften sehr gut nachgebildet werden kann.

In einer Reihe von statischen Aufblasversuchen in einer vereinfachten Nachbildung der Versuchskarosse (COP) konnten umgehend deutliche Verbesserungen im Verhalten des Airbags während der Entfaltung erzielt werden. In Abbildung 83 ist erkennbar, dass der Luftsack beim Schlittenversuch (oben) auf die Knie des Dummys fällt, sich dort verhängt und sich in weiterer Folge nicht mehr richtig positioniert. Im Vergleich dazu wird der überarbeitete Luftsack bei einem Entfaltungsversuch (unten) in einem Bogen über die Knie direkt in den Schoß des Dummys geschleudert, wo er sich dann vollständig, wie gewünscht, entfaltet.

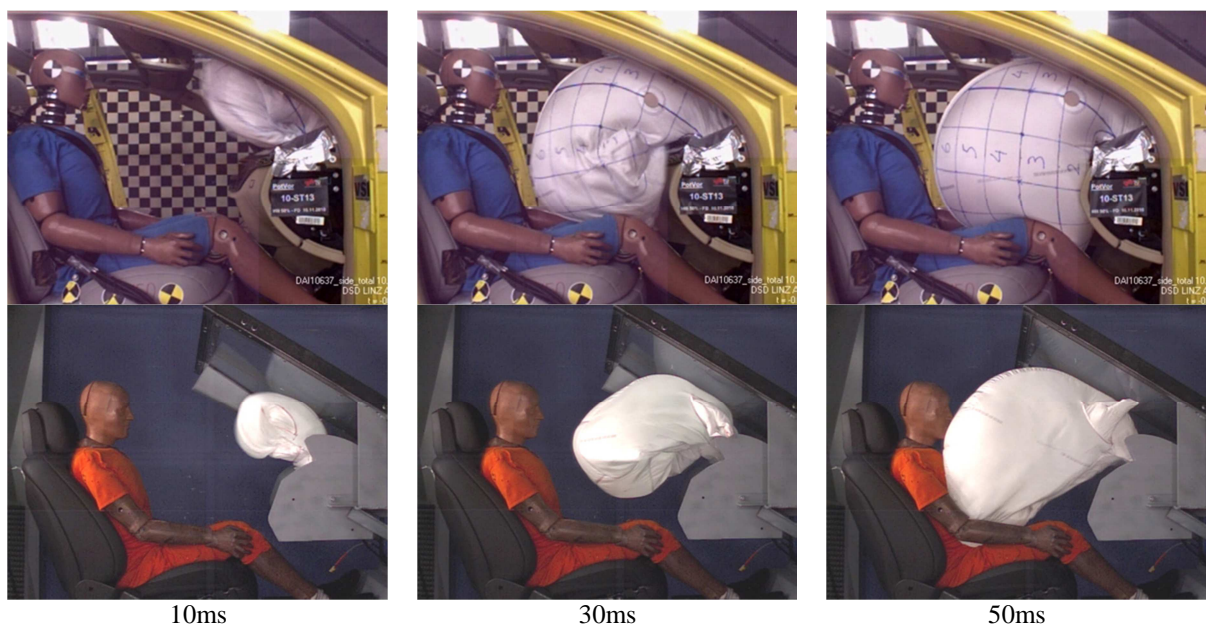


Abbildung 83: Positionierung des Airbags mit geänderter Modulöffnung im Vergleich zum Schlittenversuch

Im Zuge dieser Versuche wurde auch festgestellt, dass sich die breitere Anbindung des Airbags an die Instrumententafel infolge der vergrößerten Modulöffnung positiv auf dessen Stabilität auswirkt. Insbesondere bei der Airbagform für den 50%-Dummy kommt es nicht mehr zu einer so ausgeprägten Verdrehtendenz um die Fahrzeuginnenraumachse, welche ja bei den ersten Versuchsreihen Probleme bereitet hat.

Eine weitere Veränderung betrifft die Positionierung der Vent-Öffnungen am Luftsack. Bei den Schlittenversuchen der ersten beiden Versuchsreihen kam es immer wieder zu einer leichten Verdrehbewegung des Airbags um die Fahrzeuglängsachse. Dies führte dazu, dass das aktive Vent nach einer gewissen Zeit von einer Konsole auf der Instrumententafel und das Basis-Vent von der Windschutzscheibe verdeckt wurden. Dadurch konnte kein oder nur wenig Gas aus dem Luftsack entweichen und der Airbag blieb in weiterer Folge zu hart. Durch eine Neupositionierung der Öffnungen soll deren Abdeckung im Fall einer Verdrehung des Airbags verhindert werden.

6.2.3 Neuabstimmung Ventdurchmesser

Im Zuge der Überarbeitung des Gesamtsystems aufgrund der Probleme und Erfahrungen aus den bisher durchgeführten Versuchen, wurde auch eine Neuabstimmung der Abströmquerschnitte im Airbag notwendig. Eine Änderung war dabei die, im Kapitel 6.2.1 beschriebene Überarbeitung des Gasgenerators hinsichtlich seiner Abströmung, was mit geringfügig geänderten Verlusten im Modulgehäuse verbunden ist. Die Gasgeneratorleistung selbst blieb dabei unverändert.

Die wesentliche Änderung stellt jedoch der Wechsel im Bereich des Gurtsystems von den Serienkomponenten zu der Straffung an allen Gurtanbindungspunkten und dem zweistufigen Gurtkraftbegrenzer dar. Ein Ziel bei der Auslegung der Kraftbegrenzungsniveaus war es, die Brustbelastungen nach Möglichkeit zu minimieren. Um Verbesserungen zu erreichen, wurde die Rückhaltewirkung des Schultergurtes reduziert und mit einem, durch kleinere Abströmquerschnitte, härteren Airbag kompensiert. Damit erreicht man bei gleicher Rückhaltung eine großflächigere und damit biomechanisch besser verträgliche Krafteinleitung in den Brustkorb. Gleichzeitig erhöht man durch diese Maßnahme allerdings auch die Belastungen für Kopf und Nacken, weswegen ein guter Kompromiss gefunden werden muss.

Im ersten Schritt wurde untersucht, wie groß das Basisvent maximal sein darf, damit beim ungesicherten Lastfall (FMVSS208) ein Durchschlagen des Kopfes an die Instrumententafel oder an die Windschutzscheibe verhindert werden kann. Zusätzlich wurde auch der Lastfall zur Bestimmung der Gasgenerator-Einstellung für OoP-Situationen getestet. Dabei ist der Dummy ebenfalls nicht angesichert und es wird lediglich die langsame, erste Stufe des Gasgenerators aktiviert. Diese beiden Konfigurationen bestimmen also maßgeblich den Durchmesser des Basisvents. Das aktive Vent bleibt geschlossen beziehungsweise wird erst sehr spät während der Kollision geöffnet.

In weiterer Folge muss der Durchmesser des aktiven Vents abgestimmt werden. Einer der beiden Auslegungslastfälle ist dabei die 5%-Frau im US-NCAP-Lastfall, für die der Airbag nicht zu hart sein darf. Um niedrige Belastungswerte zu erreichen, muss eine gewisse Vorverlagerung des Insassen ermöglicht werden. Im Fall des 50%-Mannes beim länger andauernden EuroNCAP-Lastfall muss gewährleistet werden, dass der Insasse mit seinem Kopf nicht an der Instrumententafel anschlägt. Diese Auslegung erfolgt gekoppelt mit der Wahl der Kraftbegrenzungsniveaus des Schultergurtes. Dazu wurden eine Reihe von Parametervariationen durchgeführt, um in Summe die vielversprechendste Kombination zu finden.

Als beste Kombination zu den im Kapitel 6.1.2 beschriebenen Gurtkomponenten für die Abstimmung des Gesamtsystems stellte sich ein Basis-Vent mit einem Durchmesser von 40 Millimeter und ein aktives Vent mit 75 Millimeter heraus. Dies entspricht einer Reduktion der gesamten Abströmfläche im Vergleich zu den bisherigen Auslegungen um rund 25 Prozent.

Mit dieser Konfiguration müssen nun in weiterer Folge für die einzelnen Kombinationen aus Puls und Insasse geeignete Zeitpunkte für die Öffnung des aktiven Vents gesucht werden.

6.2.4 Volumensteuerung des zweistufigen Airbags

In dieser Arbeit wird ein Airbagsystem mit einer zweistufigen Geometrie eingesetzt. Je nach Insasse, Sitzposition beziehungsweise zeitlichem Auslöseszenario, wird entweder die große oder kleine Airbagform aktiviert. Die kleine Airbagform wird dabei durch das Zurückhalten des Mainpanels des

Luftsacks mit Hilfe von innen liegenden Fangbändern aus der großen Form realisiert (siehe Abbildung 38 und Abbildung 39).

Bei der Auslegung des Airbagsystems wird im ersten Schritt auf die Berücksichtigung des Umschaltvorganges von der kleinen auf die große Airbagform verzichtet. Dieser Effekt wird mit dem Hintergrund, die Systemkomplexität in dieser Phase der Entwicklung gering zu halten, weder in der Simulation noch im Versuch detailliert abgebildet. Bei den Schlittenversuchen wurden jeweils separate Module für den 50%-Mann und die 5%-Frau mit den entsprechenden Airbags angefertigt.

Im Abschnitt 4.3 werden zwei Auslösestrategien mit drei beziehungsweise vier notwendigen Zündkreisen diskutiert, die zu sehr unterschiedlichen Anforderungen bei der Auslegung des Umschaltmechanismus und der Abstimmung der Abströmquerschnitte im Airbag führen.

Im Fall der Variante mit drei Zündkreisen ist der Aktuator für die Volumensteuerung mit der zweiten Stufe des Gasgenerators gekoppelt. Die Fangbänder werden also erst bei der Zündung der zweiten Gasgeneratorstufe freigegeben. Damit einher gehen größere Verluste im Zeitraum vor der Umschaltung aufgrund des kleineren Airbagvolumens und des damit verbundenen höheren Innendruckes. Die Freigabe der Fangbänder und der Wechsel von der kleinen auf die große Airbagform ist hoch dynamisch und hat aller Wahrscheinlichkeit nach eine Rückwirkung auf die Insassenbelastung.

Um sich keine Detailprobleme mit der Kopplung des Gasgenerators und der Aktorik einzuhandeln, die nur am Rand Einfluss auf die Gesamtfragestellung dieser Arbeit hat, wurde bei der Definition der Hardware die Variante mit vier Zündleitungen betrachtet. In diesem Fall würde die Triggerung des Aktuators zur Freigabe der Fangbänder zeitlich kurz nach der Zündung der ersten Stufe des Gasgenerators erfolgen. Dass von Beginn der Entfaltung entweder die große oder die kleine Airbagform aktiv ist, ermöglicht eine Vereinfachung in Versuch und Simulation und stellt dabei nur einen geringen Fehler dar.

Zur Absicherung des Konzeptes wird die Funktion des Aktuators zur Freigabe der Fangbänder bei der Firma Autoliv in einer Reihe von Standversuchen nachgewiesen.

6.2.5 Nachweis OoP

Im Kapitel 4.4 wurde ausführlich nachgewiesen, dass durch die langsame Befüllung des Luftsackes, die Aggressivität bei dessen Entfaltung vermindert und damit auch das Verletzungsrisiko bei OoP-Situationen reduziert werden konnte. In dieser Untersuchung war das Ziel, möglichst eindeutig den Rückschluss von der Reduktion der Insassenbelastung auf die langsamere Befüllung des Airbags zu ermöglichen. Dazu wurden bei den Versuchen im Wesentlichen nur der Gasgenerator und das Luftsackgewebe getauscht. Die Airbagform, die Aufteilung im Modulgehäuse und die Faltung wurden so wenig wie möglich verändert. Im Vergleich zum Serien-Airbag konnten in diesen Tests auch deutliche Verbesserungen erzielt werden.

Es ist aber damit noch nicht geklärt, wie das aktuelle Airbagsystem mit seiner geänderten Geometrie, dem neuen Modulgehäuse und auch dem geringfügig adaptierten Gasgenerator hinsichtlich OoP-Belastungen abschneidet. Dazu ist es notwendig, weitere Tests durchzuführen.

Wie im Kapitel 6.2.2 erläutert, wurde im Zuge der Überarbeitung des Airbagsystems auch die Öffnung des Modulgehäuses geändert, um das Austreten des Luftsackes aus dem Modulgehäuse zu erleichtern. Mit diesem Schritt wurden auch die Abmessungen der Airbagklappe in der Instrumententafel an zukünftige Fahrzeuge angepasst.

Diese Maßnahme hatte zur Folge, dass die Original-Airbagklappe in der Instrumententafel nicht mehr verwendet werden konnte. Anstelle dessen wurde eine Ersatz-Klappe verwendet, die bei der Firma Autoliv schon vielfach in Verwendung ist und eine realistische Nachstellung der Öffnungskräfte der Klappe ermöglicht. In der folgenden Abbildung ist diese Ersatz-Klappe ersichtlich:



Abbildung 84: Ersatz-Airbagklappe in der Instrumententafel

Die Ausbeulung der Klappe unmittelbar vor dem Öffnen kann dabei durch die Dimensionierung der Schlitze in der Blechplatte an die reale Klappe angepasst werden. Ebenso wird durch die geeignete Wahl der Breite des Gewebebandes, welches die „Sollbruchstelle“ darstellt, der Zeitpunkt der Öffnung eingestellt. Die Abstimmung der Klappe erfolgt dabei anhand von Standversuchen im Vergleich zur Serien-Instrumententafel.

Somit kann erreicht werden, dass dem Airbag beim Austritt durch die Airbagklappe ein ähnlicher Widerstand entgegenwirkt, wie bei der richtigen Instrumententafel. Für die Schlittenversuche, bei denen der Insasse erst Kontakt mit dem schon voll entfaltenen Airbag hat, ist dies eine ausreichend genaue Nachbildung der Realität.

Es kann jedoch bei dieser Ersatzklappe nicht ausgeschlossen werden, dass es beim ersten Austreten des Luftsackes aus der Instrumententafel zu Unterschieden im Vergleich zu der richtigen Airbagklappe kommt. Dies ist insbesondere für OoP-Tests problematisch, bei denen die Interaktion zwischen Airbag und Insasse während der Entfaltung bewertet wird.

Um die Auswirkung dieser Ersatz-Airbagklappe auf die Insassenbelastungen abschätzen zu können, ist es erforderlich, Basisversuche mit dem Serien-Airbag durchzuführen. Etwaige Unterschiede erlauben dann einen gewissen Rückschluss darauf, wie das aktuelle Airbagsystem mit der Serien-Instrumententafel abschneiden würde.

6.3 Beschreibung Rückhaltesystem

In einer Reihe von Voruntersuchungen wurden die Einzelkomponenten der Rückhaltesysteme bestmöglich ausgewählt. Dazu zählen beispielsweise der Gurtkraftbegrenzer im Schultergurt und dessen einstellbare Kraftniveaus sowie die Durchmesser der beiden Abströmöffnungen im Airbag. Die Komponenten des gefundenen Rückhaltesystems werden nun kurz zusammenfasst:

- Airbag:
 - zweistufige Geometrie
 - zweistufiger Gasgenerator
 - aktives + passives Vent

- Gurtsystem:
 - Schultergurtautomat R30LLA mit Straffung und zweistufigem, umschaltbarem Gurtkraftbegrenzer
 - beidseitige Straffung und Kraftbegrenzung am Beckengurt mittels eigens entwickelter Prüfstandsgurtaktorik

Die Rückhalteeigenschaften dieser Komponenten werden dabei von festen und variablen Parametern bestimmt. Die festen Parameter sind mechanisch vorgegeben und für alle Konfigurationen gleich. Die Variabilität im gefundenen Gesamtsystem erlaubt die Anpassung der Rückhalteeigenschaften an den jeweiligen Insassen oder die festgestellte Unfallschwere mittels einiger freier Parameter. Die festen Parameter sind dabei:

- Airbagsystem: - Durchmesser Basisvent: 40mm
- Durchmesser aktives Vent: 75mm
- Gurtsystem: - Straffung Schultergurt R30LLA
- Schultergurt, hohes Kraftbegrenzungsniveau: 4kN
- Schultergurt, niedriges Kraftbegrenzungsniveau: 2kN

Folgende Parameter sind noch frei wählbar:

- Airbagsystem: - Zündzeitpunkt Gasgenerator Stufe 1
- Zündzeitpunkt Gasgenerator Stufe 2
- Zündzeitpunkt aktives Vent
- Gurtsystem: - Straffzeitpunkt Aufroller
- Umschaltzeitpunkt Kraftniveau Schultergurt
- Straffzeitpunkt Beckengurt
- Straffniveau Beckengurt
- Kraftbegrenzungsniveau Beckengurt

Dabei ist zu sagen, dass die Kraftniveaus für Straffung und Kraftbegrenzung im Beckengurt nicht völlig frei wählbar sind. Diese Parameter sind allerdings noch nicht mechanisch vorgegeben. Im Zuge der Auslegung muss noch eine Abstimmung gefunden werden, die sowohl für frühe als auch konventionelle Auslösezeiten, für schwere und leichte Personen bei unterschiedlichen Unfallschweren gute Ergebnisse liefert.

Weitere Einschränkungen sind die frühest mögliche Auslösung des Airbags bei 80 Millisekunden vor t_0 im Fall der Frühauslösung und bei den konventionellen Auslösezeiten im Fall einer „Nicht-Erkennung“.

6.4 Abstimmung der Rückhaltesysteme und Validierung des Simulationsmodells für Frühauslösung

Wie schon erwähnt, wurde das Simulationsmodell des Airbags mittels Aufblas- und Impaktorversuchen für eine Auslösung 80 Millisekunden vor t_0 korreliert. Zu Zündzeiten des Airbags nahe diesem Validierungspunkt können gut gesicherte Aussagen über die Rückhalteeigenschaften des Luftsacks und damit in weiterer Folge die Belastungen für den Insassen getroffen werden. Entfernt man sich jedoch von diesem Zündzeitpunkt um beispielsweise das Verhalten des Airbags bei konventionellen Auslösezeiten zu bewerten, kann es zu erheblichen Abweichungen kommen. Der Grund dafür liegt in der Modellierung der Verluste, wie Leckage oder Abkühleffekte, welche sich bei den beiden Auslöseszenarien stark unterschiedlich auswirken. Im ersten Schritt der Gesamtsystemabstimmung werden das System also nur für die Frühauslösung ausgelegt und die Simulationsergebnisse anhand von Schlittenversuchen validiert.

Bisher wurden das Airbagsystem und das Gurtsystem jeweils unabhängig voneinander betrachtet, um die jeweiligen Anforderungen an die Aktorik detailliert herauszuarbeiten. Bei der Auslegung des Gesamtsystems können die einzelnen Rückhaltesysteme jedoch nicht mehr unabhängig voneinander

betrachtet werden, da sie sich gegenseitig beeinflussen. Somit sind umfangreiche Parametervariationen notwendig, um ein Summenoptimum in Form der geringsten Insassenbelastung zu finden.

In einer Reihe von Voruntersuchungen (siehe Kapitel 6.1 und 6.2) wurde durch Simulation der „Grenzlastfälle“, wie beispielsweise der ungegurtete Crashtest entsprechend FMVSS208, die Hardware für das Gesamtsystem festgelegt. Durch Anpassung der freien Parameter wie etwa die Zündzeiten der einzelnen Aggregate muss nun für jede Kombination aus Lastfall und Dummy eine bestmögliche Abstimmung gefunden werden. In den Schlittenversuchen werden allerdings nur die wichtigsten Konfigurationen getestet, anhand derer die Aussagekraft des Simulationsmodells überprüft wird. Somit werden auch die Simulationsergebnisse der anderen Varianten bestätigt.

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse jener Varianten analysiert, die im nächsten Schritt in Schlittenversuchen getestet wurden. Die Ergebnisse werden dabei mit den Belastungswerten des Referenzfahrzeuges und mit den Resultaten jener Prinzipstudie verglichen, in der der früh ausgelöste Airbag in Kombination mit dem Seriengurtsystem untersucht wurde (vgl. Kapitel 4.5).

6.4.1 HIII 50% - EuroNCAP

In einer Voruntersuchung hinsichtlich der Auswirkung unterschiedlicher Straffstrategien (Strafniveau und Strafdauer) zeigte sich in der Simulation, dass es bei einer frühen Straffung durch ein Wegziehen der Ferse und einem gestreckten Knie-Winkel zu einer signifikanten Erhöhung der Belastung der Unterschenkel kommt. Diese Verschlechterung führte in weiterer Folge dazu, dass trotz einer deutlich geringeren Brust eindrückung die Punktebewertung beim EuroNCAP-Rating nicht verbessert werden konnte. Aufgrund von einigen Vereinfachungen in der Modellierung vom Fußraum und dem Sitz sowie dem Handschuhkasten kann im Vorfeld nicht abgeschätzt werden, wie ausgeprägt dieser Effekt im Realversuch auftritt. Aus diesem Grund wurde die Abstimmung der Rückhaltesysteme zu zwei unterschiedlichen Straffzeitpunkten durchgeführt und diese Konfigurationen dann auch in Realversuchen getestet.

6.4.1.1 Airbagauslösung bei t_0-80ms , konventioneller Straffzeitpunkt

Die niedrigsten Insassenbelastungen konnten durch eine Auslösung des Airbags 80 Millisekunden vor t_0 und eine Straffung des Sicherheitsgurtes bei den konventionellen Zündzeiten (für den EuroNCAP-Lastfall: 17 Millisekunden nach t_0) erreicht werden. Die Straffung am Beckengurt erfolgte dabei mit einem über den gesamten Straffweg konstanten Niveau von drei Kilonewton. Am Schultergurt stellt sich unmittelbar nach der Straffung mit dem pyrotechnischen Straffer eine Gurtkraft von etwa 2,5 Kilonewton ein.

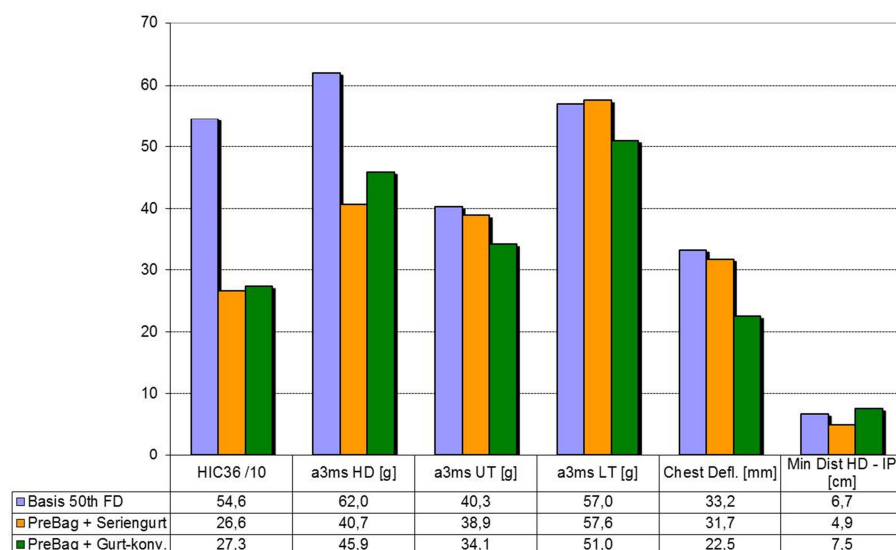


Abbildung 85: Simulationsergebnisse Auslegung HIII 50%, EuroNCAP, Airbagauslösung 80ms vor t_0 , Straffung des Gurtes 17ms nach t_0

In der obigen Abbildung sind exemplarisch die wichtigsten Belastungswerte des Insassen angeführt. Es zeigt sich, dass die Verbesserungen bei den Kopf- und Nackenbelastungen mit den Ergebnissen der Studie mit dem früh ausgelösten Airbag und dem Seriengurt vergleichbar sind. Dies ist zunächst auch zu erwarten, da es nur geringfügige Änderungen im Airbagsystem gab. Deutliche Verbesserungen können durch die frühe Ankopplung des Insassen aufgrund der Straffung an allen drei Gurtanbindungspunkten, das Anliegen der konstanten Straffkraft über den gesamten Straffweg sowie die Kraftbegrenzung an Schulter- und Beckengurt erreicht werden. Insbesondere die Reduktion der Brusteingdrückung um etwa 32% ist wichtig, da diese das kritische Verletzungskriterium beim EuroNCAP-Rating darstellt. Diese Verbesserung ergibt sich durch ein optimales Zusammenspiel aus Gurt, Airbag und dem versteiften Sitz. Durch die Straffung des Gurtes an allen Anbindungspunkten wird der Insasse bestmöglich im Sitz fixiert und nimmt dadurch sehr früh an der Fahrzeugverzögerung teil. Im Verlauf der Vorverlagerung nehmen auch die Rückhaltekräfte durch die Komprimierung des Airbags weiter zu. Durch das Umschalten auf das niedrige Kraftbegrenzungsniveau gelingt es aber, die Belastungen einigermaßen konstant zu halten. Die resultierenden niedrigeren Belastungen sind das Ergebnis eines annähernd idealen rechteckigen Verlaufes der Brusteingdrückung auf minimalem Niveau.

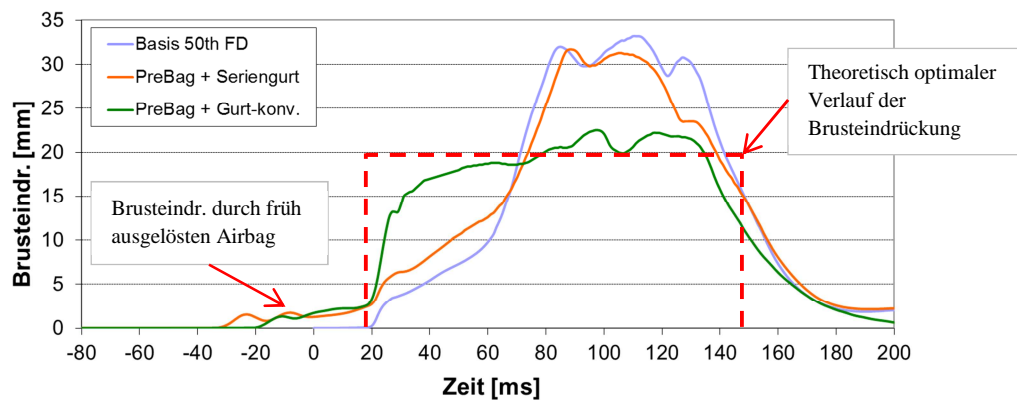


Abbildung 86: Vergleich der Verläufe der Brusteingdrückung mit idealisiertem Rechteckverlauf

Aufgrund der verbesserten Beckenrückhaltung können auch die Belastungen der unteren Extremitäten im Vergleich zum Referenzfahrzeug verbessert werden. In diesem Zusammenhang muss aber auch noch in Erinnerung gerufen werden, dass auch ein verstärkter Sitz mit geringerer Vorverlagerung zu Einsatz kommt, was Einfluss auf die Belastungen von Ober-, Unterschenkel und Knie hat.

6.4.1.2 Airbagauslösung bei $t_0=80ms$, frühe Gurtstraffung bei $t_0=17ms$

In Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass sehr frühe Auslösezeiten des Straffers (wie jene des Airbags) für den Sicherheitsgurt nur dann zu Verbesserungen führen können, wenn einerseits hinter dem Insassen genug Platz für eine etwaige Vorbeschleunigung vorhanden ist beziehungsweise die Gurtgeometrie an diese Anforderungen angepasst wird. Diese beiden Randbedingungen wurden jedoch in dieser Untersuchung nicht weiter verändert, um bei der Potentialabschätzung eine Vergleichbarkeit mit dem Referenzfahrzeug zu erhalten.

Mit dieser zweiten Variante der Gurtstraffung sollte untersucht werden, ob durch eine länger anhaltende Straffung mit geringerer Straffkraft (1,5 Kilonewton), also eine weniger aggressive Straffung des Gurtbandes dieselben oder sogar noch niedrigere Belastungswerte erreicht werden können wie mit einer Straffung zu konventionellen Straffzeitpunkten. In Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass eine frühzeitige Straffung des Gurtes zu einer höheren Belastung der unteren Extremitäten führen kann. Da dieses Ergebnis jedoch aufgrund einer vielleicht nicht ausreichenden Validierung der Rückenlehne im Simulationsmodell noch einige Fragestellungen offen ließ, wurde eine Abstimmung in dieser Konfiguration gesucht. Die Ergebnisse sollten dann anhand von

Schlittenversuchen bestätigt oder widerlegt werden. Als Simulationsergebnisse sind in Abbildung 87 exemplarisch die wichtigsten Verletzungskriterien dargestellt.

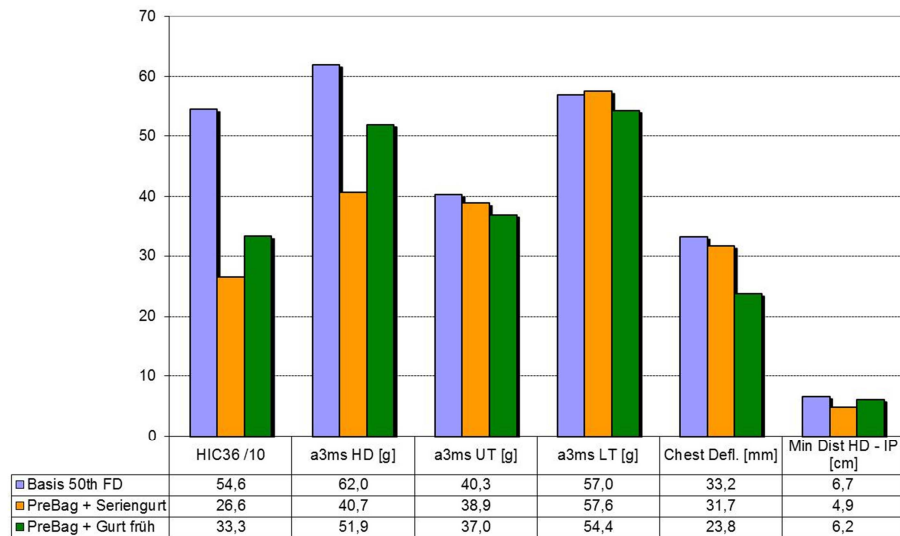


Abbildung 87: Simulationsergebnisse Auslegung HIII 50%, EuroNCAP, Airbagauslösung t_0 -80ms, Straffung des Gurtes t_0 -17ms mit 1,5kN

Im Vergleich zur Untersuchung mit dem früh ausgelösten Airbag in Kombination mit dem Seriengurtsystem und auch zu der im vorherigen Kapitel beschriebenen Straffstrategie kommt es zu einer Verschlechterung der Kopfbelastung. Ähnlich verhält es sich auch bei den Nackenkräften beziehungsweise beim Nackenmoment. Diese Verschlechterung ist darauf zurückzuführen, dass sich der Insasse aufgrund der höheren Straffenergie in einer anderen Position relativ zum Luftsack befindet, auf welche die verwendete Airbagform nicht angepasst wurde. Der Ankoppelzeitpunkt und auch die Vorneigung des Kopfes unterscheiden sich aufgrund der Straffung, wodurch es zu diesen Unterschieden kommt. In der folgenden Abbildung ist der Anstieg der Kopfbeschleunigung schon vor t_0 als Folge der Straffung des Gurtes deutlich zu erkennen. Aufgrund der früheren Rückhaltung des Insassen mit dem Gurt und der daraus resultierenden späteren Vorverlagerung steigt der Innendruck im Airbag erst später an. Dies zeigt sich auch im Vergleich zur Basis um rund 15 Millisekunden verzögerten Anstieg der Kopfbeschleunigungen.

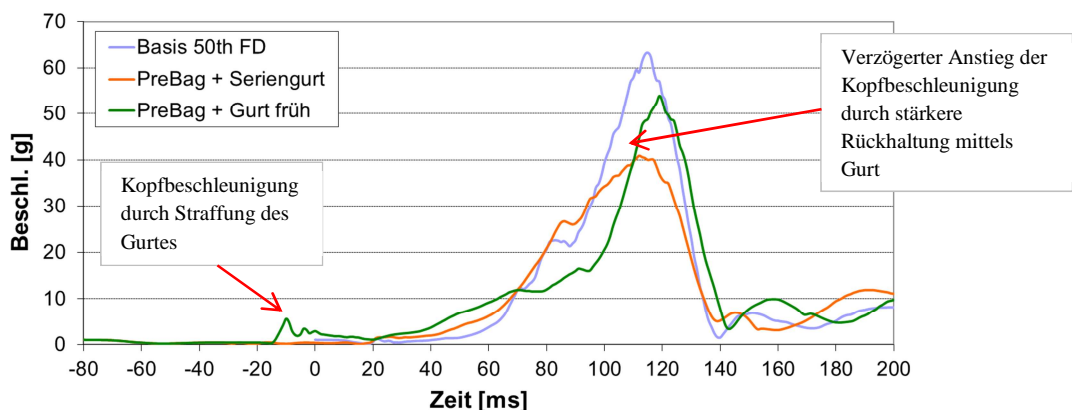


Abbildung 88: Vergleich der Verläufe der Kopfbeschleunigung

Dieser Effekt tritt offenbar bei der frühen Auslösung mit der daraus resultierenden länger anhaltenden Straffwirkung stärker auf. Um auch bei dieser Straffvariante die geringeren Belastungswerte erreichen zu können, müsste die Airbagform unter Umständen geringfügig adaptiert werden. Im Vergleich zur Straffung zum konventionellen Auslösezeitpunkt kommt es in diesem Fall auch zu einer geringfügigen Erhöhung der Belastung der unteren Extremitäten. Aufgrund des geringeren

Kraftniveaus wirkt sich der frühere Beginn der Straffung aber nicht so stark aus, die Unterschenkelbelastungen liegen um etwa zehn Prozent höher.

6.4.2 HIII 5% - USNCAP

Im Fall der 5%-Frau addierten sich die Verbesserungen aufgrund des früh ausgelösten Airbags und des adaptierten, früher ausgelösten Gurtsystems in idealer Weise. In diesem Fall ergab sich in der numerischen Auslegung eine Straffung mit drei Kilonewton und einem Beginn 12 Millisekunden vor t_0 als vielversprechendste Variante. In Abbildung 89 sind wiederum exemplarisch die wichtigsten Verletzungskriterien dargestellt.

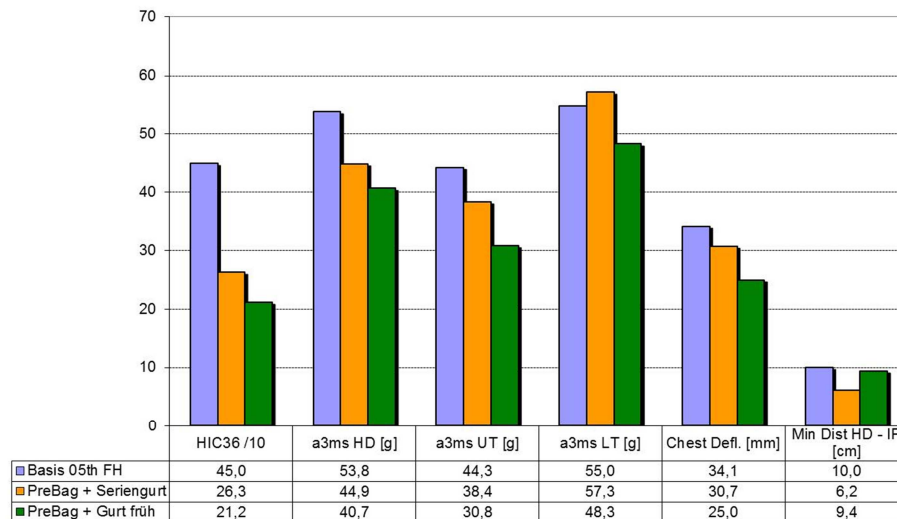


Abbildung 89: Simulationsergebnisse Auslegung HIII 5%, US-NCAP, Airbagauslösung t_0-80 ms, Straffung des Gurtes t_0-12 ms mit 3kN

Die Nackenbelastungen wurden gegenüber dem Referenzfahrzeug um etwa 30% reduziert, was in erster Linie auf die geänderte Airbagform zurückzuführen ist. Die Reduktion der Brusteingdrückung um fast 10 Millimeter kommt durch eine deutliche Vergrößerung des Anteils des Airbags an der Rückhaltung des Thorax infolge des geringeren Gurtkraftbegrenzungsniveaus zustande. Wie in der folgenden Abbildung dargestellt, können somit die beiden kritischen Verletzungskriterien für das US-NCAP-Rating wesentlich reduziert werden, was sich in etwa in einer Halbierung des „P-Joint“-Wertes, dem Risiko eine AIS3+ Verletzung zu erleiden, auswirkt.

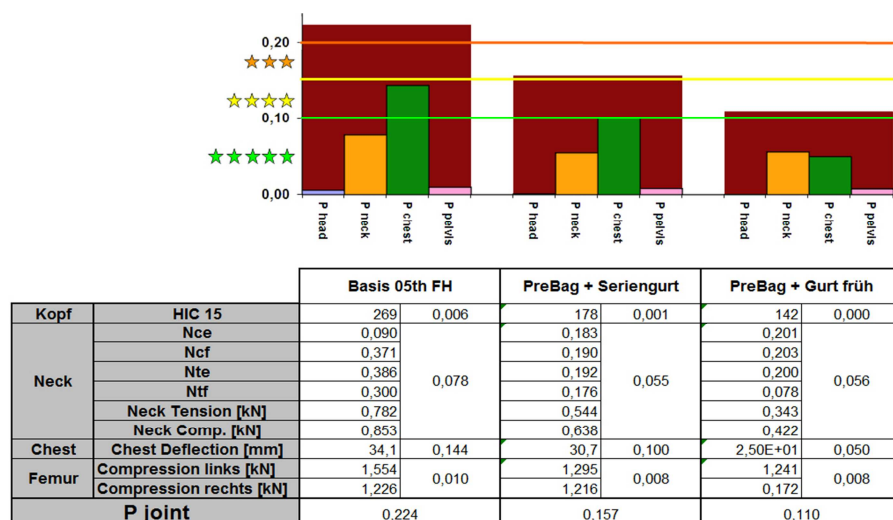


Abbildung 90: Vergleich des US-NCAP-Ratings für die 3 unterschiedlichen Varianten

6.4.3 Versuchsergebnisse Frühauslösung – Vergleich Simulation

Zur Absicherung der Simulationsergebnisse wurde eine Reihe von Schlittenversuchen durchgeführt. Der Hauptfokus dieser Untersuchung war wiederum die frühe Auslösung der Rückhaltesysteme, wobei dabei auch insbesondere die Kinematik der unteren Extremitäten bei einer frühen Straffung des Beckengurtes von großem Interesse war. Anhand der Versuchsdaten sollte das Simulationsmodell hinsichtlich der Prognosefähigkeit dieser Belastungen kontrolliert und gegebenenfalls verbessert werden. Gegenüber den ersten Versuchen war bei dieser Versuchsserie auch ein kleinerer Airbag für die 5%-Frau mit den innenliegenden Fangbändern verfügbar.

Versuchskonfiguration			Airbag					Schultergurt		Beckengurt		
Versuch	Dummy	Puls	ZZP-APG1	ZZP-ADPS-2T-SSO	Basis-Vent- ϕ	Aktive-Vent- ϕ	ZZP-AV	Straff-ZP	KB-Switch	Straff-ZP	Straff-Niveau	KB-Niveau
10-ST12	HIII 50%	EuroNCAP	$t_0-80\text{ms}$	$t_0+10\text{ms}$	40mm	75mm	$t_0+105\text{ms}$	$t_0+17\text{ms}$	$t_0+90\text{ms}$	$t_0+22\text{ms}$	3kN	6kN
10-ST13	HIII 50%	EuroNCAP	$t_0-80\text{ms}$	$t_0+10\text{ms}$	40mm	75mm	$t_0+105\text{ms}$	$t_0+17\text{ms}$	$t_0+90\text{ms}$	$t_0+22\text{ms}$	3kN	6kN
10-ST14	HIII 50%	EuroNCAP	$t_0-80\text{ms}$	$t_0+10\text{ms}$	40mm	75mm	$t_0+110\text{ms}$	$t_0-17\text{ms}$	$t_0+90\text{ms}$	$t_0-12\text{ms}$	1,5kN	6kN
10-ST15	HIII 50%	EuroNCAP	$t_0-80\text{ms}$	$t_0+10\text{ms}$	40mm	75mm	$t_0+110\text{ms}$	$t_0-17\text{ms}$	$t_0+90\text{ms}$	$t_0-12\text{ms}$	1,5kN	6kN
10-ST16	HIII 5%	USNCAP	$t_0-80\text{ms}$	n.a.	40mm	75mm	$t_0+25\text{ms}$	$t_0-12\text{ms}$	$t_0+60\text{ms}$	$t_0-7\text{ms}$	3kN	6kN
10-ST17	HIII 5%	USNCAP	$t_0-80\text{ms}$	n.a.	40mm	75mm	$t_0+25\text{ms}$	$t_0-12\text{ms}$	$t_0+60\text{ms}$	$t_0-7\text{ms}$	3kN	6kN

Abbildung 91: Versuchsliste Schlittenversuche KW45 2010

Mit in Summe sechs Schlittenversuchen können nur die wichtigsten Kombinationen aus Dummy und Crashpuls getestet werden. Nach erfolgreichem Abgleich der Versuchs- und Simulationsergebnisse, werden die restlichen Konfigurationen, die im Kapitel 3.2 beschrieben wurden, numerisch nachgewiesen.

In der in Abbildung 91 dargestellten Versuchsliste ist ersichtlich, dass für insgesamt drei Versuchskonfigurationen jeweils zwei Tests durchgeführt wurden. Die drei Konfigurationen waren einerseits der 50%-Mann im EuroNCAP-Lastfall mit zwei unterschiedlichen Gurtstraff-Varianten und andererseits die 5%-Frau im US-NCAP-Lastfall.

Die Wiederholversuche waren dabei wiederum für etwaige Parameteränderungen nach dem ersten Versuch beziehungsweise zur Darstellung der Versuchsstreuung vorgesehen.

Zur Bewertung der Aussagekraft des Simulationsmodells wird für jede Versuchskonfiguration ein detaillierter Vergleich der zeitlichen Verläufe der einzelnen Verletzungskriterien durchgeführt. Dafür werden die Versuche mit den tatsächlichen Aktivierungszeiten der verschiedenen Aggregate und mit dem mitgemessenen Beschleunigungsverlauf nachgerechnet.

6.4.3.1 Probleme bei Versuchen

Bei den Versuchen kam zu einigen Problemen mit mehr oder weniger starkem Einfluss auf die Ergebnisse. Das schwerwiegendste Problem stellte dabei wiederum die instabile Positionierung des Airbags vor dem Insassen dar. Aufgrund der langsamen Befüllung des Luftsackes fehlt dem Gewebe nach dem Austritt aus der Instrumententafel Dynamik um den Spalt zwischen dem Handschuhkasten und den Knien zu überwinden. Der Luftsack fällt auf die Knie des Dummies und bleibt daran hängen. Im Verlauf der weiteren Füllung kann sich der Luftsack nicht mehr losreißen und es kommt zu einem erheblichen Unterschied zwischen der Airbagform beziehungsweise der Positionierung im Versuch und in der Simulation. In der folgenden Abbildung ist die unerwünschte Positionierung des Airbags eindeutig erkennbar.

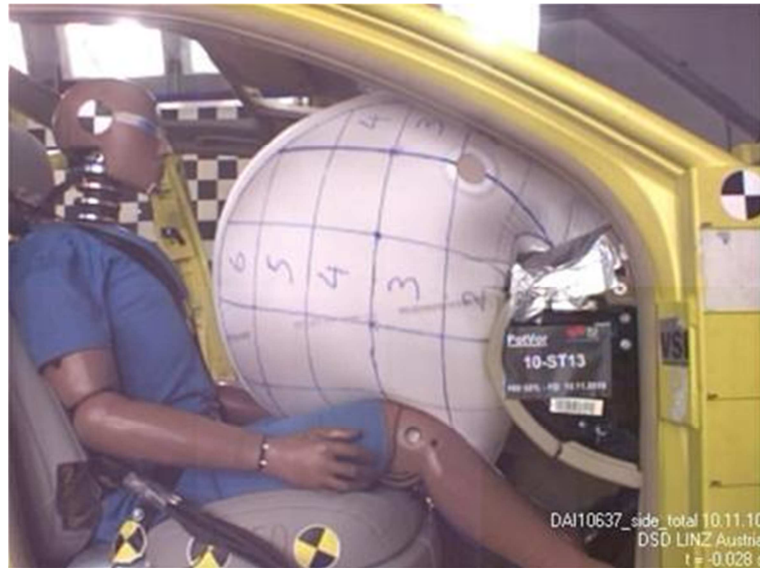


Abbildung 92: Probleme bei der Positionierung des Airbags vor dem Insassen

Dieses Problem trat auch schon in den vorhergegangenen Versuchsreihen auf. Um diesen Effekt zu unterdrücken, wurden die Öffnung der Airbagklappe vergrößert und auch verschiedene Faltungsvarianten getestet. Die in der COP-Versuchsvorrichtung erzielten deutlichen Verbesserungen (vgl. Abbildung 83) zeigten sich allerdings in der Fahrzeugumgebung nicht.

Bei drei der vier Versuche mit dem 50%-Dummy trat dieser Effekt auf, was im Vergleich zur Auslegung bei der Ankopplung des Insassen an den Airbag und dem Kontakt zwischen Knie und Handschuhfach zu Abweichungen führt. Bei der 5%-Frau tritt dieser Effekt in deutlich verringerter Form auf, da aufgrund der Sitzposition dieses Dummies weiter vorne und oben der Spalt viel schmaler ist. Ein Grund für die Abweichungen bei der Positionierung des Airbags in der Versuchskarosse und der COP-Vorrichtung ist möglicherweise in der unterschiedlichen Reibung zwischen Airbag und Instrumententafel beziehungsweise Windschutzscheibe zu suchen. Darüber hinaus könnte auch eine unter Umständen nicht exakte Nachbildung der geometrischen Verhältnisse des Fahrzeuginnenraums in der COP-Versuchsumgebung zu der unterschiedlichen Bewegung des Luftsackes nach dem Austritt aus der Airbagklappe führen. Probleme wie diese können aufgrund der starken Vereinfachungen beim Befüllungsverhalten des Airbags in der Simulation (Uniform Pressure Methode) nicht vorhergesagt werden. Für solche Fragestellungen wäre eine wesentlich komplexere Abbildung der Gasdynamik im Luftsack notwendig, was aber aufgrund der damit verbundenen langen Rechendauer für dieses Projekt nicht praktikabel gewesen wäre.

Im Vergleich zur Auslegung ergaben sich bei den Versuchen teilweise leichte Abweichungen hinsichtlich der effektiven Öffnungszeitpunkte des aktiven Vents von wenigen Millisekunden. Dies führt dazu, dass der Airbag im Vergleich zur der Auslegung entweder etwas zu hart oder zu weich ist. Aufgrund der Bauform dieses Vents muss eine gewisse Zeitspanne vor dem gewünschten Öffnungszeitpunkt vorgehalten werden, die aber vom Innendruck im Airbag abhängig ist und daher vor dem Versuch nicht zu 100 Prozent bekannt ist. Dieser Zeitraum kann aber aus alten Versuchen abgeschätzt werden, beziehungsweise im Wiederholversuch kann dieser Wert angepasst und der Öffnungszeitpunkt damit ausreichend genau eingestellt werden.

Eine ähnliche Problematik ergibt sich auch im Gurtsystem bei der Abstimmung der Kraftniveaus von Straffung und Kraftbegrenzung. Der Luft- beziehungsweise Hydraulikdruck am Aggregat kann sehr präzise eingestellt werden. Bis zur Stelle am Gurtband, wo die Kraft gemessen wird, muss das Gurtband aber umgelenkt werden beziehungsweise es treten Reibungsverluste auf, die nicht exakt abschätzbar sind. Aus Vorversuchen sind Anhaltswerte bekannt, die gewünschten Kraftniveaus können aber erst im Wiederholversuch richtig eingestellt werden.

Die beidseitige Straffung am Beckengurt bereitet Schwierigkeiten, den Gurtkraftsensor richtig anzubringen. Für korrekte Messergebnisse sollte der Sensor an einem frei laufenden Stück des Gurtbandes angebracht werden, ohne dass er am Sitz anliegt. Üblicherweise wird dieser Sensor im Bereich zwischen dem Gurtschloss beziehungsweise dem Gurtendbeschlag und dem Dummy am Gurtband angebracht. Bei der beidseitigen Straffung ist aber weder rechts noch links Platz um diesen Sensor zu montieren. Um dennoch Messwerte über die Beckengurtkraft zu erhalten, wurde dieser Sensor im Bereich der Midsagittalebene des Dummies platziert. Um die Verfälschung des Messergebnisses durch den Kontakt des Sensors mit dem Dummy zu minimieren, wurde der Sensor so angebracht, dass die Schrauben am Dummy anstehen.

Zuletzt kam es bei den beiden Versuchen mit der 5%-Frau zu einem Umschlagen des Gurtbandes im Gurtschloss, wie in der folgenden Abbildung erkannt werden kann. Ein möglicher Grund dafür ist, dass sich das Gurtschloss aufgrund der Straffung an allen drei Gurthanbindungspunkten in einer anderen Position befand als bei dem Seriengurtsystem. Die damit verbundenen unterschiedlichen Umlenkwinkel des Gurtbandes im Schloss könnten die Ursache für diesen Effekt sein.



Abbildung 93: Umschlagen des Gurtbandes im Gurtschloss bei den Versuchen mit der 5%-Frau

Dieses Problem kann aber den Versuchsdaten gut zugeordnet werden. Sein Einfluss auf die Versuchsergebnisse erscheint relativ gering zu sein.

Verschiedene Probleme, die bei den Schlittenversuchen aufgetreten sind, führen in Summe dazu, dass die Ergebnisse aus der Auslegung nicht ganz erreicht werden können. Das Hauptziel der Schlittenversuche war es allerdings, die Aussagekraft des Simulationsmodells zu untersuchen beziehungsweise zu bestätigen. Damit spielen beispielsweise die erwähnten Abweichungen beim Öffnungsverhalten des aktiven Vents nur eine untergeordnete Rolle, da diese aus den Highspeed-Videos exakt bekannt sind und somit das Simulationsmodell gut validiert werden kann. Das Verhängen und in weiterer Folge die schlechte Positionierung des Luftsackes vor dem Insassen kann allerdings in der Simulation nicht abgebildet werden, weswegen hier größere Abweichungen zu erwarten sind. Bei den folgenden Vergleichen zwischen den Versuchs- und Simulationsergebnissen wird jeweils versucht, die möglichen Ursachen für etwaige Unterschiede zu identifizieren.

6.4.3.2 Ergebnisse 50%-Mann, EuroNCAP, konventioneller Straffzeitpunkt

Es wurden in Summe vier Versuche mit dem 50%-Dummy unter der Belastung durch einen EuroNCAP-Crashpuls durchgeführt. Bei den ersten beiden Versuchen wurde dabei jene Variante der Gurtstraffung untersucht, welche in der numerischen Auslegung absolut gesehen zu den geringsten Insassenbelastungen führte. Der Sicherheitsgurt wurde dafür zum konventionellen Zeitpunkt im Aufroller mit dem pyrotechnischen Aggregat und am Beckengurt mit einer konstant anliegenden Kraft von drei Kilonewton gestrafft.

In diesem Kapitel werden die Versuchsergebnisse anhand des Wiederholversuchs (10-ST13) in dieser Konfiguration diskutiert. Wie beschrieben, kam es aufgrund der fehlenden Dynamik des Airbags im Laufe dieser Versuchsreihe immer wieder zu einer fehlerhaften Positionierung des Airbags vor dem

Insassen, so auch in diesem Test. Somit ergibt sich im Vergleich Simulation zu Versuch eine deutlich unterschiedliche Ankopplung des Insassen an den Airbag, was in weiterer Folge auch zu Abweichungen einzelner Verletzungskriterien führt. In der folgenden Abbildung ist der Unterschied bei Positionierung des Airbags zwischen Simulation und Versuch ersichtlich.



Abbildung 94: Vergleich der Positionierung des Airbags bei Simulation und Versuch (10-ST13)

In Abbildung 95 sind die Verläufe der Kopf- und Brustbeschleunigung dieses Versuches im Vergleich zur Referenz und zum Ergebnis der Simulation dargestellt. Der frühere Anstieg der Kopfbeschleunigung im Vergleich zur Referenz ergibt sich dabei in erster Linie aus der größeren Airbagform und dem damit verbundenen geringeren Abstand zwischen Kopf und Luftsack vor der Vorverlagerung des Insassen. Der verfügbare Verzögerungsweg wird besser ausgenutzt. Es zeigt sich auch eine gute Übereinstimmung der Simulation mit den Versuchsergebnissen. Im Verlauf der Brustbeschleunigung aus dem Schlittenversuch kommt es ab etwa 100 Millisekunden nach t_0 zu einer deutlichen Erhöhung gegenüber der Simulation. In einer Analyse der Highspeed-Videos zeigt sich, dass genau zu diesem Zeitpunkt die Hände des Dummys an der Instrumententafel anstoßen und etwas hängen bleiben. Im Versuch rutschen die Hände dabei entlang des Handschuhkastens ab und verhaken sich leicht. Im Vergleich dazu pendeln die Arme im Simulationsmodell gegen die Instrumententafel ohne an dieser wesentlich abzurutschen. Dadurch entstehen keine Kräfte, die sich zum Torso des Dummys übertragen und somit zur Brustbeschleunigung beitragen. Die Abweichung der Bewegung der Arme ist unter Umständen auf eine nicht einwandfreie „1g-Einstellung“ (Gelenke der Extremitäten des Dummys werden so vorgespannt, dass sie sich unter der Schwerkraft gerade nicht verdrehen) der Schulter- oder Ellbogengelenke zurückzuführen. Dieser im Simulationsmodell nicht abgebildete Effekt scheint die Ursache für diese Abweichungen zu sein.

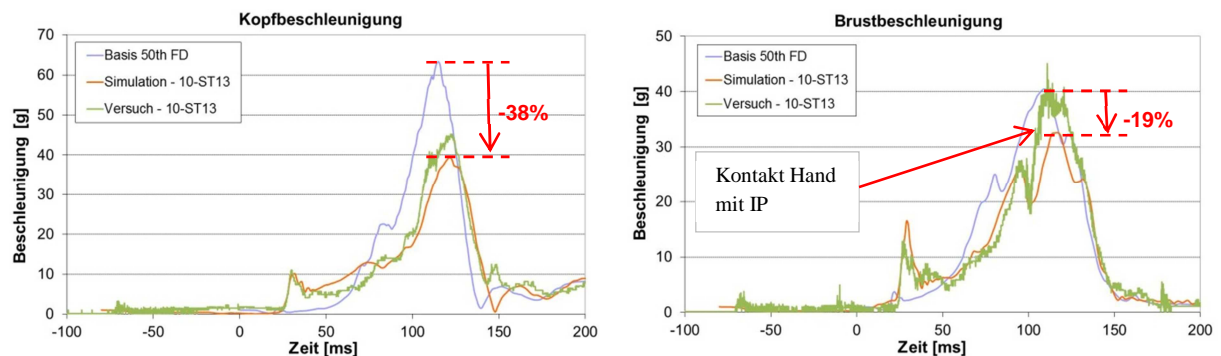


Abbildung 95: Verläufe der Kopf- und Brustbeschleunigung beim 50%-Mann, EuroNCAP - konv. Straffzeitpunkt

Die stärkere Straffung an beiden Seiten des Beckengurtes in Verbindung mit der Kraftbegrenzung auf sechs Kilonewton führt zu der Reduktion der Beckenbeschleunigung um etwa 10g, wie in Abbildung 96 ersichtlich ist. Im Verlauf der Brusteingdrückung ergibt sich eine deutliche Abweichung im

Anstiegsverhalten zwischen der Simulation und dem Realversuch, welche aber mit der schlechten Positionierung des Airbags im Versuch erklärt werden kann. Durch das Verhängen des Luftsackes tritt dieser erst ab etwa 80 Millisekunden nach t_0 mit dem Thorax des Insassen in Kontakt und trägt zur Rückhaltung des Oberkörpers bei. Im Vergleich dazu liegt der Luftsack bei richtiger Positionierung und auch im Simulationsmodell bereits vor t_0 an und spannt den Insassen leicht im Sitz vor. Das maximale Niveau der Brusteindrücke stimmt in der Simulation in etwa mit dem Versuch überein und liegt wesentlich tiefer als jenes der Referenz mit den Serien-Rückhaltesystemen.

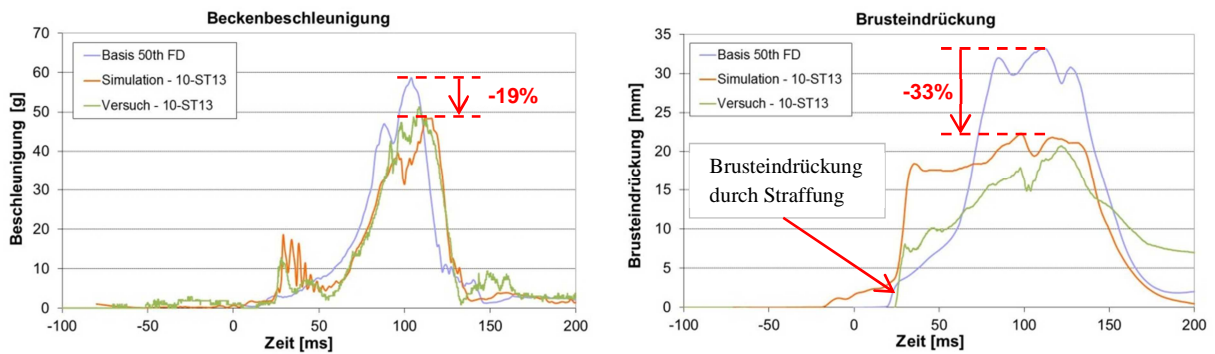


Abbildung 96: Verläufe von Beckenbeschleunigung und Brusteindrücke beim 50%-Mann, EuroNCAP - konv. Straffzeitpunkt

In der folgenden Abbildung sind die zeitlichen Verläufe der Kräfte in Schulter- beziehungsweise Beckengurt dargestellt. Gegenüber der Referenz ist die deutlich stärkere Straffung der Gurte leicht ersichtlich. Des Weiteren kann im Verlauf der Schultergurtkraft das mechanische Verhalten des Gurtkraftbegrenzers im Aufroller nachvollzogen werden. Bis circa 100 Millisekunden nach t_0 liegt das Begrenzungsniveau auf etwa vier Kilonewton. Unmittelbar nach der Aktivierung des Umschaltmechanismus reduziert sich das Kraftniveau im Gurtband auf etwa zwei Kilonewton. Die Kraft im Beckengurt wird auf etwa sechs Kilonewton begrenzt. Nach dem Umschaltvorgang auf das niedrigere Kraftniveau im Schultergurt kann aber das Gurtband im Schloss durchrutschen, wodurch auch im Beckengurt das Kraftniveau einbricht. Auch im Hinblick auf die Abbildung des mechanischen Verhaltens der einzelnen Komponenten des Gurtsystems zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch.

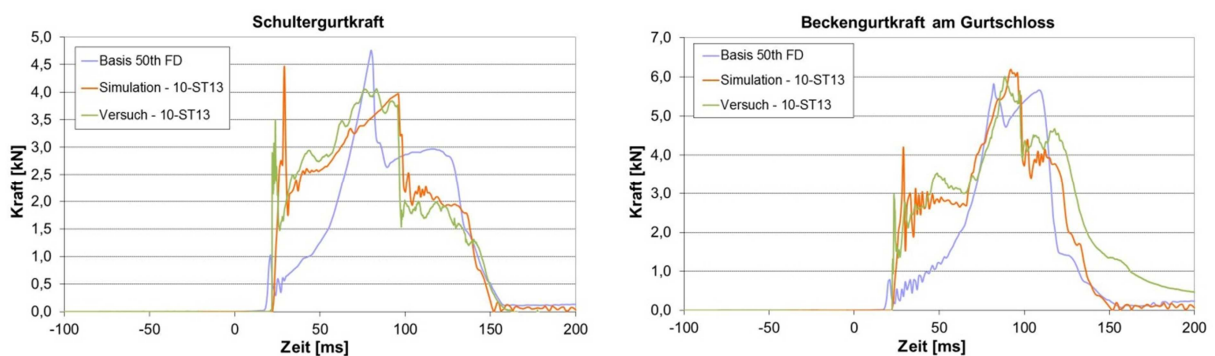


Abbildung 97: Verläufe der Gurtkräfte beim 50%-Mann, EuroNCAP - konv. Straffzeitpunkt

Im Verlauf der Oberschenkelkraft (siehe Abbildung 98) tritt wieder ein Effekt auf, der unmittelbar mit der Positionierung des Airbags in Verbindung gebracht werden kann: Zwischen 50 Millisekunden vor und etwa 70 Millisekunden nach t_0 wirkt auf die Oberschenkel eine Druckkraft von bis zu knapp einem Kilonewton. Der Luftsack, der nach dem Austritt aus der Instrumententafel in den Spalt zwischen Handschuhfach und Knie des Dummys fällt, wird weiter aufgeblasen und drückt dadurch auf die Knie des Dummys. Der Airbag hat in dieser Position auch eine ähnliche Wirkung wie ein Knie-Airbag, weil er den Anprall der Knie am Handschuhfach (ca. 95 Millisekunden nach t_0) deutlich abdämpft.

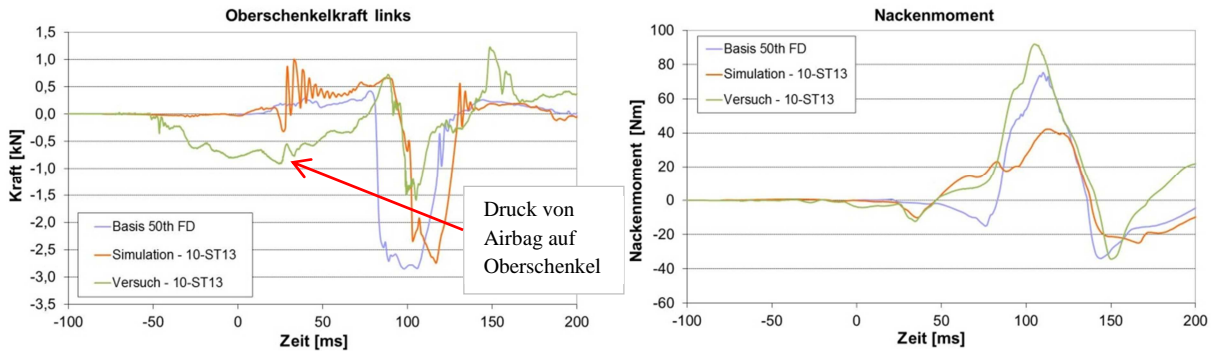


Abbildung 98: Verläufe der Oberschenkelkraft links und des Nacknenmoments beim 50%-Mann, EuroNCAP - konv. Straffzeitpunkt

Durch den größeren Abstand zwischen Kopf und Airbag infolge der falschen Positionierung rotiert der Kopf stärker um die Querachse bevor er Kontakt zum Luftsack hat. Somit ergibt sich eine deutlich unterschiedliche Einleitung der Reaktionskräfte vom Airbag auf den Kopf und damit verbunden sind auch größere Unterschiede im Nacknenmoment und der axialen Nacknenkraft.

Betrachtet man nun das Ergebnis der EuroNCAP-Ratings, zeigt sich eine deutliche Annäherung an das Maximum von 16 Punkten. Insbesondere die erhebliche Reduktion der Brusteindrückung trägt zu dieser Verbesserung bei. Die Verringerung der Kopfbelastung durch die geänderte Airbagform führt in etwa zu einer Halbierung des HIC₃₆-Wertes. Dies hat jedoch auf das Rating keinen Einfluss, da auch mit den Serien-Rückhaltesystemen schon die volle Punktezahl für die Kopfbelastung erreicht wird.

Dateiname		Basis 50th FD	Basis 50th FD - steifer Sitz	Simulation - 10-ST13	Versuch - 10-ST13		
Euro-NCAP Bewertung							
		Werte	Punkte	Werte	Punkte	Werte	Punkte
Kopf / Hals	HIC ₃₆	545,8		487,1		192,7	253
	a _{3ms} Kopf [g]	62		58,4		38,8	44,1
	amax Kopf [g]	63,3	4,00	58,9	4,00	39,4	45,0
	Zugkraft [kN]	0,71		0,68		0,37	0,48
	Scherkraft [kN]	0		0		0	0,77
	Moment [N.m]	33,904		26,8		24,879	34,3
Brust	Brusteindrückung [mm]	33,2	2,4	29,3	2,957	22,3	3,957
	VC [m/s]	n/a		n/a		n/a	
Oberschenkel	Kraft max l. [kN]	2,85		2,79		2,74	-0,06
	Knieverschiebung l. [mm]	0,19	4	0,18	4	0,15	-32
	Kraft max r. [kN]	1,58		1,53		0,95	0,06
	Knieverschiebung r. [mm]	2,02		0,98		2,58	-31
Unterschenkel	Kraft max l. [kN]	4,38		4,17		3,89	3,33
	Tibia Index l.	0,73	2,416	0,61	2,556	0,61	0,61
	Kraft max r. [kN]	2,75		2,50		2,10	1,92
	Tibia Index r.	0,45		0,46		0,39	0,4
Euro-NCAP Score		12,816		13,513		14,7	

Abbildung 99: Ergebnisse EuroNCAP-Rating Frontal beim 50%-Mann - konv. Straffzeitpunkt

Weitere Verbesserung des Rating-Ergebnisses kann nur mehr durch eine Verringerung der Belastungen der Unterschenkel erreicht werden. Dabei kann unter Umständen ein höheres Kraftbegrenzungsniveau im Beckengurt in Verbindung mit einem ausreichend steifen Sitz zielführend sein, da die unteren Extremitäten durch eine stärkere Beckenrückhaltung entlastet werden. Eine derartige Maßnahme könnte sich allerdings negativ auf die Brusteindrückung oder insgesamt auf die Belastungen der 5%-Frau auswirken. Alternativ dazu könnte auch mit einem Knie Airbag die notwendige Verbesserung erzielt werden.

6.4.3.3 Ergebnisse 50%-Mann, EuroNCAP, früher Straffzeitpunkt

In Voruntersuchungen zum Einfluss verschiedener Straffzeitpunkte und Strafniveaus zeigte sich in der Simulation der Effekt, dass sich durch eine frühe Straffung des Gurtes das Potential beim

EuroNCAP-Rating aufgrund einer deutlichen Zunahme der Unterschenkelbelastung wesentlich verringerte. Da aber das Simulationsmodell für dahingehende Aussagen nicht speziell validiert wurde, beschloss man eine derartige Straffstrategie auch in Schlittenversuchen zu testen, um die Simulationsergebnisse zu bestätigen oder gegebenenfalls das Modell überarbeiten zu können.

Es wurden wiederum zwei Versuche mit einer Straffung des Beckengurtes 17 Millisekunden vor t_0 bei einem über die Dauer der Straffung konstanten Kraftniveau von 1500 Newton durchgeführt. Die Ergebnisse und aufgetretenen Probleme werden wiederum anhand des Wiederholversuches diskutiert. Bei diesem Versuch (10-ST15) kam es wieder zu der schlechten Positionierung des Airbags, wie im Kapitel 6.4.3.1 beschrieben.

In Abbildung 100 zeigt sich trotz der unterschiedlichen effektiven Airbaggeometrie eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch. Die maximale Kopfbeschleunigung fällt im Vergleich zur Referenz um etwa 50% geringer aus, der HIC_{36} -Wert kann halbiert werden. Beim Verlauf der Brustbeschleunigung kommt es im Versuch im Vergleich zur Simulation zu einem Anstieg auf einen höheren Maximalwert. Die Ursache dieser Abweichung ist wie auch in der zuvor betrachteten Versuchskonfiguration in dem Kontakt der Hände an der Instrumententafel zu suchen.

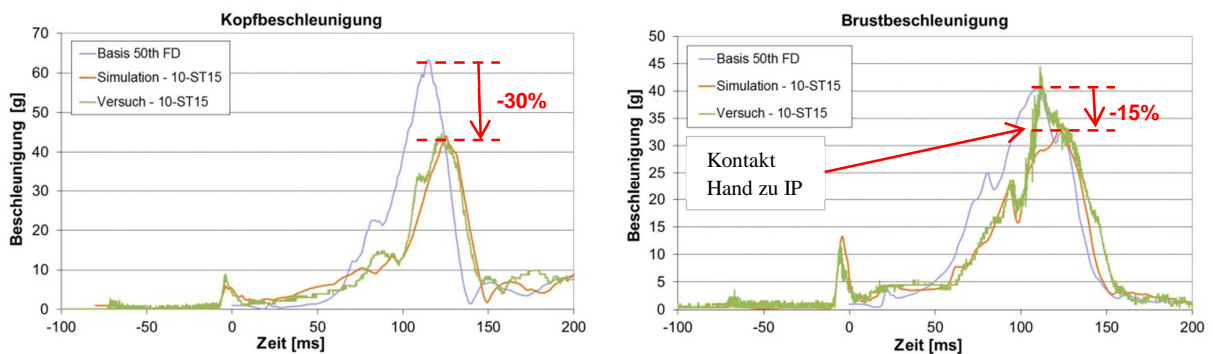


Abbildung 100: Verläufe der Kopf- und Brustbeschleunigung beim 50%-Mann, EuroNCAP - früher Straffzeitpunkt

Im Vergleich zwischen Versuch und Simulation ergeben sich bei der Brusteindrückung deutliche Abweichungen. Die Ursache dafür ist wiederum, dass sich der Airbag im Spalt zwischen Knie und Handschuhfach verhängt und der Insasse somit erst später in den Airbag eintaucht. Durch die Nachgiebigkeit im Beckengurt kann auch die maximale Beckenbeschleunigung reduziert werden, was in der Simulation trotz der unterschiedlichen Positionierung des Luftsackes sehr gut prognostiziert wird. Der vergleichsweise kleine Teil des Airbags, der sich zwischen Knie und Instrumententafel verhängt hat also auf die Beckenbeschleunigungen scheinbar nur sehr geringe Auswirkungen.

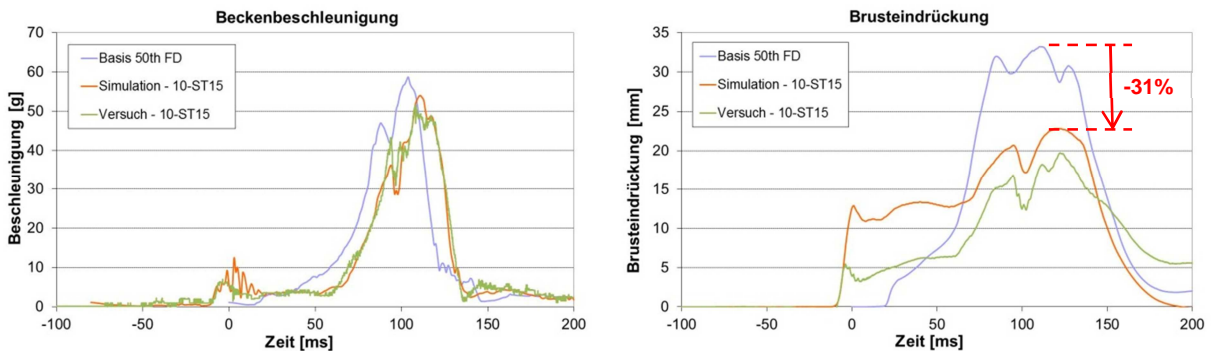


Abbildung 101: Verläufe von Beckenbeschleunigung und Brusteindrückung beim 50%-Mann, EuroNCAP - früher Straffzeitpunkt

Bei den zeitlichen Verläufen der Kräfte in Schulter- und Beckengurt zeigt sich wieder ein deutlicher Unterschied zum Referenzfahrzeug, bei dem lediglich am Gurtschloss gestrafft wird. In der folgenden Abbildung kann des Weiteren erkannt werden, dass das Anstiegsverhalten der Schultergurtkraft

während der Straffung im Versuch minimal langsamer ist als in der Simulation und dass das Durchrutschen des Gurtbandes im Gurtschloss im Versuch offenbar nur in geringerem Maße auftritt. Dadurch erklärt sich, warum die Beckengurtkraft im Versuch ab etwa 100 Millisekunden nach t_0 etwas zu hoch und die Schultergurtkraft zu niedrig ist.

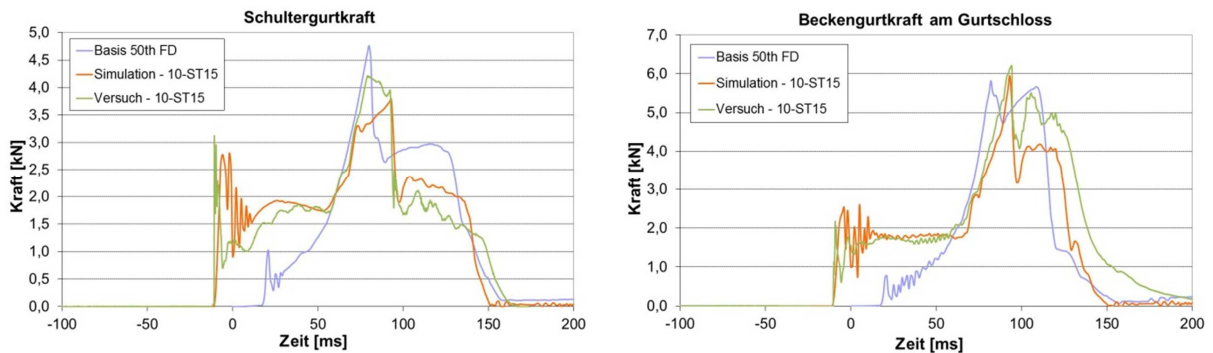


Abbildung 102: Verläufe der Gurtkräfte beim 50%-Mann, EuroNCAP - früher Straffzeitpunkt

Aufgrund der Positionierung des Airbags im Versuch ergeben sich bei den Oberschenkelkräften wiederum recht deutliche Unterschiede. Im Vergleich zu dem, im obigen Abschnitt analysierten Versuch tritt in diesem Fall nur eine etwa halb so starke Druckkraft auf das Knie auf. Die dämpfende Wirkung des Airbags zwischen Knie und Handschuhkasten ist im zeitlichen Bereich des Kniekontaktes kurz vor 100 Millisekunden nach t_0 deutlich erkennbar. Die unterschiedliche Orientierung des Kopfes zum Zeitpunkt des Kontaktes mit dem Airbag führt gegenüber der Simulation auch in diesem Fall wiederum zu größeren Abweichungen der Nackenbelastungen.

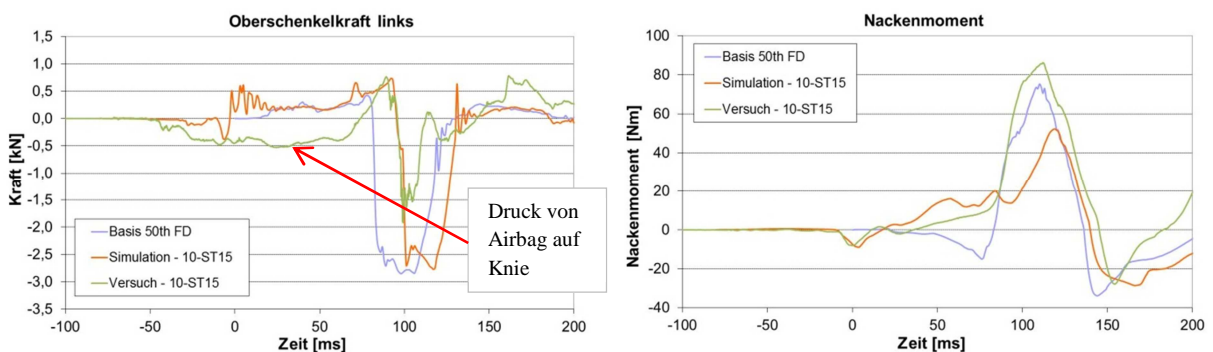


Abbildung 103: Verläufe der Oberschenkelkraft links und des Nackenmoments beim 50%-Mann, EuroNCAP - früher Straffzeitpunkt

Auch mit dieser Variante lassen sich gegenüber der Referenz im EuroNCAP-Rating deutliche Verbesserungen erzielen, insbesondere durch die Reduktion der Brusteingdrückung. Der Fokus dieser Versuchskonfiguration lag jedoch auf den auftretenden Belastungen der Unterschenkel aufgrund der früheren Straffung. Dafür wurden auch mittels der Detail-Kamera im Fußraum der Karosse die Bewegung und der Anprallzeitpunkt der Füße mit den Ergebnissen der Simulation verglichen. Dabei ist zu erkennen, dass das Timing der auftretenden Kräfte und Momente sehr gut übereinstimmen, das Simulationsmodell jedoch tendenziell zu hohe Lasten prognostiziert. Insbesondere für die Druckkräfte im Unterschenkel ergeben sich in der Simulation deutlich zu hohe Werte. Im Versuch zeigt sich, dass im Vergleich zur Referenz eine geringfügige Verringerung der Belastungen in Unterschenkel auftritt. Nichtsdestotrotz ergeben sich gegenüber der Straffung des Gurtes zu konventionellen Zeitpunkten erhöhte axiale Kräfte im Unterschenkel.

Die grundsätzliche Problematik der erhöhten Belastung der Unterschenkel bei einer frühen Straffung bestätigt sich also auch in den Schlittenversuchen, wenngleich die Auswirkungen auch nicht so stark sind, wie in den Simulationsergebnissen vorhergesagt wurde. Die qualitative Aussagekraft der

Simulation hinsichtlich dieses Effektes ist also gegeben, eine Anpassung des Modells im Bereich des Sitzes und im Fußraum durch eine detailliertere Validierung des mechanischen Verhaltens der relevanten Bauteile erscheint allerdings sinnvoll.

Dateiname		Basis 50th FD		Basis 50th FD - steifer Sitz		Simulation - 10-ST15		Versuch - 10-ST15	
Euro-NCAP Bewertung									
		Werte	Punkte	Werte	Punkte	Werte	Punkte	Werte	Punkte
Kopf / Hals	HIC36	545,8	4,00	487,1	4,00	217,6	4,00	245,9	4,00
	a3ms Kopf [g]	62		58,4		42,8		42,9	
	amax Kopf [g]	63,3		58,9		44,2		44,7	
	Zugkraft [kN]	0,71		0,7		0,43		0,41	
	Scherkraft [kN]	0		0,0		0		0	
	Moment [N.m]	33,904		28,8		28,63		27,83	
Brust	Brusteindrückung [mm]	33,2	2,4	29,3	2,957	22,8	3,886	19,72	4
	VC [m/s]	n/a		n/a		n/a		n/a	
Oberschenkel	Kraft max l. [kN]	2,85		2,79		2,78		1,92	
	Knieverschiebung l. [mm]	0,19		0,18		0,18		1,09	
	Kraft max r. [kN]	1,58	4	1,53	4	1,52	4	0,30	4
	Knieverschiebung r. [mm]	2,02		0,98		2,82		0,00	
Unterschenkel	Kraft max l. [kN]	4,38		4,17		4,51		3,96	
	Tibia Index l.	0,73		0,61		0,7		0,7	
	Kraft max r. [kN]	2,75	2,416	2,50	2,556	3,28	2,33	2,21	2,667
	Tibia Index r.	0,45		0,46		0,42		0,37	
Euro-NCAP Score		12,816		13,513		14,216		14,667	

Abbildung 104: Ergebnisse EuroNCAP-Rating Frontal beim 50%-Mann - früher Straffzeitpunkt

Auch durch die frühe Straffung in Kombination mit der Kraftbegrenzung gelingt es, die Brusteindrückung deutlich zu reduzieren und somit die Punktezahl beim EuroNCAP-Rating zu verbessern. Mit dem früh ausgelösten Airbag können auch in dieser Konfiguration die Belastungen für den Kopf wesentlich reduziert werden. So ist beispielsweise der HIC₃₆-Wert nur etwa halb so hoch wie im Falle des Serienairbags. Auf die Punktezahl beim EuroNCAP-Rating hat dies allerdings keine Auswirkung, da auch mit den Serien-Rückhaltesystemen schon die volle Punktezahl im Bereich des Kopfes erreicht wird.

6.4.3.4 Ergebnisse 5%-Frau, US-NCAP, früher Straffzeitpunkt

Wie beim 50%-Dummy wurden auch für die 5%-Frau verschiedene Strafniveaus und Straffzeitpunkte hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Insassenbelastung untersucht. Die absolut gesehen geringsten Belastungen ergaben sich dabei bei einer Straffung mit Beginn etwa 12 Millisekunden vor t_0 mit einem konstant anliegenden Niveau von drei Kilonewton am Beckengurt. Diese Variante wurde auch in zwei Schlittenversuchen getestet, die Ergebnisse werden wiederum anhand des Wiederholversuches (10-ST17) diskutiert:

Die Positionierung des Airbags bereitete bei den Versuchen mit dem 50%-Dummy große Schwierigkeiten. Aufgrund der Sitzposition der 5%-Frau weiter vorn im Fahrzeug ist der Spalt zwischen den Knien des Dummys und dem Handschuhkasten klein genug, sodass der Airbag nicht mehr hineinfällt und dort hängen bleibt. Bei diesen Versuchen fiel der Luftsack nach dem Austritt aus der Instrumententafel zwar wieder hinunter, jedoch nur auf die Knie des Dummys. Auf diesen blieb der Airbag leicht hängen, was aber nur minimale Auswirkung auf die effektive Kontur des Airbags hatte.

Gegenüber der Simulation fällt der Verlauf der Kopfbeschleunigung etwas höher aus, die Form und das Anstiegsverhalten sind aber vergleichbar. Beim Verlauf der Brustbeschleunigung in Abbildung 105 fällt auf, dass nach der ersten Beschleunigungsspitze etwa 55 Millisekunden nach t_0 der Verlauf im Versuch noch einmal deutlich ansteigt. Zu diesem Zeitpunkt kommt es wie auch schon bei den Versuchen mit dem 50%-Dummy zum Kontakt zwischen dessen Händen und der Instrumententafel. Der wesentlich frühere Zeitpunkt dieses Effektes im Vergleich zu den beiden schon diskutierten

Versuchen liegt einerseits in der Charakteristik des US-NCAP Crashpulses, der deutlich schneller höhere Beschleunigungswerte erreicht und andererseits in der unterschiedlichen Sitzposition des 5%-Frau-Dummys.

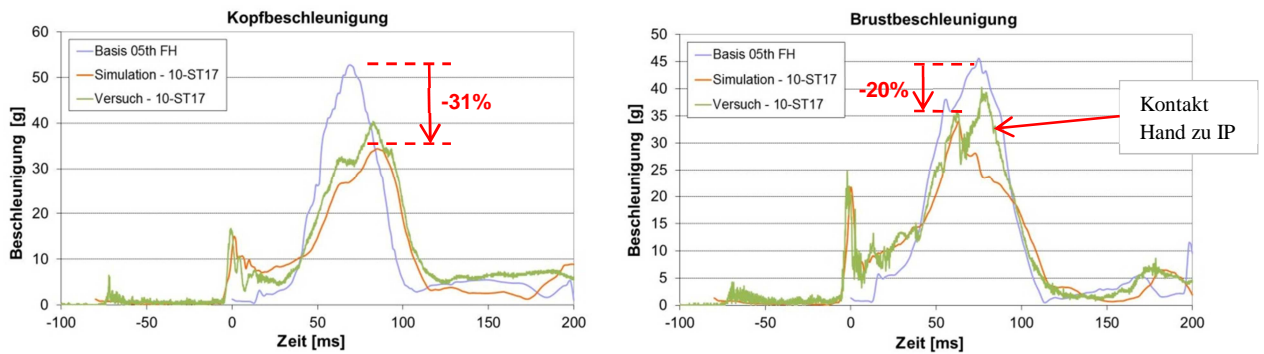


Abbildung 105: Verläufe der Kopf- und Brustbeschleunigung bei der 5%-Frau, US-NCAP - früherer Strafzeitpunkt

Im Verlauf der Brusteingdrückung in Abbildung 106 ergeben sich geringfügige Abweichungen, insgesamt wird das Verhalten des Dummys im Realversuch durch die Simulation jedoch gut abgebildet. Die Brusteingdrückung stellt ja gemeinsam mit den Nackenbelastungen beim US-NCAP-Rating jene Verletzungskriterien dar, wo ausgehend von den Serienrückhaltesystemen am meisten Verbesserungspotential vorliegt. Durch die frühe Straffung des Sicherheitsgurtes kann während der Kraftbegrenzungsphase ein geringeres Niveau eingestellt werden, was sich sehr positiv auf die Brusteingdrückung auswirkt. Darüber hinaus ergeben sich auch wesentliche Verbesserungen aufgrund der Variabilität im Gurtsystem mit dem schaltbaren, zweistufigen Gurtkraftbegrenzer.

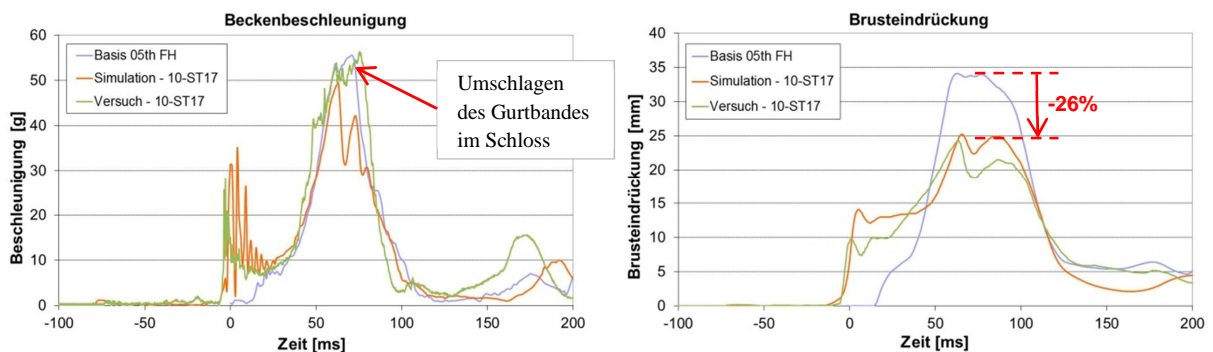
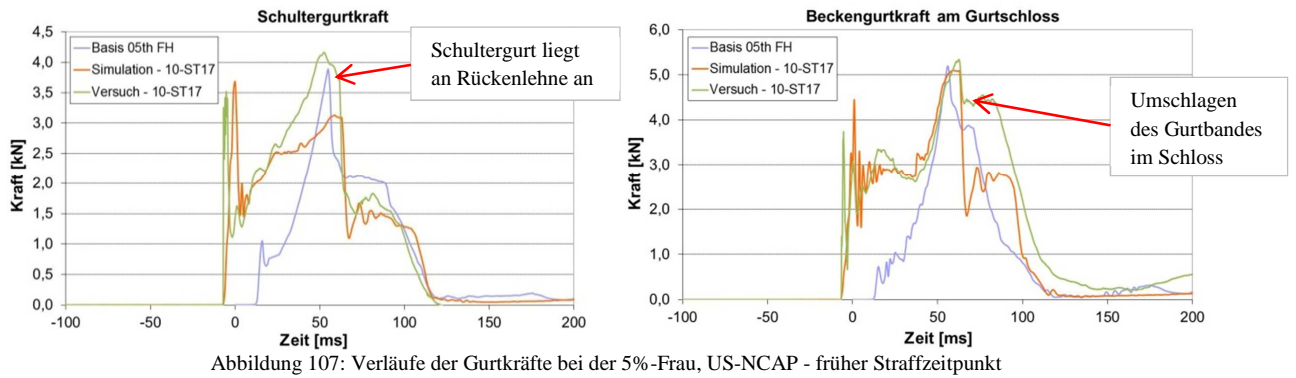


Abbildung 106: Verläufe von Beckenbeschleunigung und Brusteingdrückung bei der 5%-Frau, US-NCAP - früherer Strafzeitpunkt

Im Verlauf der Schultergurtkraft in Abbildung 107 zeigen sich insbesondere im Zeitraum bis zum Umschaltvorgang auf das niedrigere Kraftniveau größere Abweichungen zwischen Realversuch und Simulationsergebnis. Mit demselben Modell wird beim 50%-Dummy eine bessere Übereinstimmung erzielt. Eine mögliche Ursache für die Unterschiede ist, dass das Gurtband im Versuch in der Sitzposition für die 5%-Frau an der Rückenlehne anliegt. Dieser Effekt ist im Simulationsmodell nicht abgebildet.

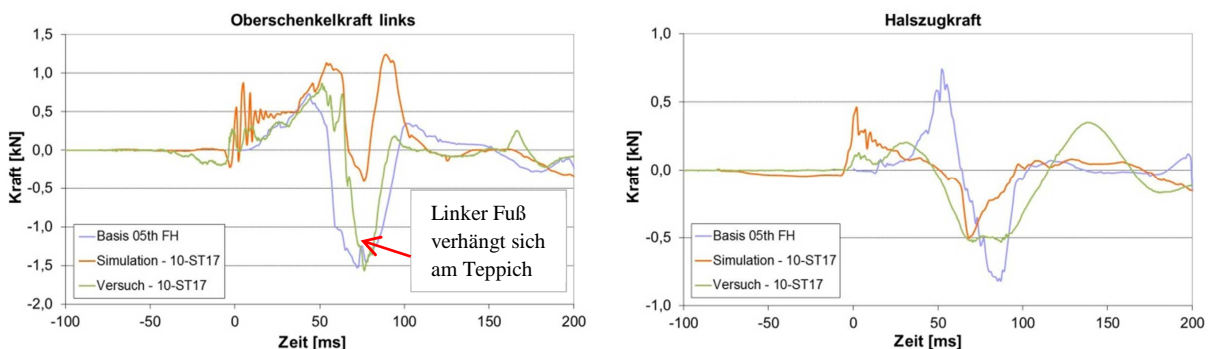
Im Verlauf der Beckengurtkraft kann der im Abschnitt 6.4.3.1 beschriebene Effekt des umgeschlagenen Gurtbandes im Gurtschloss erkannt werden. Es ist anzunehmen, dass das Durchrutschen des Gurtbandes im Gurtschloss durch das Umschlagen des Gurtbandes verhindert oder zumindest erschwert wird, was in weiterer Folge zu den höheren Beckengurtkräften im Gurtschloss und höheren Beschleunigungswerten in Brust und Becken führt. Nach dem Wechsel auf das geringere Kraftniveau im Schultergurt bricht die Kraft im Beckengurt im Realversuch nur wesentlich geringer ein als in der Simulation.



In Abbildung 109 sind noch die Verläufe von Oberschenkelkraft und Nackenkraft in axialer Richtung dargestellt. Dabei wird in der Simulation insbesondere die Härte des Kniekontaktes etwa 60 Millisekunden nach t_0 deutlich zu gering prognostiziert. Eine mögliche Ursache dafür liegt in dem Hocrutschen der Füße am Prallblech im Fußraum. Im Video der Fußraumkamera ist deutlich zu erkennen, dass der linke Fuß beim Kontakt am Prallblech hängen bleibt. Dies führt dazu, dass das Knie beim Kontakt mit dem Handschuhkasten weniger leicht „ausweichen“ kann, wodurch in weiterer Folge zu hohe Oberschenkelkräfte auftreten. In der folgenden Abbildung kann dieser Effekt nachvollzogen werden.



Auch beim Verlauf der Nackenkräfte zeigen sich Abweichungen, tendenziell ist aber auch bei diesen beiden Verletzungskriterien eine gute Übereinstimmung mit der Simulation gegeben.



Insbesondere die deutliche Reduktion der Brusteingdrückung führt bei der Bewertung des US-NCAP-Ratings zu einer deutlichen Verbesserung. Auch die Nackenbelastung als zweite kritische Belastung mit den Serienrückhaltesystemen kann insbesondere durch den früh ausgelösten Airbag um etwa 25% reduziert werden.

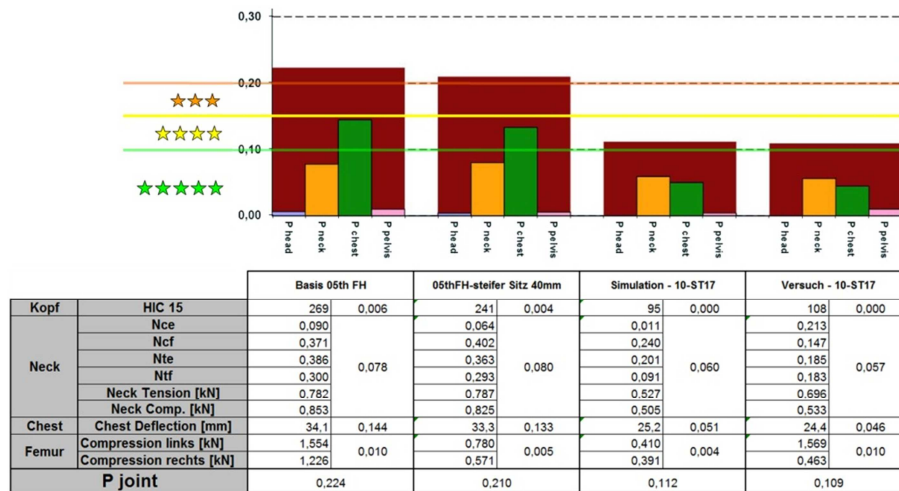


Abbildung 110: Ergebnisse US-NCAP-Rating Frontal bei der 5%-Frau - früher Straffzeitpunkt

Mit den neu abgestimmten Rückhaltesystemen können also auch in dieser Fahrzeugumgebung fast fünf Sterne im neuen US-NCAP-Rating erreicht werden. Der Weg dahin führt über eine weitere Reduktion der Nackenbelastung und Brusteingdrückung.

Es kann also zusammengefasst werden, dass die Simulation für die Lastfälle der Frühauslösung eine sehr gute Aussagekraft hat. Somit ist davon auszugehen, dass auch die Insassenbelastungen bei jenen, die nicht mit Schlittenversuchen bestätigt wurden, gut prognostiziert werden.

6.5 Leistung der Rückhaltesysteme bei konventionellen Auslöse-Zeitpunkten

In den bisherigen Abschnitten konnten im Falle einer frühzeitigen Auslösung des Airbags beziehungsweise einer länger anhaltenden Straffung des Gurtes teilweise erhebliche Reduktionen der Insassenbelastungen in unterschiedlichen Unfallszenarien erzielt werden. Durch die sanftere Befüllung zeigte sich auch in Untersuchungen zu OoP-Situationen eine Verringerung der Aggressivität des Airbags und damit des Verletzungsrisikos. Somit konnte nachgewiesen werden, dass unter diesen Randbedingungen deutliche Verbesserungen im Hinblick auf den Insassenschutz erreichbar sind. Ein wesentlicher Punkt für die Umsetzung eines derartigen Systems, dessen Leistung im Falle einer Auslösung zu konventionellen Zündzeiten, wurde aber bisher nur am Rande berücksichtigt. In diesem Kapitel soll nun aufgezeigt werden, inwieweit diese Anforderung das erreichbare Potential bei einer frühzeitigen Auslösung beeinflusst.

Zu diesem Zweck wurde die Airbagform unter Berücksichtigung der Positionierungsprobleme bei den vergangenen Schlittenversuchen überarbeitet. Im Anschluss wurde das Simulationsmodell des neuen Airbags mit einer Reihe von Horizontalimpaktorversuchen für beide zeitliche Auslöseszenarien validiert. Somit können nun in der Simulation belastbare Aussagen über die Insassenbelastungen sowohl im Falle einer Auslösung des Airbags noch vor der Kollision, als auch bei den konventionellen Zündzeiten getroffen werden.

6.5.1 Nevalidierung Simulationsmodell

Wie schon in den vorigen Kapiteln beschrieben, kam es bei fast allen Schlittenversuchen zu Problemen bei der Entfaltung und der richtigen Positionierung des Luftsackes vor dem Insassen. Diese Probleme sind einerseits auf die geringere Dynamik des Luftsackes durch die langsame Befüllung aber auch auf dessen Form zurückzuführen.

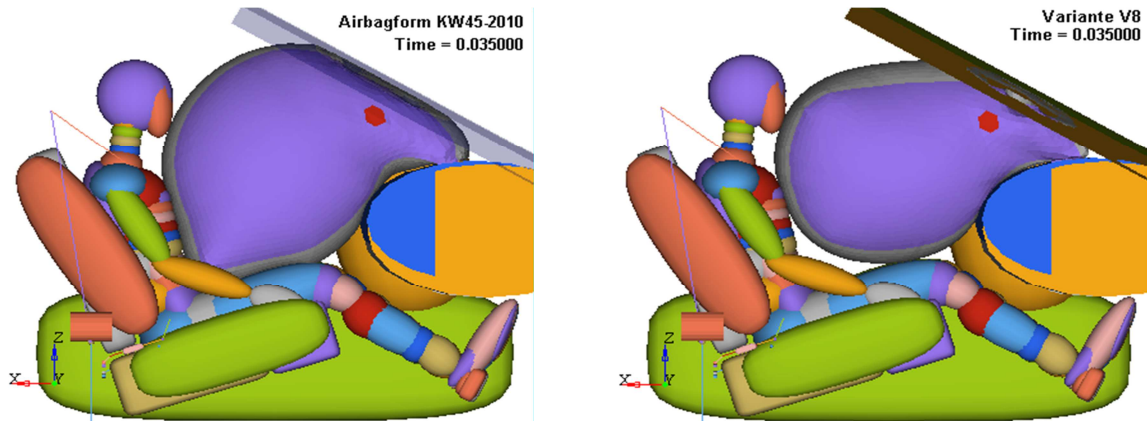


Abbildung 111: Überarbeitung der Airbagform (HIII-50%)

Insbesondere jener Teil des Mantelteils, welcher bei der „alten“ Geometrie (Abbildung 111, links) im Bereich der Hüfte am Dummy anliegt, verhängte sich während der Positionierung immer wieder an dessen Knien. Des Weiteren führte der weit an der Windschutzscheibe hochgezogene Airbag tendenziell zu einer Überstreckung des Nackens. Diese beiden Bereiche des Luftsacks wurden überarbeitet und das gewonnene Volumen in die Breite des Mantelteils übertragen, sodass das Volumen des Airbags gleich blieb. Daraus ergibt sich auch eine größere Stabilität des Luftsacks, welche insbesondere bei teilüberdeckten Kollisionen oder einem Anprall an eine schräge Ebene wichtig ist.

In Vorsimulationen mit dieser neuen Airbagform zeigte sich, dass die Belastung des Nackens geringfügig verbessert werden konnte und dass auch bei der Testkonfiguration des FMVSS208 gegen die 30° schräge Barriere keine Gefahr besteht, dass der Airbag unter der Last des Dummys seitlich „ausweicht“. Die Verbesserungen bei der Positionierung des Luftsacks vor dem Insassen konnten bei Entfaltungstests bewertet werden.

Zur Erstellung eines neuen, sowohl bei früher als auch bei konventioneller Auslösung aussagekräftigen Simulationsmodells, wurde eine Serie von 14 Horizontalimpaktorversuchen durchgeführt. Um verschiedene Lastfälle und Energieeinträge abzubilden, wurden dabei unterschiedliche Konfigurationen aus Impaktormasse und Impaktorgeschwindigkeit sowie die verschiedenen zeitlichen Auslöseszenarien getestet. Das Ergebnis ist nun ein Simulationsmodell des Airbagsystems mit der neuen, überarbeiteten Luftsackgeometrie, mit dem gesicherte Aussagen bei Zündungen des Airbags bei 80 Millisekunden vor t_0 sowie den konventionellen Auslösezeiten getroffen werden können.

Aufgrund der geänderten Airbagform und der Neuvalidierungen ergeben sich für die Frühauslösung geringfügige Unterschiede bei den Insassenbelastungen im Vergleich zu den, mit Schlittenversuchen bestätigten Ergebnissen aus Kapitel 6.4.3. Die Ergebnisse sind aber im Wesentlichen übertragbar, weswegen an dieser Stelle nur mehr auf die Insassenbelastungen im Falle der konventionellen Auslösezeitpunkte eingegangen wird.

Während der Validierungsversuche für die konventionellen Auslösezeitpunkte zeigte sich, dass das Airbagsystem in dieser Konfiguration sehr hart ist. Bei den Versuchen äußert sich dies durch eine sehr große Resttiefe des Impaktors zur Instrumententafel. Aufgrund des längeren Zeitraumes, in dem das Gas im Luftsack abkühlt bzw. Gas über Undichtigkeiten im Airbag ausströmen kann, muss für die Frühauslösung eine größere Gasgeneratorleistung vorgehalten werden. Diese Mehrleistung bereitet nun im Fall der konventionellen Auslösezeitpunkte größere Schwierigkeiten. Um einen Eindruck über die Größenordnung dieser zusätzlichen Energie zu bekommen, wird die eingebrachte Energiemenge in den Luftsack mit jener des Serien-Airbagsystems verglichen. In der folgenden Abbildung sind der sogenannte „inflating flow“ und dessen Integral dargestellt. Der „inflating flow“ berechnet sich aus

dem aktuellen Massenstrom, der Temperatur und der spezifischen Wärmekapazität des in den Luftsack einströmenden Gases und ist ein Maß für den Energieeintrag. Mit dem Integral kann die gesamte eingebrachte Energie beurteilt werden.

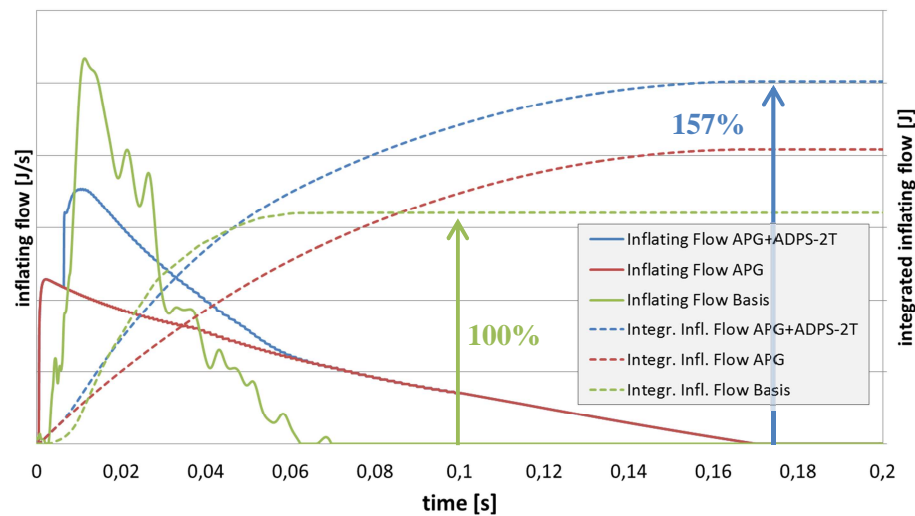


Abbildung 112: Vergleich Energieeintrag in den Airbag, konv. Auslösung

In der obigen Abbildung kann erkannt werden, dass die Gesamtenergie die vom Gasgenerator in den Airbag eingebracht wird um fast 60% höher ist als jene des Basis-Systems. Neben den höheren Verlusten aufgrund der längeren Standzeit ist dabei jedoch auch zu beachten, dass ein größeres Luftsackvolumen zu füllen ist. Insbesondere die hohen Verluste aufgrund der langen Standzeit sind zum Teil auf den eingesetzten Wasserstoff-Gasgenerator und dessen vergleichsweise hohe Gastemperatur zurückzuführen. Mit einem Hybrid-Gasgenerator wären die Verluste durch Abkühlung wesentlich geringer, wodurch unter Umständen auch eine geringere Gasgeneratorleistung ausreichen würde um den Luftsack zu füllen. Wegen seiner „hohen“ Einstellflexibilität war aber der Wasserstoff-Gasgenerator von Vorteil und wurde aus diesem Grund ausgewählt.

Im Fall der konventionellen Auslösezeitpunkte fallen jedoch die Verluste aufgrund der Abkühlung sowie der Leckage wesentlich weniger stark ins Gewicht, was dazu führt, dass der Airbag zu hart ist. Dazu kommt, dass das maximale Luftsackvolumen durch den bereits ein Stück weit vorverlagerten Insassen geringer ist, als im Fall der frühzeitigen Auslösung deutlich vor t_0 . Dies verschlechtert die Ausgangssituation für den Insassen bei konventionellen Auslösezeitpunkten zusätzlich.

Um die für die Frühauslösung optimierten Rückhaltesysteme nun bestmöglich für die konventionellen Auslösezeitpunkte abzustimmen, muss in erster Linie versucht werden, durch frühe Öffnung des aktiven Vents möglichst viel Gas ausströmen zu lassen.

6.5.2 Vergleich Insassenbelastung bei konventioneller Auslösung mit Basis-Rückhaltesystemen

Im Abschnitt 6.3 wurden die neu entwickelten Rückhaltesysteme beschrieben und die jeweiligen festen und variablen Einflussgrößen auf die Rückhalteeigenschaften angeführt. Nun soll versucht werden unter denselben Randbedingungen (Vent-Durchmesser, Gasgenerator-Leistung, Gurt-Eigenschaften) durch geeignete Wahl der freien Parameter für die unterschiedlichen Lastfälle jeweils optimale Abstimmungen zu finden. Dabei ist zu beachten, dass Zündzeiten des Gasgenerators und des Gurtstraffers den konventionellen Triggerzeiten entsprechen. Das Ziel ist, dass die Insassenbelastungen bei der Auslösung der für sehr frühe Zündzeiten ausgelegten Rückhaltesysteme nicht höher ausfallen, als mit den Serien-Rückhaltesystemen im Referenzfahrzeug.

In den folgenden Kapiteln werden beispielhaft die Ergebnisse für den 50%-Mann und die 5%-Frau beschrieben und diskutiert:

6.5.2.1 Hybrid III 50%-Mann

Die Ergebnisse der Simulation für den 50%-Dummy in den unterschiedlichen Lastfällen bestätigen die Testresultate der durchgeführten Impaktorversuche, die für die Validierung des Simulationsmodells durchgeführt wurden. Der Airbag ist unter den gegebenen Randbedingungen im Fall konventioneller Auslösezeitpunkte sehr hart und der verfügbare Verzögerungsweg für den Insassen kann nicht ausgenutzt werden. Das führt dazu, dass es bei einigen Belastungskennwerten im Vergleich zum Basisfahrzeug zu Verschlechterungen kommt.

Trotz einer sehr frühen Öffnung des aktiven Vents in allen Lastfällen führt der harte Airbag zu einer höheren Belastung des Nackens. Durch die Wahl des Umschaltzeitpunktes vom hohen auf das niedrige Gurtkraftbegrenzungsniveau können die Rotation des Oberkörpers und damit auch die Nackenbelastungen beeinflusst werden. Folgende Abbildungen zeigen jeweils die besten Parameterkonfigurationen für die einzelnen Lastfälle:

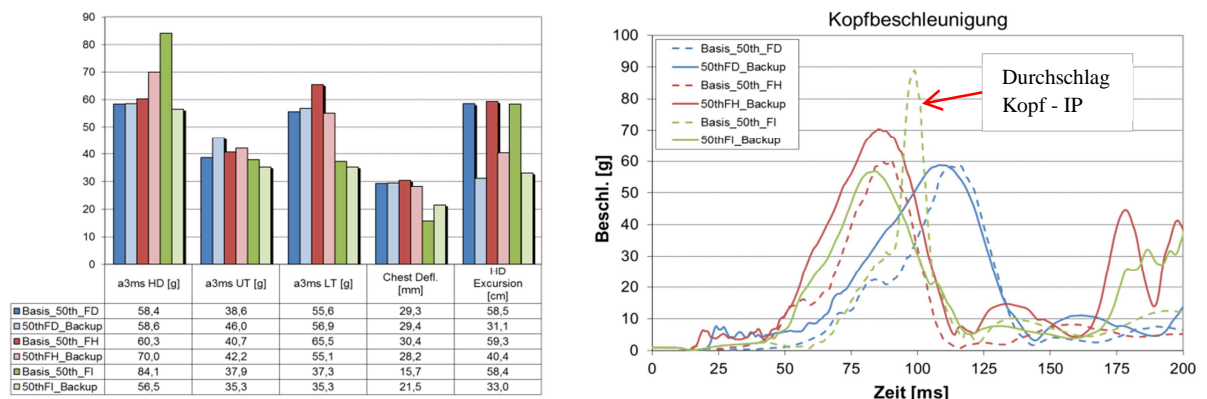


Abbildung 113: Vergleich Insassenbelastungen bei konv. Auslösung, 50%-Dummy, Überblick und Kopfbeschleunigung

Im Diagramm der Kopfbeschleunigungen kann man sehr deutlich erkennen, dass die Verläufe deutlich früher ansteigen als beim Referenzfahrzeug. Darüber hinaus ist in der linken Grafik in der obigen Abbildung auch die Vorverlagerung des Kopfes (HD-Excursion) dargestellt. In allen drei Lastfällen ist der Minimalabstand zwischen Kopf und Instrumententafel wesentlich größer als beim Referenzfahrzeug, was ebenfalls auf den zu harten Airbag zurückzuführen ist.

Die unterschiedlichen Airbagform und die frühere Ankopplung führen dazu, dass die Maximalwerte der Kopfbeschleunigung (außer beim FI-Lastfall) trotzdem auf einem mit dem Serienfahrzeug vergleichbaren Niveau bleiben. Bei den Verläufen des Referenzfahrzeugs ist derselbe steifere Sitz im Einsatz, wie bei den Konfigurationen mit den neu entwickelten Rückhaltesystemen (siehe Kapitel 6.1.1). Die Serien-Rückhaltesysteme wurden aber nicht mit diesem steiferen Sitz abgestimmt, wodurch es beim ungedregten Lastfall (Basis_50th_FI) zu einem Durchschlag des Kopfes zur Windschutzscheibe kommt.

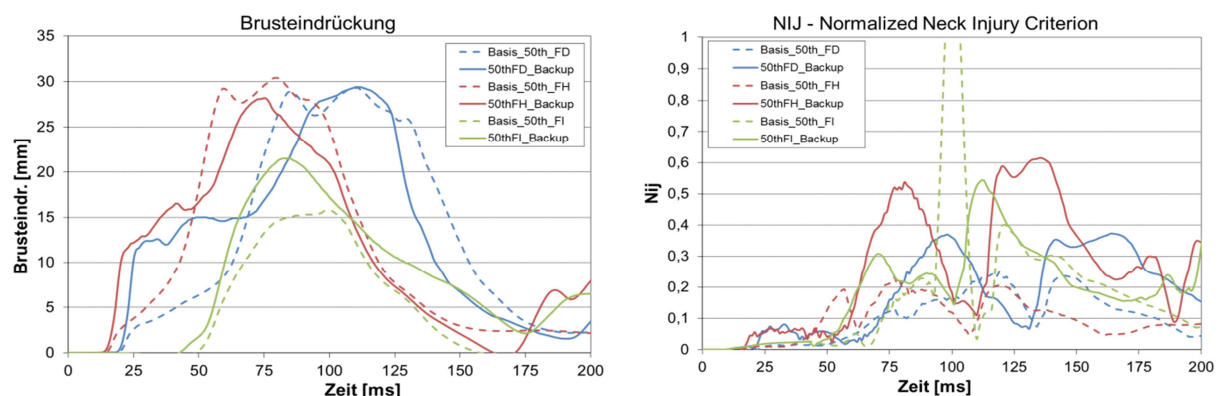


Abbildung 114: Vergleich Insassenbelastungen bei konv. Auslösung, 50%-Dummy, Brusteingründung und N_{ij}

Eine gewisse Reduktion der Brusteindrückung, welche bei der Frühauslösung gezeigt werden konnte, ist im Wesentlichen auch bei den konventionellen Zündzeitpunkten erreichbar. Zu einer Verschlechterung kommt es wiederum beim FI-Lastfall, was aber auch auf den härteren Airbag zurückzuführen ist.

Die deutlichsten Verschlechterungen gegenüber der Basis ergeben sich bei der Nackenbelastung, in diesem Fall in allen betrachteten Lastfällen, wobei die Belastungsniveaus deutlich unter den gesetzlichen Grenzwerten liegen.

6.5.2.2 Hybrid III 5%-Frau

Auch bei den Lastfällen mit der 5%-Frau bei konventionellen Auslösezeiten treten teilweise höhere Belastungen auf, als im Referenzfahrzeug. Der Grund liegt aber in diesem Fall nicht an dem zu harten Airbag, sondern an der zu langsamen Befüllung des kleinen Luftsackes durch die Füllung allein mit dem Wasserstoffgasgenerator. Die zusätzliche Zündung der kleinen pyrotechnischen Gasgeneratorstufe würde für diesen Effekt zwar Abhilfe schaffen, aber in weiterer Folge dazu führen, dass der Airbag für diese Lastfallkonfigurationen viel zu hart und die Belastungen noch höher wären.

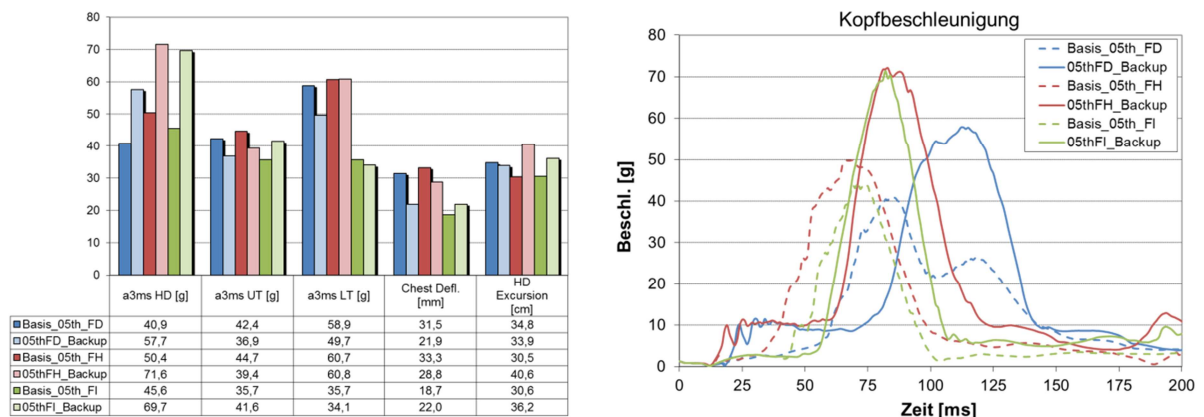


Abbildung 115: Vergleich Insassenbelastungen bei konv. Auslösung, 5%-Dummy, Überblick und Kopfbeschleunigung

In dem Diagramm der Kopfbeschleunigung in der obigen Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass die Verläufe bis zu fast 20 Millisekunden später ansteigen, als beim Serienairbagsystem. Der Kopf des Insassen bewegt sich während dieses Zeitraumes mit nur sehr geringer Verzögerung nach vorne bevor er dann innerhalb eines vergleichsweise kurzen Weges abgebremst wird. Dieses sehr ungünstige Verhalten führt in weiterer Folge zu einem starken Anstieg der maximalen Kopfbeschleunigungen.

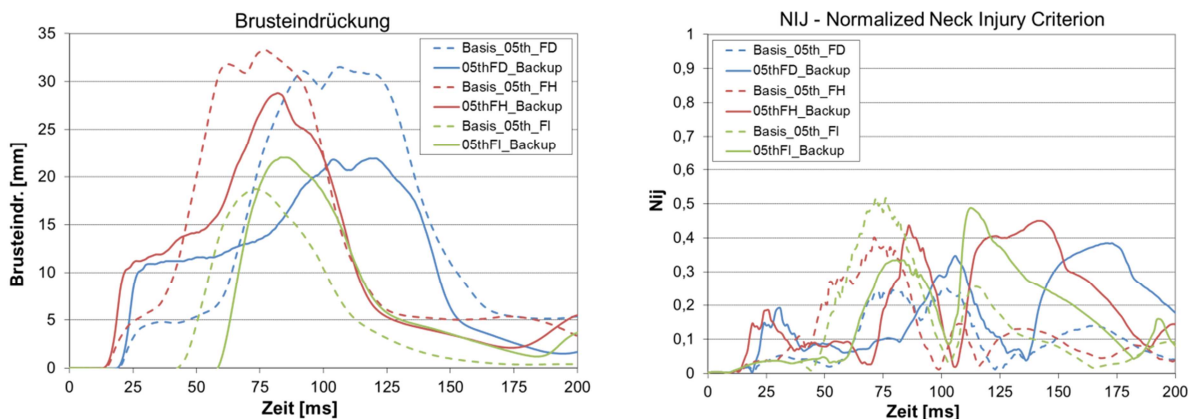


Abbildung 116: Vergleich Insassenbelastungen bei konv. Auslösung, 5%-Dummy, Brusteindrückung und Nij

Wie bei den Lastfällen mit früher Auslösung der Rückhaltesysteme, können einerseits durch die Straffung an allen Gurtanbindungspunkten und andererseits durch die erhöhte Adaptivität im

Gurtsystem bei der 5%-Frau vergleichbare Verbesserungen bei der Brusteindrückung wie auch schon beim 50%-Dummy erreicht werden. Gegenüber dem Referenzfahrzeug erhöhen sich auch in diesem Fall die Belastungen des Nackens, jedoch in einem wesentlich geringeren Ausmaß als beim 50%-Dummy.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Ziel, die Insassenbelastungen im Fall einer Auslösung der neuartigen Rückhaltesysteme mit konventioneller Sensorik gegenüber der Basis nicht zu erhöhen, mit dieser Hardwarekonfiguration nicht zu 100% erreicht wurde. Einzelne Belastungskennwerte erhöhen sich bei der Auslösung der für die Frühauslösung konzipierten Rückhaltesysteme zu konventionellen Zündzeiten deutlich. Andere Verletzungskriterien, wie beispielsweise die Brusteindrückung, konnten aber auch bei konventioneller Auslösung in den meisten Fällen gegenüber der Basis verbessert werden. In Summe werden die Belastungen mit den neu entwickelten Rückhaltesystemen zwar anders verteilt auf den Insassen aufgebracht, die Gesamtbelastungen sind aber in etwa vergleichbar, sodass die konventionelle Auslösung dieser Systeme keinesfalls ein „Ausfall-Kriterium“ für diese gesamte Projektfragestellung darstellt.

In einer Weiterentwicklung eines derartigen Systems muss der Anforderung der konventionellen Auslösung wesentliche Beachtung geschenkt werden. Dann erscheint es auch durchaus möglich, auch in diesem Fall noch deutliche Verbesserungen gegenüber der Basis zu erreichen. Einige mögliche Ansatzpunkte werden im Folgenden kurz vorgestellt.

6.5.3 Ansätze für mögliche Verbesserungen

Die Grundproblematik besteht darin, eine Abstimmung des Gesamtsystems zu finden, mit der die gegenläufigen Anforderungen hinsichtlich Gasgeneratorleistung und Leckage der unterschiedlichen zeitlichen Auslösevarianten bestmöglich abgedeckt werden können.

In der untersuchten Variante wurden die Gesamtleistung der gewählten Gasgeneratoren sowie die optimale Abströmfläche der Vents in der Frühauslösung bestimmt. Es zeigt sich, dass diese Auslegung in den Lastfällen mit konventioneller Auslösung zu einem recht harten Airbagsystem führt.

Der erste naheliegende Ansatz besteht also darin, die Abströmflächen der Vent-Öffnungen zu vergrößern. In den Konfigurationen mit konventionellen Triggerzeiten führt dies in Kombination mit frühen Öffnungszeiten des aktiven Vents direkt zu einer Verbesserung der Belastungen. Bei den Varianten mit der frühen Auslösung des Airbags muss die stärkere Ventilation durch spätere Öffnungszeiten des aktiven Vents kompensiert werden. Dieser Idee sind in der Umsetzung Grenzen gesetzt: Einerseits nimmt mit der Größe der Abströmöffnung die Empfindlichkeit auf Abweichungen beim Öffnungszeitpunkt zu. Leichte Abweichungen vom „Soll-Öffnungszeitpunkt“ können also dazu führen, dass der Insasse entweder mit dem Kopf an die Instrumententafel durchschlägt oder deutlich zu hart abgebremst wird. Andererseits wird es schwierig, insbesondere für länger andauernde Crashpulse (z.B.: EuroNCAP), mit einem derartigen System gute Abstimmungen zu finden.

Ein weiterer Ansatz wäre, die Aufteilung der Gesamtleistung der beiden Gasgeneratoren zu verändern. Unter der Annahme, dass die minimale Gesamtenergie aus den Lastfällen der Frühauslösung fixiert ist, besteht die Möglichkeit den Anteil des Wasserstoff-Gasgenerators zu reduzieren und durch einen entsprechend stärkeren pyrotechnischen Gasgenerator zu kompensieren. Dies hätte zwei entscheidende Vorteile: Einerseits führt ein leistungsschwächerer Wasserstoff-Gasgenerator zu einer besseren Ausgangsbasis für die OoP-Problematik. Dazu kommt, dass auch Leckage- und Abkühlverluste bei der Frühauslösung tendenziell geringer ausfallen würden. Andererseits bewirkt eine stärkere pyrotechnische Stufe, dass der Luftsack bei den Lastfällen mit konventioneller Auslösung schneller in Position gebracht wird und den Insassen verzögern kann. Bei dieser Betrachtung muss allerdings beachtet werden, dass der Wasserstoff-Gasgenerator für die OoP-Lastfälle eine Mindestleistung aufbringen muss, um einen 50%-Dummy ohne Gurt bei einem Frontal-Anprall mit 26km/h

ausreichend zu verzögern. Darüber hinaus muss auch gewährleistet sein, dass die Airbagklappe in der Instrumententafel sicher geöffnet wird.

Zuletzt ist es auch noch denkbar, durch einen Abgang von dem frühest möglichen Auslösezeitpunkt bei 80 Millisekunden vor t_0 eine bessere Abstimmung zu finden. Bei einer Annäherung an die konventionellen Triggerzeiten nehmen die Druckverluste durch Leckage und Abkühlung tendenziell ab. Dies ermöglicht es einerseits, eine geringere Gasgeneratorleistung zu installieren, oder andererseits auch in der Frühauslösung mit größeren Abströmquerschnitten noch gute Abstimmungen zu erzielen. Nachdem die Mindestleistung durch den Wasserstoff-Gasgenerator vorgegeben ist, könnte die Füllung des Luftsackes innerhalb eines kürzeren Zeitraumes eventuell auf Kosten des Verbesserungspotentials für OoP-Situationen gehen.

Die sind nur drei mögliche von einer Vielzahl an Varianten, mit denen das Verbesserungspotential des Insassenschutzes in die eine oder andere Richtung verschoben werden kann. Je nach Wunsch des Fahrzeugherstellers kann der Schwerpunkt auf die frühe Auslösung oder auf die konventionellen Triggerzeiten gelegt werden.

Es kann zusammengefasst werden, dass ein Rückhaltesystem entwickelt wurde, mit dem im Falle einer frühzeitigen Auslösung deutliche Verbesserungen des Insassenschutzes erreicht werden. Bei Auslösung dieses Systems mit herkömmlichen Auslösealgorithmen, entspricht das Schutzniveau in etwa jenem des Referenzfahrzeuges. Eine Vielzahl an Möglichkeiten, für deren Umsetzung unterschiedlich viel technischer Aufwand notwendig ist, erlauben noch weitere Verbesserungen im Fall einer Frühauslösung, beziehungsweise auch eine Verringerung des Verletzungsrisikos im Fall konventioneller Auslösezeitpunkte.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn der vorliegenden Untersuchung stand die Fragestellung ob, beziehungsweise wie weit der Insassenschutz in einer Frontalkollision verbessert werden kann, wenn heutzutage übliche Rückhaltesysteme, wie ein Airbag oder ein pyrotechnischer Gurtstraffer, noch vor dem eigentlichen Aufprall aktiviert werden.

Dabei standen vier vielversprechende Ansätze im Zentrum der Untersuchungen:

1. Vergrößerung des effektiven Rückhalteweges des Insassen: Durch eine frühzeitige Auslösung und Positionierung eines größeren Luftsacks direkt vor dem Insassen, kann dieser im Fall eines Unfalles früher an der Verzögerung des Fahrzeuges teilnehmen. Der zur Verfügung stehende Platz im Fahrzeuginnenraum kann also bestmöglich zu einer moderaten Abbremsung des Insassen genutzt werden, was die Grundvoraussetzung für ein minimales Verletzungsrisiko ist.
2. Langsamere Befüllung des Airbags: Ab einem gewissen Zeitpunkt vor einer Kollision steht fest, dass diese nicht mehr verhindert werden kann und es zu einem Zusammenstoß mit einem Hindernis kommen wird. Erfolgt zu diesem Zeitpunkt die Auslösung des Airbags, könnte die Befüllung des Luftsackes über einen vergleichsweise langen Zeitraum erfolgen. Daraus ergibt sich eine deutlich reduzierte Aggressivität des Luftsackes beim Austritt aus der Instrumententafel, verbunden mit einer Verringerung des Verletzungsrisikos für Insassen, die sich im unmittelbaren Anschussbereich des Airbags, also „out of position“ befinden.
3. Vorbeschleunigung des Insassen: Aktuelle, bereits in Serienfahrzeugen umgesetzte Gurtsysteme können bereits vor der Kollision geringe Kräfte auf den Insassen aufbringen und so verhindern, dass er sich bei einer Vollbremsung vor dem eigentlichen Anprall schon vorverlagert. Es ist aber auch vorstellbar, den Insassen mit höheren Kräften entgegen der Fahrtrichtung vorzubeschleunigen. Mögliche Vorteile ergeben sich dabei zum einen wiederum durch den gewonnenen zusätzlichen Verzögerungsweg für den Insassen, aber zusätzlich auch durch eine geringere effektive Anprallgeschwindigkeit beim Kontakt mit dem Innenraum.
4. Weniger aggressive Gurtstraffung: Die pyrotechnische Straffung des Gurtbandes bei einem Unfall hat sich als eine sehr wirkungsvolle Einrichtung zur Verbesserung des Insassenschutzes etabliert. Je früher ein Insasse an der Fahrzeugverzögerung teilnimmt, umso geringer können die maximalen Belastungen ausfallen. Bei der Straffung des Gurtes dürfen aber auch maximal ertragbare Kräfte nicht überschritten werden, da es ansonsten zu Verletzungen kommen kann. Bei einer frühzeitigen Auslösung eines Gurtstraffers könnte mit deutlich geringeren Kräften, die allerdings über einen längeren Zeitraum wirken, eine vergleichbare oder sogar noch bessere Ankopplung des Insassen beziehungsweise eine Vorbeschleunigung erreicht werden.

Das Ziel dieses Projektes war es, zu untersuchen, wie groß die oben beschriebenen Potentiale sind, beziehungsweise wie Rückhaltesysteme ausgelegt werden müssen, um diese bestmöglich umsetzen zu können.

Um sowohl die möglichen Verbesserungen als auch den technischen Mehraufwand beurteilen zu können, wurden in einer bestehenden Fahrzeugumgebung neuartige, frühzeitig ausgelöste Rückhaltesysteme entwickelt. Die möglichen Verbesserungen können somit über den Vergleich der Insassenbelastungen mit den Serien-Rückhaltesystemen dieses Fahrzeuges quantifiziert werden. Als frühest möglicher Auslösezeitpunkt der Insassenschutzsysteme wurde 80 Millisekunden vor Erstkontakt definiert. Dabei wird angenommen, dass eine geeignete Sensorik existiert, welche zu diesem Zeitpunkt mit ausreichender Sicherheit bestimmen kann, dass eine Kollision unvermeidbar ist und somit Rückhaltesysteme aktiviert werden können. Die Spezifizierung dieser Sensorik war nicht Teil dieser Arbeit.

Die Untersuchungen umfassen drei unterschiedliche Insassenklassen (5%-Frau, 50%-Mann und 95%-Mann) und bestimmen die Belastungen in verschiedenen Frontal-Crash-Konfigurationen (z.B.: EuroNCAP, US-NCAP...). Somit wird gewährleistet, dass die Potentialaussage auf einer breiten Basis abgesichert ist. Es wird angenommen, dass eine frühe Auslösung des Airbags auf der Beifahrerseite aufgrund des größeren Volumens im Vergleich zum Fahrerairbag die stärksten Änderungen gegenüber konventionellen Zündzeitpunkten ergibt. Aus diesem Grund wurden nur die Insassenbelastungen des Beifahrers untersucht, wobei anzunehmen ist, dass sich die Ergebnisse in gewissem Maße auch auf die Fahrerseite übertragen lassen.

Zunächst wurde ermittelt, welche neuartigen Anforderungen bei der Entwicklung eines früh ausgelösten Airbagsystems zu berücksichtigen sind. Ein wesentlicher Einflussfaktor für die Insassenbelastungen ist der Weg, entlang dem die Bewegungsenergie des Insassen abgebaut wird. Um diesen Weg bestmöglich auszunutzen, muss möglichst früh mit der Verzögerung begonnen werden. Bei einer Frühauslösung des Airbags eröffnet sich die Möglichkeit, von Beginn an mit dem Airbag großflächig und damit biomechanisch verträgliche Belastungen auf den Insassen aufzubringen. Um dies zu erreichen, muss der Luftsack so gestaltet sein, dass er im Optimalfall bereits am Insassen anliegt, noch bevor sich dieser infolge des Crashpulses nach vorn verlagert. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass mit ein und demselben Rückhaltesystem große und kleine Insassen sowohl bei einer frühzeitigen als auch bei einer Auslösung zu konventionellen Zündzeiten geschützt werden müssen. Eine optimale Airbaggeometrie für eine große Person bei früher Auslösung würde demnach bei einem kleinen Insassen zu konventionellen Triggerzeiten in jedem Fall zu einem massiven Anschuss führen. Andererseits kann mit einer Airbagform, die für kleine Personen optimiert wurde, in der Frühauslösung keine Verbesserung erzielt werden. Es zeigt sich also, dass ein gewisses Maß an Adaptivität der Airbagform notwendig ist, um Verbesserungen mit einer frühzeitigen Auslösung des Airbags erzielen zu können. In dieser Arbeit wurde eine zweistufige Airbagform umgesetzt, wobei die kleinere Form durch das Zurückhalten innenliegender Fangbänder aus der großen Form realisiert wird.

Der zweite vielversprechende Ansatz zur Verbesserung der Insassenbelastung durch früh auslösende Rückhaltesysteme ist die sanftere Befüllung des Luftsackes. Herkömmliche moderne Gasgeneratoren sind in der Lage, einen Airbag innerhalb von etwa 40 Millisekunden vollständig zu befüllen. Unter der Annahme, dass die Triggerung 80 Millisekunden vor t_0 erfolgt und die deutliche Vorverlagerung des Insassen, je nach Lastfall, circa 40 Millisekunden nach t_0 beginnt, kann die Befüllung über einen etwa dreimal so langen Zeitraum erfolgen. Dabei darf aber nicht vergessen werden, dass mit demselben Rückhaltesystem auch bei der Auslösung mit herkömmlicher Sensorik die Insassen gut geschützt werden müssen. Es besteht also weiterhin die Anforderung, den Luftsack sehr rasch zu befüllen. Um diese gegenläufigen Anforderungen abdecken zu können, ist also auch beim Gasgenerator eine Adaptivität beim Befüllungsverhalten notwendig. In diesem Projekt wurde dies mit einem zweistufigen Gasgenerator realisiert. Die erste Stufe bildet ein neuartiger Prototypengasgenerator, mit dem die geforderte langsame Befüllung des Luftsackes relativ einfach umgesetzt werden kann. Zusätzlich wird, je nach Lastfall, eine „leistungsschwache“ pyrotechnische Stufe aktiviert um den Airbag einerseits rasch genug in Position zu bringen und andererseits das große Luftsackvolumen ausreichend zu füllen.

Der größere Druckverlust des Airbags infolge der längeren Standzeit bildet eine wesentliche Problemstellung bei der Auslegung der Hardware-Komponenten für die beiden zeitlichen Auslöseszenarien. Einerseits ist es notwendig, dass der Airbag hart genug ist, um im Fall einer frühen Auslösung auch bei länger dauernden Crashbelastungen (z.B.: EuroNCAP) einen Durchschlag des Insassen an die Instrumententafel zu verhindern. Andererseits muss der Luftsack bei konventionellen Auslösezeiten, bei denen die Verluste geringer sind, auch weich genug sein, um eine ausreichende Vorverlagerung der Insassen zuzulassen. Um diesen Kompromiss bestmöglich zu schaffen, erscheint es sinnvoll, die Abstimmung des Gesamtsystems mit der minimalen ausreichenden Gasgeneratorleistung in Verbindung mit möglichst geringen Verlusten durchzuführen. Dafür wurde

der Airbag mit einem mit Silikon beschichteten Gewebe ausgeführt und ein passives sowie ein aktives Vent vorgesehen. Somit kann ein großer Anteil der Leckage verhindert werden, indem ein Bereich des Abströmquerschnitts erst während der Kollision geöffnet wird.

Beim Gurtsystem erhofft man sich deutliche Verbesserungen der Insassenbelastungen, vor allem durch eine mögliche Vorbeschleunigung des Insassen entgegen der Fahrtrichtung. Die Kombination aus einer verringerten Anprallgeschwindigkeit und einem längeren Verzögerungsweg ist sehr vielversprechend. Bei der Umsetzung einer derartigen Straffstrategie ergeben sich allerdings auch einige neue Anforderungen und Problemstellungen:

Zunächst konnte gezeigt werden, dass für eine effektive Vorbeschleunigung des Insassen mit Hilfe einer frühen Straffung des Gurtbandes sowohl am Schulter- als auch am Beckengurt gezogen werden muss. Eine Straffung am Beckengurt allein kann im ungünstigen Fall dazu führen, dass der Oberkörper des Insassen nach vorne rotiert und somit der Abstand zwischen Kopf und Instrumententafel verringert wird. Eine Straffung allein am Schultergurt führt dazu, dass sich der Oberkörper nach hinten verlagert, wodurch es zu einem erhöhten Risiko für Submarining-Verletzungen kommen kann.

Eine weitere Fragestellung, die sich sofort stellt, wenn über eine Vorbeschleunigung des Insassen entgegen der Fahrtrichtung diskutiert wird, ist die Frage nach einer möglichen Freigabe der Rückenlehne des Sitzes. Um diesbezüglich Abschätzungen bezüglich des Verbesserungspotentials des Insassenschutzes machen zu können, wurde eine Vorbeschleunigung des Insassen sowohl mit als auch ohne Freigabe von Weg nach „hinten“ untersucht. Weitere Varianten dieser Studie umfassen verschiedene Straffzeitpunkte sowie unterschiedlich hohe Strafniveaus.

Es stellte sich dabei jedoch heraus, dass ohne eine entsprechende Anpassung der Gurtgeometrie an die Bewegung des Insassen keine Verbesserung erreicht werden kann. Der gewonnene Weg kann nicht für eine moderatere Verzögerung des Insassen genutzt werden, weil die Winkel der Gurtzugrichtung bei den „normalen“ Gurtanbindungspunkten zu flach werden. Um durch die Vorbeschleunigung deutliche Verbesserungen zu erzielen, müsste die Positionierung der Gurtbefestigungen am Sitz und der Karosserie deutlich verändert werden. Diese Maßnahme wurde nicht weiter untersucht, stellt aber einen sehr interessanten Anknüpfungspunkt für weitere Untersuchungen zu diesem Thema dar.

Allein durch die länger anhaltenden Straffkräfte bei Straffzeitpunkten, nur unwesentlich früher als die konventionellen Triggerzeiten in Verbindung mit der Straffung an allen drei Gurtanbindungspunkten, konnte eine erhebliche Reduktion der Brusteindrückung erreicht werden. Der Insasse nimmt frühest möglich an der Fahrzeugverzögerung teil, wodurch auch geringere Gurtkraftbegrenzungsniveaus ausreichen, um einen vergleichbaren Restabstand zwischen Kopf und Instrumententafel zu erreichen. Dieser Effekt stellte sich bei allen untersuchten Frontal-Lastfällen (mit Gurt) mit allen drei Dummies ein.

Die gesteigerte Straffleistung hat aber auch einen negativen Effekt: Durch die stärkere Rückhaltung des Insassen treffen die Füße erst später, dafür aber mit einer höheren Geschwindigkeit am Boden im Fußraum auf. Dieser härtere Anprall führt insbesondere im Bereich der Unterschenkel zu deutlich höheren Belastungen. Verstärkt wird dieser Effekt noch zusätzlich durch die geänderte Beinmechanik bei der frühen Straffung des Gurtbandes. Bis zum Zeitpunkt des Kontaktes der Füße mit dem Bodenblech strecken sich die Knie infolge der Crashbelastung. Die ausgestreckten Beine sind hinsichtlich der Durchleitung von axialen Lasten steifer als in der „normalen“ Beinstellung, weil die Knie weniger leicht ausweichen können. Insbesondere bei Betrachtung des EuroNCAP-Ratings, bei dem die Unterschenkelbelastungen mit hoher Gewichtung gewertet werden, kann dieser Effekt dazu führen, dass das Gesamtergebnis trotz der deutlich geringeren Werte der Brusteindrückung schlechter wird. Um diese Effekte auch in Versuchen zu bestätigen wurde, eigens eine, mittlerweile zum Patent angemeldete Aktorik entwickelt, mit der auch die notwendigen längeren Straffdauern problemlos umgesetzt werden konnten. An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass im Rahmen dieser Untersuchung

ein Knie-Airbag nicht in Betracht gezogen wurde. Es erscheint aber durchaus möglich, dass damit keine oder nur geringe Erhöhungen der Belastung der unteren Extremitäten auftreten.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass für eine Vorbeschleunigung des Insassen bei einem frühen Beginn der Gurtstraffung unbedingt auch die Gurtgeometrie überarbeitet werden muss, um Verbesserungen zu erzielen. Wenn bei einer frei gegebenen Rückenlehne durch die Verlagerung des Insassen beispielsweise auch der Kontakt der Füße mit dem Bodenblech kein Problem mehr darstellt, sind durch die sehr frühe Gurtstraffung durchaus noch deutliche Verbesserungen vorstellbar.

Im Rahmen dieser Untersuchung blieben die Gurtgeometrie sowie die Rückenlehne des Sitzes jedoch unangetastet. Es konnte nachgewiesen werden, dass mit, im Vergleich zu herkömmlichen Straffaggregaten, länger anhaltenden Straffkräften deutliche Verbesserungen der Ankopplung des Insassen an die Fahrzeugverzögerung erreicht werden können, was in weiterer Folge mit deutlichen Verbesserungen der Brusteindrückung einher geht. Die Voraussetzung dafür ist allerdings ein ausreichend steifer Sitz.

Aus den Ergebnissen der oben beschriebenen Voruntersuchungen, in denen die Rückhaltesysteme jeweils unabhängig voneinander betrachtet wurden, entstand im nächsten Schritt ein Gesamtkonzept eines früh ausgelösten Insassenschutzsystems. Letzteres umfasst folgende Einzelkomponenten:

- Airbag: - zweistufige Geometrie
 - zweistufiger Gasgenerator
 - aktives + passives Vent

- Gurtsystem: - Schultergurtaggregat R30LLA der Firma Autoliv mit Straffung und
 zweistufigem, umschaltbarem Gurtkraftbegrenzer
 - beidseitige Straffung und Kraftbegrenzung am Beckengurt mittels eigens
 entwickelter Prüfstandsgurtaktori

Mit diesem Gesamtsystem wurden für alle Kombinationen aus der Matrix von drei Dummies und drei Frontalcrashtests in jeweils beiden zeitlichen Auslöseszenarien optimale Abstimmungen gesucht.

Dabei zeigte sich insbesondere, dass durch die frühe Auslösung der angepassten Airbagform die Kopf- und Nackenbelastungen erheblich reduziert werden können. Die frühe Ankopplung des Insassen an die Fahrzeugverzögerung durch die länger anliegenden Straffkräfte führt in allen Lastfällen zu einer deutlichen Reduktion der Brusteindrückung sowie der Brustbeschleunigung.

Um ein möglichst großes Verbesserungspotential aufzuzeigen, wurden die Rückhaltesysteme mit Schwerpunkt auf die frühe Auslösung mittels einer Fahrumgebungssensorik 80 Millisekunden vor Erstkontakt ausgelegt. Nachdem aber nicht von einer 100 prozentigen Erkennungsrate ausgegangen werden kann, muss auch die Auslösung der gefundenen Schutzsysteme mit den konventionellen Triggersystemen beachtet werden.

Im Zuge dieser Untersuchung wurde festgestellt, dass der Spagat zwischen den beiden zeitlichen Auslöseszenarien auch mit dem sehr variabel einstellbaren Rückhaltesystem (z.B.: Öffnungszeitpunkt aktives Vent, Umschaltzeitpunkt auf niedriges Kraftbegrenzungsniveau) nur schwierig zu finden ist. Die Grundanforderung bei der Auslegung war, bei der Frühauslösung möglichst viel Potential aufzuzeigen und im Fall einer konventionellen Auslösung nicht schlechter zu sein, als mit den Serienrückhaltesystemen im Referenzfahrzeug. Dieses Ziel konnte im ersten Schritt nicht zu 100% erreicht werden. Abhängig von Lastfall und Dummy waren die Belastungen etwa gleich oder geringfügig höher. Es wurden jedoch einige mögliche Ansatzpunkte angeführt, mit denen an dieser Stelle noch Verbesserungen erzielt werden können.

Im Folgenden werden beispielhaft die Ergebnisse in den beiden heutzutage relevanten Rating-Tests (50%-Dummy, EuroNCAP und 5%-Frau, US-NCAP) beschrieben:

Im Fall der Frühauslösung sind beim 50%-Dummy die Verbesserungen der Kopf- und Nackenbelastung im Wesentlichen auf den größeren Airbag und die optimierte Form zurückzuführen. Durch die länger anliegende Strahfkraft und dem dadurch möglichen geringeren Kraftbegrenzungsniveau gelingt es, die Brusteindrückung gegenüber der Basis ebenfalls deutlich zu reduzieren. In der folgenden Abbildung ist aber ersichtlich, dass trotz dieser Verbesserungen die volle Punktezahl beim Rating nicht erreicht wird. Dies liegt insbesondere an den Belastungen der Unterschenkel, welche neben dem Sitz und der Beckenanbindung auch maßgeblich von den geometrischen Verhältnissen und der Nachgiebigkeit im Fußraum bestimmt werden. Der Fußraum blieb jedoch im Vergleich zur Basis unverändert. Im Fall der konventionellen Auslösung der neuartigen Rückhaltesysteme kommt es insbesondere im Bereich des Kopfes zu Erhöhungen der Belastungen, es reicht aber nach wie vor, um die volle Punktezahl im Kopf- und Nackenbereich zu erreichen. Somit ist die Summenbelastung bei konventioneller Auslösung vergleichbar mit jener des Referenzfahrzeuges.





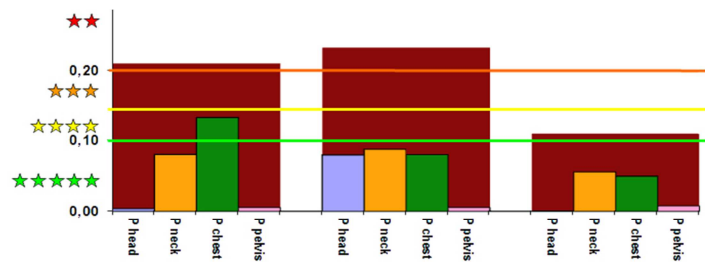
Dateiname		Basis_50th_FD		PreRHS_50thFD_konv. ZZf		PreRHS_50thFD_frühe ZZf	
Euro-NCAP Bewertung 							
		Werte	Punkte	Werte	Punkte	Werte	Punkte
Kopf / Hals	HIC36	487,1	4,00	658,7	4,00	273,2	4,00
	a3ms Kopf [g]	58,4		58,6		45,9	
	amax Kopf [g]	58,9		58,8		46,2	
	Zugkraft [kN]	0,71		1,11		0,48	
	Scherkraft [kN]	0		0		0,00	
	Moment [N.m]	26,841		40,56		32,34	
Brust	Brusteindrückung [mm]	29,3	2,957	29,4	2,943	22,5	3,929
	VC [m/s]	n/a		n/a		n/a	
Oberschenkel	Kraft max l. [kN]	2,79	4	2,75	4	2,91	4
	Knieverschiebung l. [mm]	0,18		0,25		0,13	
	Kraft max r. [kN]	1,53		1,96		0,75	
	Knieverschiebung r. [mm]	0,98		2,26		2,64	
Unterschenkel	Kraft max l. [kN]	4,17	2,556	3,75	2,831	3,59	2,937
	Tibia Index l.	0,61		0,59		0,62	
	Kraft max r. [kN]	2,50		1,89		2,17	
	Tibia Index r.	0,46		0,39		0,4	
Euro-NCAP Score		13,513		13,774		14,866	

Abbildung 117: Vergleich Insassenbelastungen 50%-EuroNCAP bei Basis, konventioneller und früher Auslösung

Im Fall der 5%-Frau beim US-NCAP-Rating zeigt sich bei der Frühauslösung auch eine deutliche Verbesserung der Werte insbesondere durch die Verringerung der Brusteindrückung. Hingegen führen die stark erhöhten Kopfbelastungen im Fall der konventionellen Auslösung dazu, dass das Gesamtergebnis trotz der geringeren Brusteindrückung geringfügig schlechter ist als beim Referenzfahrzeug mit den Serienrückhaltesystemen. Wie im Kapitel 6.5.3 erläutert, gibt es verschiedene Ansätze, um auch im Falle einer konventionellen Auslösung die Belastungen zu reduzieren. So könnte beispielsweise der Querschnitt des aktiven Vents vergrößert werden, was direkt zu Verbesserungen der Kopfbelastungen führt. Die größeren Verluste bei einer frühen Auslösung könnten durch einen späteren Öffnungszeitpunkt des aktiven Vents kompensiert werden.



		Basis_05th_FH		PreRHS_05thFH_konv. ZZP		PreRHS_05thFH_frühe ZZP	
Kopf	HIC 15	241	0,004	609	0,080	142	0,000
	Nce	0,064		0,005		0,201	
Neck	Ncf	0,402		0,438		0,203	
	Nte	0,363	0,080	0,451	0,088	0,200	0,056
	Ntf	0,293		0,145		0,078	
	Neck Tension [kN]	0,787		0,398		0,343	
	Neck Comp. [kN]	0,825		1,537		0,422	
	Chest	Chest Deflection [mm]	33,3	0,133	28,8	0,080	2,50E+01
Femur	Compression links [kN]	0,780		0,793		1,241	
	Compression rechts [kN]	0,571	0,005	0,307	0,006	0,172	0,008
P joint		0,210		0,232		0,110	

Abbildung 118: Vergleich Insassenbelastungen 05%-USNCAP bei Basis, konventioneller und früher Auslösung

Neben den Belastungen in den unterschiedlichen Crash-Konfigurationen war auch das Verletzungsrisiko bei OoP-Situationen Thema dieser Untersuchung. Dabei konnten in einer Reihe von Tests mit dem neuartigen, für die langsame Befüllung ausgelegten Gasgenerator teilweise deutlich reduzierte Belastungen für den Insassen festgestellt werden. Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen und die Verbesserungen auf die langsame Befüllung zurückführen zu können, wurde versucht, gegenüber dem Serienmodul so wenig wie möglich zu verändern.

Ergebnisse mit der aktuellen Airbagform, die bei den In-Crash-Lastfällen zum Einsatz kommt, sind noch ausständig, es wird aber davon ausgegangen, dass die bereits gezeigten Verbesserungen auch in diesem Fall erreicht werden können.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass eine sehr frühzeitige Straffung des Sicherheitsgurtes nur unter bestimmten Randbedingungen (Freiraum hinter dem Insassen; angepasste Gurtgeometrie) deutliche Vorteile für den Insassenschutz bringen kann. Hingegen konnten durch eine, über längere Zeit beziehungsweise über den Straffweg gleichmäßig anliegende Straffkraft auch bei konventionellen Straffzeitpunkten deutliche Verbesserungen bei der Brustbelastung erreicht werden. Durch eine frühzeitige Auslösung des Airbags, dessen Geometrie entsprechend angepasst sein muss, können erhebliche Verringerungen der Kopf- und Nackenbelastungen erzielt werden. Des Weiteren ergeben sich auch hinsichtlich der Belastungen in OoP-Situationen Vorteile aufgrund der langsameren und damit sanfteren Befüllung des Luftsackes. Es konnte also ein vielversprechendes Gesamtkonzept mit früh ausgelösten Rückhaltesystemen entwickelt werden.

Es liegt nun an den Sensor-Herstellern, die Systeme hinsichtlich Detektionsrate und Erkennungssicherheit weiterzuentwickeln. Erst wenn die Auslösesysteme in ausreichender Anzahl Kollisionen frühzeitig erkennen und in weiterer Folge tatsächlich derartige Schutzsysteme aktivieren, können effektiv Verletzungen verhindert oder abgeschwächt werden, wodurch ein Einbau solcher Systeme für einen Fahrzeughersteller attraktiv wird.

Je häufiger und sicherer die Auslösesysteme Kollisionen erkennen, umso stärker kann auch in weiterer Folge bei der Abstimmung der Systeme der Fokus auf die Frühauslösung gelegt werden. Damit erscheinen in weiterer Zukunft noch weitere Verbesserungen des Insassenschutzes möglich zu sein.

8 Anhang

8.1 Relevante Verletzungskriterien

Damit eine Verbesserung des Insassenschutzes überhaupt möglich ist, muss das Verletzungsrisiko der Fahrzeuginsassen während eines Unfalls objektiv quantifizierbar sein. In der Fahrzeugsicherheit werden daher physikalisch messbare Größen, wie zum Beispiel Kräfte, Momente, Beschleunigungen, einem Verletzungsrisiko zugeordnet. Das Verletzungsrisiko kann zum Beispiel in der 7-stufigen AIS-Skala (AIS ...Abbreviated Injury Scale) klassifiziert werden.

Es gibt für die verschiedenen Körperregionen viele unterschiedliche Verletzungskriterien, anhand derer die Belastung des Insassen während der Kollision bestimmt werden kann. Im Folgenden werden die für diese Arbeit wesentlichen Kriterien kurz beschrieben.

8.1.1 Kopf/Nacken

Der Kopf und das Gesicht sind bei Frontalkollisionen am häufigsten von Verletzungen betroffen [53, 2006b], während dem Nacken insbesondere beim Heckaufprall große Bedeutung zukommt. Beim Kopf werden bis dato nur lineare Beschleunigungen beurteilt. Es gibt Verletzungskriterien (z.B.: GAMBIT - [66, 1986]), die neben den translatorischen auch den Einfluss von rotatorischen Beschleunigungen auf das Risiko für Hirnverletzungen berücksichtigen. Diese sind derzeit jedoch außer in Spezialfragestellungen kaum in Verwendung und nicht in den gesetzlichen oder Verbraucherschutztests vorgesehen.

8.1.1.1 3ms Beschleunigung

Die berühmte Wayne-State-Tolerance Curve (WSTC) beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Maximalniveau und der Einwirkdauer einer Beschleunigung bei der Entstehung von Gehirnverletzungen. Dabei zeigt sich, dass extrem hohe Beschleunigungen, die nur über einen sehr kurzen Zeitraum wirken, vergleichbare Verletzungen verursachen, wie geringere Beschleunigungen über einen längeren Zeitraum.

Darauf basierend wurde ermittelt, dass eine Beschleunigung von 80g nicht länger als drei Millisekunden auf den Kopf wirken sollte. Dieser Wert ist in Testvorschriften weit verbreitet [73, 2010h].

8.1.1.2 HIC – Head Injury Criterion

Die Wayne-State-Tolerance-Curve bildet auch die Grundlage für das Head Injury Criterion, welches einen experimentell ermittelten Zusammenhang zwischen der resultierenden translatorischen Beschleunigung im Kopfschwerpunkt, der Einwirkdauer und dem Risiko für lebensgefährliche Kopfverletzungen herstellt.

$$HIC = \max \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} \cdot (t_2 - t_1)$$

Gleichung 2: Berechnung des Head Injury Criterion²³

Bei einem HIC-Wert von 1000, gemessen über einen Zeitraum von 36 Millisekunden, hat ein 50%-Mann etwa ein 50 prozentiges Risiko, eine schwere Kopfverletzung (AIS 3+ Verletzung) zu erleiden. Für die 5%-Frau wird der Betrachtungszeitraum kürzer gewählt (HIC15...15 Millisekunden), der zugehörige Grenzwert beträgt 700 [73, 2010h].

²³ aus [14, 2005a], Seite 8

8.1.1.3 N_{ij} – Normalized Neck Injury Criterion

Durch unterschiedliche Belastungssituationen im Nacken kann es bei einer Kollision zu Brüchen der Wirbelkörper und in weiterer Folge zu Verletzungen des Rückenmarkes kommen. Es wird dabei zwischen einer axialen Zug- oder Druckkraft sowie einem Flexions-, bzw. Extensionsmoment unterschieden. Während eines Unfalls führt immer die Kombination dieser beiden Lasten zu einer Verletzung. Aus diesem Grund wird mit dem N_{ij} -Kriterium die Summen-Belastung beurteilt.

$$N_{ij} = \frac{My}{My_{krit}} + \frac{Fz}{Fz_{krit}}$$

Gleichung 3: Berechnung des N_{ij} -Wertes²⁴

Für die vier Belastungsrichtungen gibt es jeweils unterschiedliche biomechanische Grenzwerte. Aus diesem Grund werden auch vier N_{ij} -Werte ermittelt, jeweils die Kombination aus Kraft und Moment. So kann es passieren, dass ein oder mehrere N_{ij} -Werte überschritten werden, obwohl die maximale Kraft und das maximale Moment noch deutlich unter den Grenzwerten liegen.

Zusätzlich werden in den Vorschriften auch noch Maximalwerte für Nackenkräfte und Nackenmomente festgeschrieben.

8.1.2 Thorax/Abdomen/Pelvis

Bei fast 55% aller Frontalkollisionen kommt es zu Verletzungen in einer oder mehrerer dieser drei Körperregionen [53, 2006b]. Hauptsächlich handelt es sich dabei um Verletzungen nach einem stumpfen Anprall, wie beispielsweise Rippenbrüche oder Verletzungen der inneren Organe [49, 2008d]. Man unterscheidet grundsätzlich die drei Verletzungsmechanismen Kompression, viskose Verletzungen infolge von Druckwellen im Körper und Trägheitsverletzungen der inneren Organe [73, 2010h].

Dementsprechend gibt es auch verschiedene Verletzungskriterien, die diese Belastungen auf den Insassen quantitativ erfassbar machen.

8.1.2.1 Brusteindrückung

Durch eine starke Eindrückung des Brustkorbes kann es zu Brüchen von Rippen kommen, die in weiterer Folge das Lungengewebe verletzen können. Eine große Gefahr geht auch von einer Verletzung von Blutgefäßen im Bereich des Brustkorbes aus. Aus diesem Grund wird die maximale Eindrückung des Brustkorbes, gemessen in der Höhe des Brustbeins, begrenzt.

8.1.2.2 Viscous Criterion

Es wurde festgestellt, dass Brustverletzungen neben der Kompression auch wesentlich von der Eindrückgeschwindigkeit abhängen. Das Viscous Criterion ist ein Verletzungskriterium, das mit dem Verletzungsrisiko für Brustverletzungen gut korreliert ist.

$$VC = \frac{d(D(t))}{dt} \cdot \frac{D(t)}{b}$$

Gleichung 4: Berechnung des Viscous Criterion²⁵

In der obigen Gleichung stellt der Wert D die aktuelle Eindrückung des Brustbeins dar. Der Parameter b steht für die unverformte Dicke des Brustkorbes. Dieses Kriterium wird auch bei einem Seitenanprall angewandt, dabei ist die seitliche Rippeneindrückung der relevante Messwert. Der gesetzliche Grenzwert beträgt für beide Fälle 1 m/s.

²⁴ aus [14, 2005a], Seite 49

²⁵ aus [14, 2005a], Seite 64

8.1.2.3 3ms Beschleunigung Thorax

Unter Trägheitsverletzungen versteht man innere Verletzungen, die auftreten können, wenn sich die Organe im Inneren des Körpers infolge von Beschleunigungen relativ zum Torso bewegen. In dem amerikanischen Zulassungstest FMVSS208 spielt die Brustbeschleunigung beispielsweise im Combined Thoracic Index (CTI) eine wesentliche Rolle. Der biomechanische Grenzwert für die 3ms-Thoraxbeschleunigung beträgt dabei 85g.

Die Gurtkräfte sind neben den Belastungen durch den Airbag und das Lenkrad der wesentliche Einflussfaktor für das Verletzungsrisiko im Bereich des Thorax beziehungsweise Abdomen. Der Einsatz von Kraftbegrenzern im Gurtsystem führte zu deutlichen Verringerungen der Belastungen. Trotzdem kann es insbesondere durch einen nicht richtig angelegten Gurt oder durch „Submarining“ zu schweren Unterleibsverletzungen kommen [2, 2010a], [45, 2010e]. In einer Untersuchung mit PMHS (Post Mortem Human Surrogate) wurde ermittelt, dass es bei ungünstiger Gurtführung über dem Abdomen ab ca. sieben Kilonewton zu inneren Verletzungen kommen kann [79, 2002].

8.1.3 Untere Extremitäten

Verletzungen der unteren Extremitäten sind zumeist nicht lebensgefährlich, deren Heilung kann aber mitunter sehr langwierig sein. In erster Linie kommt es durch den Anprall am Armaturenbrett zu Brüchen infolge hoher axialer Belastung, Biegung oder Torsion der Knochen. Einflussgrößen sind dabei unter anderem der Abstand der Knie zur Instrumententafel, die Stellung der Unterschenkel und der Sitzwinkel [42, 2010d]. Am häufigsten sind dabei die Knöchel, Knie und Unterschenkel von Verletzungen betroffen [73, 2010h].

Es gibt verschiedene Verletzungskriterien, die das Risiko einer Verletzung der unteren Extremitäten beschreiben.

8.1.3.1 Femur Fz

In Versuchen wurde gezeigt, dass der Oberschenkelknochen unter Kompression in Längsrichtung ab einer Kraft von etwa 7,5 Kilonewton bricht. Zusätzlich überlagerte Lastkomponenten wie Biegung oder Torsion können diesen Wert herabsenken [73, 2010h]. In der europäischen ECE R94 Regelung wird mit dem Femur Force Criterion (FFC) die axiale Oberschenkelkraft sowie die Einwirkdauer vorgegeben. Dabei werden für sehr kurze Zeiten auch höhere Kräfte erlaubt. Beim EuroNCAP-Rating wird ähnlich vorgegangen, die Maximalbelastung für die volle Punktezahl bei den Oberschenkeln liegt allerdings schon bei etwa 3,8 Kilonewton.

8.1.3.2 Knee Slider

Im Kniegelenk kann es durch ungünstige Krafteinleitung zu einer relativen Verschiebung zwischen Unterschenkel und Kniegelenk kommen, was zu einem großen Risiko für Bänderverletzungen führt [53, 2006b]. Im Hybrid III Dummy kann diese Verschiebung gemessen werden und im EuroNCAP-Rating wird sie für die volle Punktezahl auf sechs Millimeter begrenzt.

8.1.3.3 Tibia Index

Mit dem Tibia Index kann das Risiko eines Bruches des Schienbeins bewertet werden. Dabei werden die axiale Druckkraft sowie das Biegemoment berücksichtigt. Der Tibia Index berechnet sich folgendermaßen:

$$TI = \frac{M}{M_{krit}} + \frac{F}{F_{krit}}$$

Gleichung 5: Berechnung des Tibia Index ²⁶

²⁶ aus [14, 2005a], Seite 105

Die biomechanischen Grenzwerte wurden in den 1970er Jahren für den 50%-Mann ermittelt und durch Skalierung auf die 5%-Frau und den 95%-Mann übertragen. Mit dem voll instrumentierten Unterschenkel des Hybrid III Dummys kann dieses Verletzungskriterium beim Knie und beim Knöchel berechnet werden. Ab einem Wert von 1,3 werden dabei beim EuroNCAP-Rating für den betreffenden Unterschenkel keine Punkte mehr vergeben.

8.1.4 Grenzwerte der Verletzungskriterien für die einzelnen Lastfälle

Im Folgenden werden die Grenzwerte der einzelnen Verletzungskriterien in den drei verschiedenen betrachteten Lastfällen auszugsweise aufgelistet. Dabei kommen jeweils nur der 50%-Mann oder die 5%-Frau zum Einsatz, somit liegen beispielsweise für die 5%-Frau im EuroNCAP Lastfall keine Grenzwerte vor. In diesen Fällen (alle Lastfälle 95%-Dummy) wird versucht, anhand derselben Verletzungskriterien eine Auslegung mit minimaler Insassenbelastung zu erreichen.

8.1.4.1 US-NCAP

Im US-NCAP-Rating wird gibt es keine expliziten Grenzwerte von Verletzungskriterien, sondern es wird anhand von experimentell ermittelten „Injury Risk Curves“ das Risiko für eine bestimmte Verletzungsschwere bestimmt.

Für die 5%-Frau, die auf der Beifahrerseite zum Einsatz kommt, lauten diese Funktionen folgendermaßen:

$$P_{head}(AIS3+) = \Phi\left(\frac{\ln(HIC15) - 7.45231}{0.73998}\right)$$

$$P_{Chest\ Deflection}(AIS3+) = \frac{1}{1 + e^{10.5456 - 1.7212 \cdot (Chest\ Deflection)^{0.4612}}}$$

$$P_{Femur}(AIS2+) = \frac{1}{1 + e^{5.7949 - 0.7619 \cdot Femur\ Force}}$$

$$P_{Neck-Nij}(AIS3+) = \max\left(\frac{1}{1 + e^{3.2269 - 1.9688 \cdot Nij}}\right)$$

$$P_{Neck-Tension}(AIS3+) = \frac{1}{1 + e^{10.958 - 3.770 \cdot Neck-Tension}}$$

$$P_{Neck-Compression}(AIS3+) = \frac{1}{1 + e^{10.958 - 3.770 \cdot Neck-Compression}}$$

$$P_{Neck} = \max(P_{Neck-Nij}, P_{Neck-Tension}, P_{Neck-Compression})$$

$$P_{joint} = 1 - (1 - P_{Head}) \cdot (1 - P_{Neck}) \cdot (1 - P_{Chest}) \cdot (1 - P_{Femur})$$

Gleichung 6: Formeln für die Berechnung des Rating-Ergebnisses beim US-NCAP-Rating. Die roten Werte stellen die Dummy-Messwerte der 5%-Frau dar.²⁷

Bis zu einem Wert von 10% des kombinierten Verletzungsrisikos erreicht das Fahrzeug die volle US-NCAP-Punktezahl für den Frontalanprall. In einer Studie für adaptive Rückhaltesysteme wurden für das Erreichen der vollen Punktezahl folgende „Grenzwerte“ der einzelnen Verletzungskriterien empfohlen [78, 2009f]: Das Ziel der Auslegung sollte eine Brusteingdrückung kleiner als 19 Millimeter sein, die N_{ij} -Werte maximal 0,3 betragen, der HIC15-Wert sollte geringer als 250 sein und die Oberschenkelkräfte sollten 1,5 Kilonewton nicht übersteigen.

8.1.4.2 EuroNCAP

Wie beim US-NCAP gibt es auch beim EuroNCAP-Rating keine expliziten Grenzwerte für das Bestehen oder nicht Bestehen dieses Tests. Es werden Belastungsgrenzen definiert, bei deren Unterschreitung die maximale Punktezahl von vier für ein bestimmtes Verletzungskriterium erreicht

²⁷ aus [11, 2011a], Seite 31

wird. Zusätzlich gibt es noch einen zweiten Wert, ab welchem keine Punkte mehr vergeben werden. Dieser Wert liegt in etwa bei den Grenzwerten von gesetzlich vorgeschriebenen Tests wie ECE-R94 oder FMVSS208. Liegt der gemessene Wert des Verletzungskriteriums zwischen diesen beiden Werten, wird die resultierende Punktzahl durch eine lineare Interpolation ermittelt. In der folgenden Abbildung sind die Grenzwerte dargestellt:

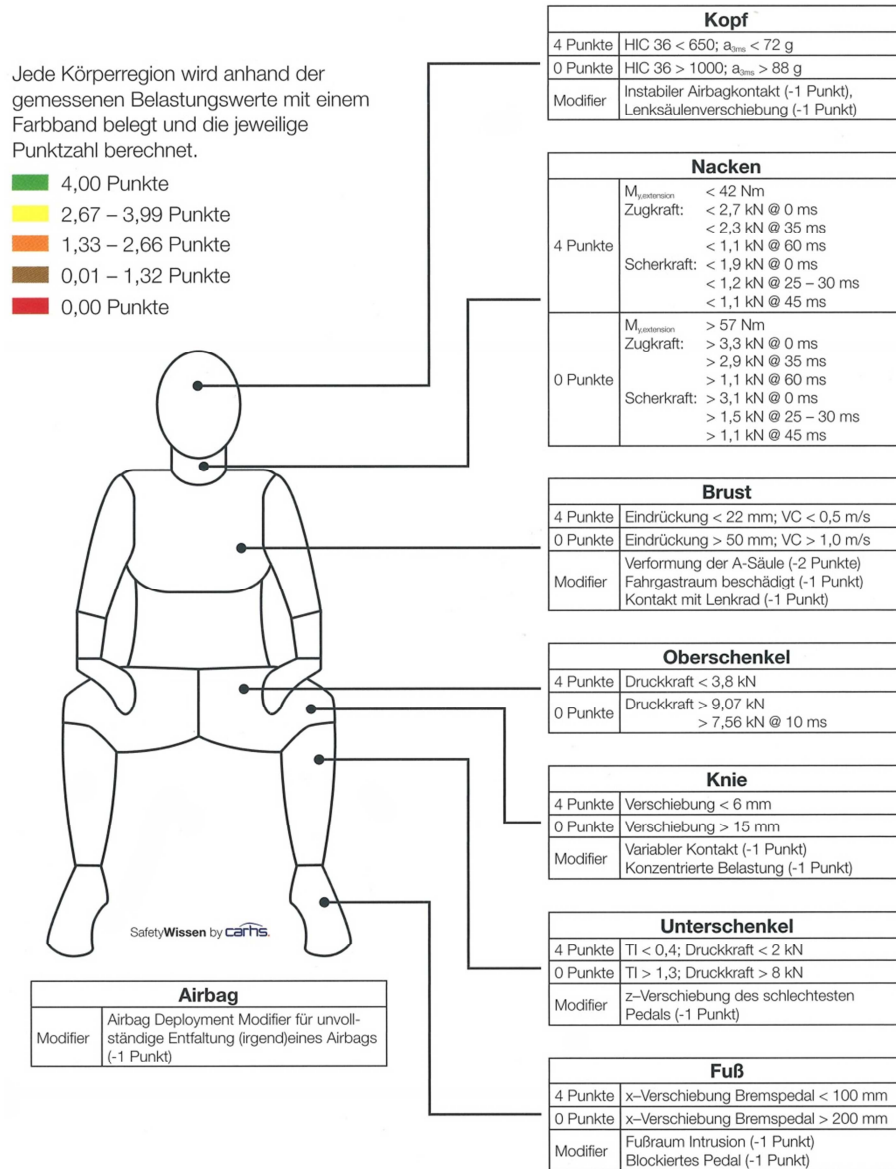


Abbildung 119: Belastungsgrenzen für das EuroNCAP-Rating im Frontal-Lastfall ²⁸

Die minimalen Werte von den Körperregionen Kopf+Nacken, Brust, Oberschenkel+Knie, Unterschenkel+Fuß werden addiert und ergeben eine Gesamtpunktzahl für die Untersuchung des Insassenschutzes im Frontalaufprall.

Bei Realversuchen können noch sogenannte „Modifier“ vergeben werden, wenn ein besonderes Verletzungsrisiko im Verhalten des Fahrzeuges während des Crashes erkannt wird.

8.1.4.3 FMVSS208

Will ein Fahrzeughersteller ein Fahrzeug in den USA zulassen, müssen unter anderem die in der Zulassungsnorm „FMVSS 208“ vorgeschriebenen Tests bestanden werden. Die vorgeschriebenen

²⁸ aus [10, 2010b], Seite 27

Grenzwerte einzelner Verletzungskriterien dürfen dabei nicht überschritten werden. In der folgenden Tabelle werden die einzelnen Werte aufgelistet:

Verletzungskriterium	Grenzwert
HIC36	1000 [-]
HIC15	700 [-]
3ms-Thorax-Beschleunigung	60 [g]
Brusteindrückung	63 [mm]
Oberschenkelkraft Fz	10 [kN]
Nij-Werte	1 [-]
Nij - krit. Nackenextensionsmoment (-)	135 [Nm]
Nij - krit. Nackenflexionsmoment (+)	310 [Nm]
Nij - krit. Nackenzugkraft (+)	6806 [N]
Nij - krit. Nackendruckkraft (-)	6160 [N]
Nackenzugkraft Fz (+)	4170 [N]
Nackendruckkraft Fz (-)	4000 [N]

Abbildung 120: Grenzwerte der Verletzungskriterien für den FMVSS208-Lastfall [65]

Üblicherweise werden die Fahrzeuge für die Rating-Tests ausgelegt, da diese die höheren Anforderungen an die Rückhaltesysteme darstellen.

8.2 Referenzfahrzeug – Basislastfälle

In der vorliegenden Arbeit wird das Verbesserungspotential des Insassenschutzes von früh ausgelösten Rückhaltesystemen durch den Vergleich mit einem aktuellen Fahrzeug dargelegt. Nachfolgend werden die Rückhaltesysteme dieses Fahrzeuges kurz beschrieben, damit neben den einzelnen Verletzungskriterien auch der technische Aufwand verglichen werden kann.

8.2.1 Beschreibung der Rückhaltesysteme des Referenzfahrzeuges

Das untersuchte Referenzfahrzeug wurde im Jahr 2005 am Markt eingeführt und damit wurden einige innovative, insbesondere vorausschauende Insassenschutzsysteme in Serie umgesetzt. Im Folgenden werden die passiven Insassenschutzsysteme auf der Beifahrerseite kurz vorgestellt.

8.2.1.1 Gurtsystem

Das Fahrzeug verfügt über einen 3-Punkt Gurt mit zwei verschiedenen Straffern und einen Gurtkraftbegrenzer. Im Fall, dass das Airbagsteuergerät eine bevorstehende Kollision erkennt, wird mittels eines elektrischen, reversiblen Gurtstraffers in der B-Säule der Gurt gestrafft. Somit wird verhindert, dass sich der Insasse durch eine eventuelle Vollbremsung vor dem Aufprall vorverlagert [75, 2005d] und die Reduktion der Gurtlose führt zu einer besseren Ankopplung des Insassen an die Fahrzeugverzögerung. Im Fall, dass die Kollision zum Beispiel durch eine Vollbremsung vermieden werden kann, steht dieser reversible Straffer weiterhin mit der vollen Funktion zur Verfügung.

Bei einer tatsächlichen Kollision wird zu einem bestimmten Zeitpunkt, abhängig vom Crashpuls, ein pyrotechnischer Gurtstraffer gezündet, der das Gurtschloss einzieht und somit den Beckengurt strafft. Nach dem Straffvorgang verrastet sich dieser Straffer, sodass eine bestmögliche Beckenrückhaltung gewährleistet wird. Dies ist insbesondere für die Belastung der unteren Extremitäten wichtig.

In der B-Säule ist im Retraktor ein Gurtkraftbegrenzer mit einer degressiven Kraft-Weg-Charakteristik integriert, welcher die Kräfte im Schultergurt auf ein biomechanisch ertragbares Maß begrenzt. Die degressive Charakteristik bewirkt, dass sich innerhalb eines kurzen Weges hohe Rückhaltekräfte aufbauen können, der Insasse koppelt also schnell an die Fahrzeugverzögerung an. Ab einem gewissen Auszugsweg, nimmt die Rückhaltekraft ab, so dass die auf den Insassen wirkenden Rückhaltekräfte beim dem Kontakt mit dem Airbag nicht zu hoch werden. Somit kann insbesondere bei Beginn der Vorverlagerung des Insassen schon eine sehr gute Rückhaltung erreicht und der verfügbare Weg zur

Verzögerung gut ausgenutzt werden. Die Abstimmung dieses Kraftbegrenzers für die beiden konträren Anforderungen, ausreichend Nachgiebigkeit bei der 5%-Frau, aber trotzdem genügend Rückhaltekräfte beim 50%-Mann beziehungsweise 95%-Mann stellen dabei eine große Herausforderung dar.

8.2.1.2 Airbagsystem

Der Beifahrerairbag wird durch einen zweistufigen, pyrotechnischen Gasgenerator befüllt, wobei die beiden Stufen bei unterschiedlichen Lastfällen mit verschiedenen zeitlichen Abständen gezündet werden.

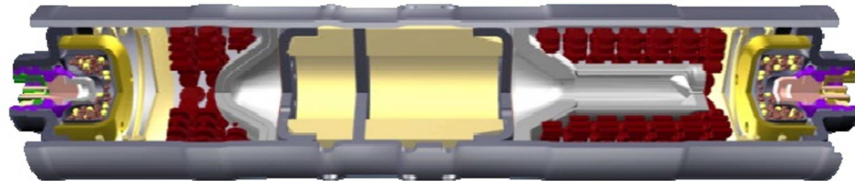


Abbildung 121: Schematische Darstellung des Gasgenerators des Referenzfahrzeuges ²⁹

So ist es möglich, für unterschiedlich lang andauernde Crashpulse (z.B.: EuroNCAP vs. US-NCAP) eine ausreichend lange Airbag-Standzeit zu gewährleisten. Mit der ersten Stufe werden auch die OoP-Tests durchgeführt.

Im Serienfahrzeug werden mit einer einzigen Airbagform ohne Variabilität alle Kombinationen von Insassengrößen und Lastfällen abgedeckt. Dies führt dazu, dass die 5%-Frau tendenziell Gefahr läuft, vom Airbag während dessen Entfaltung angeschossen zu werden.

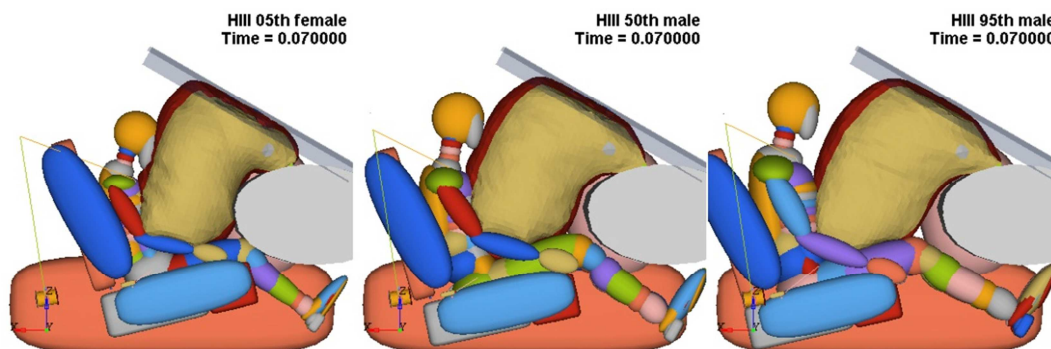


Abbildung 122: Unterschiedliche Dummys mit dem Serien-Airbag des Referenzfahrzeuges 70ms nach t_0

Der 50%-Mann und insbesondere der 95%-Mann treffen erst „spät“ auf den Airbag, womit höhere Kopf- und Nackenbelastungen einhergehen.

In dem Luftsack befindet sich eine kreisrunde Ausströmöffnung mit einem Durchmesser von 50mm. Der effektive Abströmquerschnitt bestimmt die Dämpfung und damit die „Härte“ des Airbags, die dem Dummy entgegenwirkt. Die obere Grenze für die Wahl des Ventdurchmessers ist der EuroNCAP-Lastfall mit dem 50%-Mann, bei dem ein Durchschlagen des Insassenkopfes auf die Instrumententafel verhindert werden muss. Dagegen wird der Mindestdurchmesser durch die 5%-Frau bestimmt. Es muss genügend Gas austreten können, sodass damit der Airbag nicht zu hart ist und eine gewisse Vorverlagerung von leichten Fahrzeuginsassen erlaubt.

8.2.2 Insassenbelastungen mit Serien-Rückhaltesystemen

Im Folgenden werden die Belastungskennwerte für die einzelnen Dummys in den verschiedenen Lastfällen aufgelistet. Dabei handelt es sich nicht um einzelne Versuchskurven, sondern um die

²⁹ aus [87], Seite 10

Ergebnisse des aufwändig validierten und prognosefähigen Simulationsmodells des Referenzfahrzeuges. Es ist zu beachten, dass diese Werte das Ergebnis einer umfangreichen Serienentwicklung sind, welche neben den drei in dieser Studie untersuchten Hauptlastfällen noch weitere Anforderungen erfüllen. Diese Ergebnisse sind die Ausgangsbasis für die Darlegung des Verbesserungspotentials.

8.2.2.1 5%-Frau

Wie oben beschrieben, ist die Abstimmung für die 5%-Frau bei einem Airbagsystem ohne jegliche Adaptivität im Allgemeinen zu hart, wenn das Durchschlagen von schwereren Dummies auf die Instrumententafel verhindert werden muss.

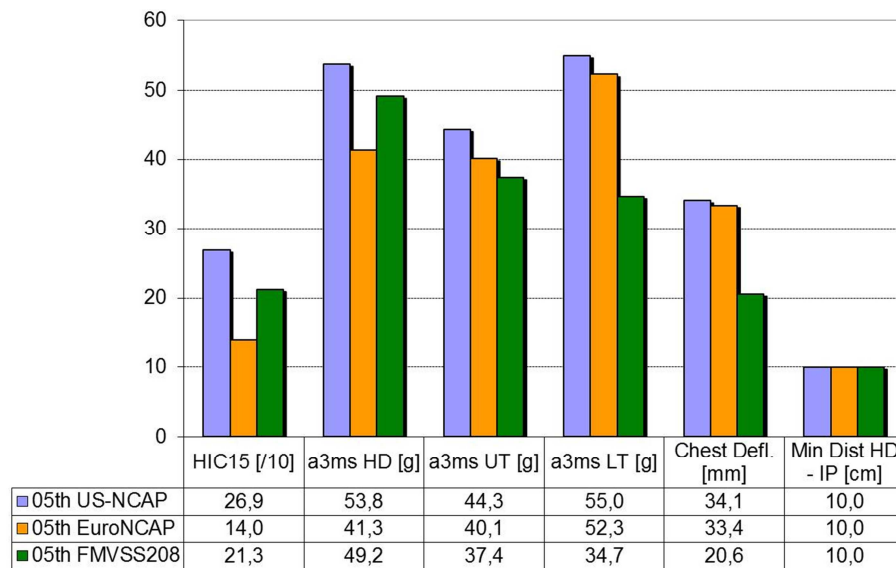


Abbildung 123: Ausgewählte Verletzungskriterien der 5%-Frau bei verschiedenen Lastfällen

In der obigen Abbildung sind die Werte einzelner Verletzungskriterien der 5%-Frau aufgelistet. Es ist zu beachten, dass dieser Dummy auf der Beifahrerseite nur im US-NCAP-Rating ab dem Modelljahr 2011 bewertet wird.

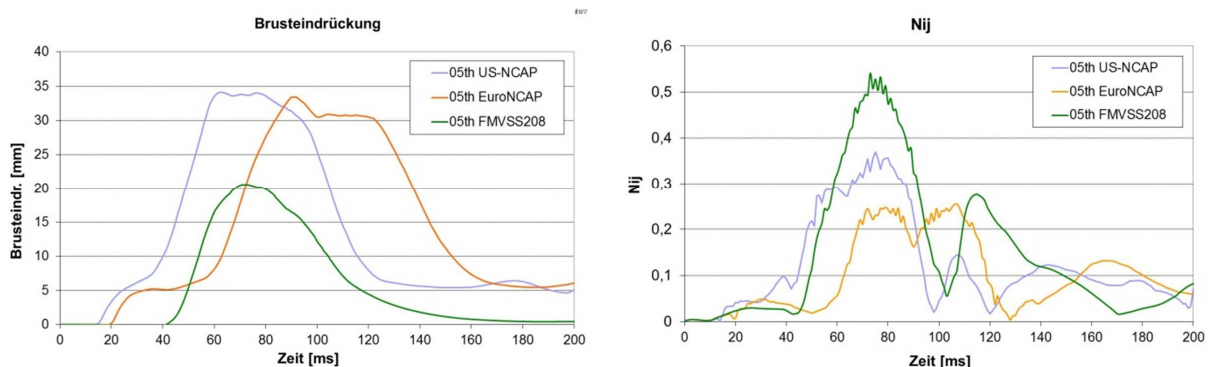


Abbildung 124: Zeitliche Verläufe der Brusteingdrückung und der N_{ij} -Werte der 5%-Frau bei verschiedenen Lastfällen

Hauptsächlich wegen des relativ hohen Wertes der Brusteingdrückung würde das Referenzfahrzeug bei diesem Rating für den Frontalaufprall nicht die volle Punktezahl erreichen. Dies liegt daran, dass sich die Anforderungen an die passive Sicherheit von Fahrzeugen seit der Markteinführung im Jahr 2005, insbesondere durch die stärkere Bedeutung der 5%-Frau, deutlich gesteigert haben.

8.2.2.2 50%-Mann

Der 50%-Mann war bei der Entwicklung des Vergleichsfahrzeuges der maßgebliche Dummy, weil er in den meisten Tests zum Einsatz kam. Inzwischen wurde dieser Dummy, wie schon beschrieben, beim US-NCAP-Rating durch den 5%-Frau-Dummy ersetzt.

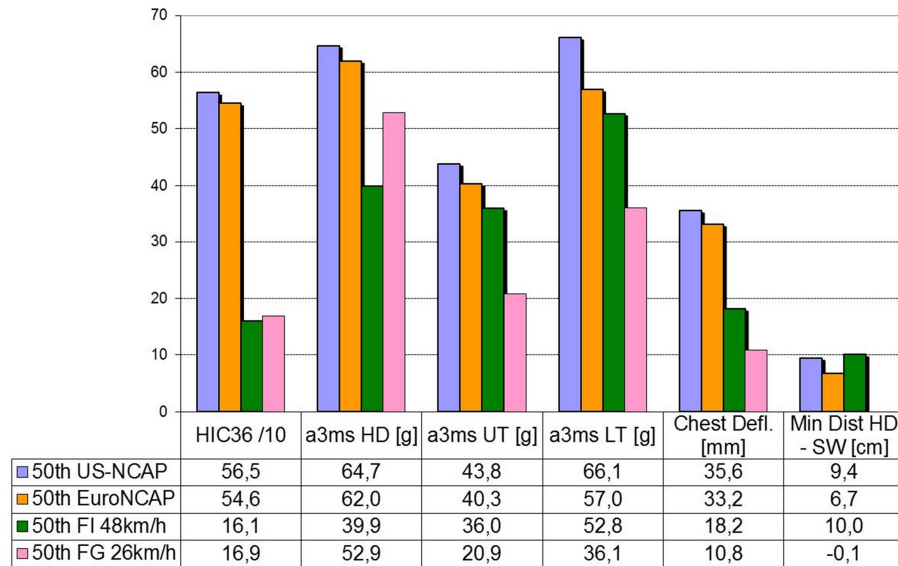


Abbildung 125: Ausgewählte Verletzungskriterien des 50%-Mannes bei verschiedenen Lastfällen

In der obigen Abbildung sind auch die Ergebnisse der beiden ungegurteten Lastfälle (FI: FMVSS208, 48km/h und FG: FMVSS208, 26km/h) dargestellt. Dabei muss beachtet werden, dass der FG-Lastfall die Gasgeneratorleistung für die OoP-Tests definiert. Bei diesem Test wird also nur die erste der beiden Gasgeneratorstufen gezündet.

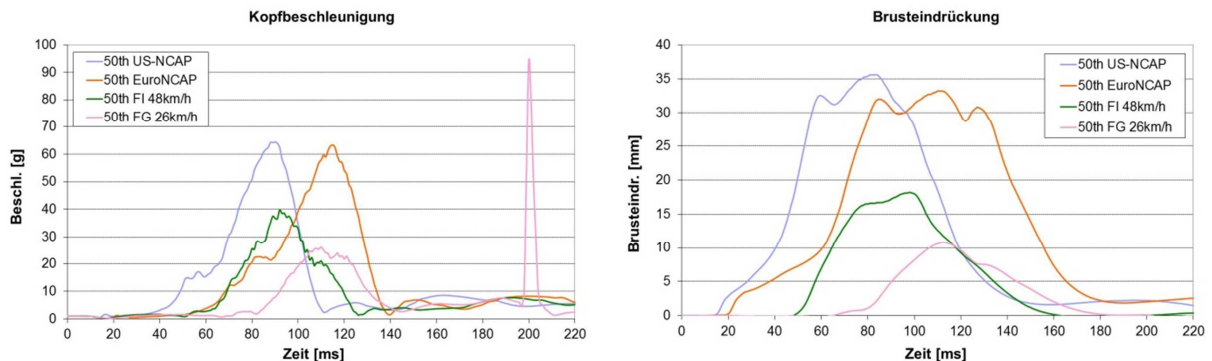


Abbildung 126: Zeitliche Verläufe Kopfbeschleunigung und der Brusteingdrückung des 50%-Mannes bei verschiedenen Lastfällen

In der Simulation kommt es dabei zu einem leichten Durchschlag des Kopfes nach etwa 200 Millisekunden. Dieser Effekt tritt allerdings im Realversuch nicht auf. Für das EuroNCAP-Rating sind die relativ starke Brusteingdrückung und die hohen Unterschenkelbelastungen (Unterschenkeldruckkraft links = 4,4 Kilonewton) maßgeblich.

8.2.2.3 95%-Mann

Wie schon beschrieben, wird der 95%-Dummy in den gesetzlich vorgeschriebenen Frontal-Crashtests nicht eingesetzt. Aus diesem Grund gibt es auch keine Belastungslimits wie bei den kleineren Dummies. In der Auslegung der Rückhaltesysteme im Fahrzeug wird dieser Dummy allerdings mitberücksichtigt, somit soll er auch in der vorliegenden Studie berücksichtigt werden.

8.2.2.4 OoP

Im Laufe dieses Projektes wurden eine Reihe von OoP-Versuchen mit dem Serien-Airbag durchgeführt. Diese dienten dazu, eine Referenz zu schaffen und die Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse mit anderen Prüflaboren nachzuweisen.

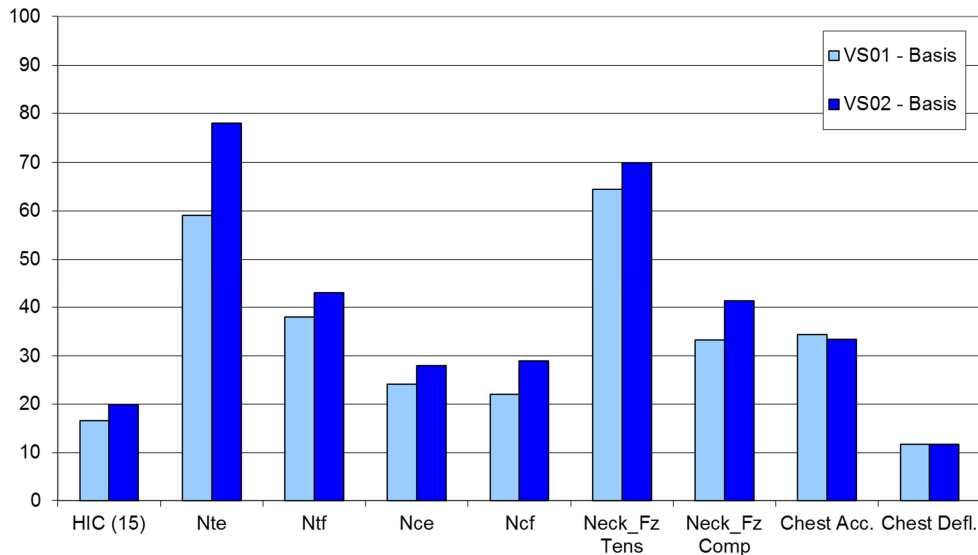


Abbildung 127: Ergebnisse von zwei Basisversuchen mit HIII 3y in Position 2

Die gesetzlichen OoP-Tests umfassen mehrere Dummies in unterschiedlichen Sitzpositionen. Aufgrund der Annahme, dass von den verschiedenen Testkonfigurationen auf der Beifahrerseite die Position 2 (Kopf vor Instrumententafel) mit dem dreijährigen Kinderdummy die kritische Variante darstellt, wurden dafür zwei Serien mit jeweils zwei Basisversuchen durchgeführt.

In der obigen Abbildung sind die Ergebnisse der relevanten Verletzungskriterien dargestellt. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse trotz sorgfältiger Positionierung der Dummies in den einzelnen Versuchen merklich voneinander abweichen. Beide Basisversuche liegen aber innerhalb der üblichen Versuchsabweichungen, die aus der Entwicklung des Referenzfahrzeuges bekannt sind.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Getöteten im Straßenverkehr seit 1953 in Deutschland	4
Abbildung 2: Patent eines Mechanismus zur Realisierung einer voll-variablen Airbagform	11
Abbildung 3: Untersuchung der Triggerung des Airbags in Abhängigkeit von der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung (NASS/CDS 2000-2006)	14
Abbildung 4: Daimler PreSafe-System	20
Abbildung 5: Sitzpositionen des 50%-Dummys: blau: Normsitzposition, rot: vorverlagerte Sitzposition ca. 70ms nach t_0	24
Abbildung 6: Zusammenhang mittlere Verzögerung und Verzögerungsweg	25
Abbildung 7: OoP-Test, HIII 3y, Position 2	26
Abbildung 8: Abschätzung der Straffkräfte bei unterschiedlich langen Straffzeiträumen.....	28
Abbildung 9: Simulationsmodell mit 50%-Mann	31
Abbildung 10: Gurtmodellierung	31
Abbildung 11: modeFrontier - Workflow	32
Abbildung 12: Soll-Position der Hüftpunkte für die drei Dummies	33
Abbildung 13: Hybrid III 50%-Mann Dummy und verschiedene Simulationsmodelle (LS-Dyna links, Madymo rechts)	33
Abbildung 14: Hybrid III 5%-Frau Dummy und verschiedene Simulationsmodelle (LS-Dyna links, Madymo rechts)	34
Abbildung 15: Hybrid III 95%-Mann Dummy und verschiedene Simulationsmodelle (LS-Dyna links, Madymo rechts)	35
Abbildung 16: Skizze der Kollisionskonfiguration beim US-NCAP-Test	36
Abbildung 17: Beispiel eines typischen Verlaufes der Längsbeschleunigung beim US-NCAP Test....	36
Abbildung 18: Skizze der Kollisionskonfiguration beim EuroNCAP-Test	36
Abbildung 19: Beispiel eines typischen Verlaufes der Längsbeschleunigung beim EuroNCAP Test ..	36
Abbildung 20: Skizze der Kollisionskonfiguration beim ungegurteten FMVSS208 Frontal-Test	37
Abbildung 21: Typischer Verlauf der Längsbeschleunigung beim ungegurteten FMVSS208-Frontal-Test bei 0°	37
Abbildung 22: Unterschiedliche Normsitzpositionen von 95% Dummy (blau), 50% Dummy (grün) und 5% Dummy (rot)	40
Abbildung 23: Schema der Testvorschriften für OoP gemäß der FMVSS 208	41
Abbildung 24: Idealisierte Befüllung eines Airbags bei einer Zündung des Gasgenerators 80 Millisekunden vor t_0	43
Abbildung 25: Skizze eines zweistufigen pyrotechnischen Gasgenerators	43
Abbildung 26: Skizze eines zweistufigen Hybrid-Gasgenerators	44
Abbildung 27: Skizze des neuartigen Gasgenerators der Firma Autoliv	44
Abbildung 28: Möglichkeit eines Gasgenerators mit zwei unterschiedlichen Befüllungsgeschwindigkeiten	45
Abbildung 29: Möglicher zeitlicher Ablauf der Befüllung des Airbags mit einstufigem Gasgenerator	45
Abbildung 30: Möglicher zeitlicher Ablauf der Befüllung des Airbags mit zweistufigem Gasgenerator	46
Abbildung 31: Möglicher zeitlicher Ablauf der Befüllung des Airbags mit dreistufigem Gasgenerator	47
Abbildung 32: Druckverläufe aus Kannenversuchen und zugehörige Simulation.....	48
Abbildung 33: Massenstromverläufe aus Simulationsmodell.....	48
Abbildung 34: Mögliche „ideale“ Airbagform für 50%-Dummy	50

Abbildung 35: Platzverhältnisse für Airbagformen; Form 1: Normsitzposition bei Frühauslösung, Form 2: vorverlagerte Sitzposition bei konv. Auslösezeiten.....	51
Abbildung 36: Platzverhältnisse für Airbagformen; Form 1: 50%- und 95%-Mann, Form 2: 5%-Frau	51
Abbildung 37: Variante eines aktiv geöffneten Vents	53
Abbildung 38: Airbagform für 50%- und 95%-Dummy im Fall einer Frühauslösung und der konventionellen Auslösung	54
Abbildung 39: Airbagform für 5%-Frau im Fall einer Frühauslösung und der konventionellen Auslösung.....	54
Abbildung 40: Verläufe des Airbagvolumens der beiden Formen bei unterschiedlichen Auslösungen	55
Abbildung 41: Kontrolle der Airbagform in der Simulation, 50%-Dummy	55
Abbildung 42: Kontrolle der Airbagform in der Simulation, 5%-Dummy	56
Abbildung 43: Mögliche Auslösestrategie für vier Zündkreise	57
Abbildung 44: Mögliche Auslösestrategie für drei Zündkreise	58
Abbildung 45: Ergebnisse OoP-Versuche Jänner 2009 - HIII, 3y, Pos 2	59
Abbildung 46: Vergleich Airbag-Entfaltung 35ms	61
Abbildung 47: Vergleich Airbag-Entfaltung 120ms	61
Abbildung 48: Schnitt durch Modulgehäuse mit „Serien-Faltung“	62
Abbildung 49: Schnitt durch Modulgehäuse mit modifizierter Faltung (1 Falte aus dem Brustteil ins Kopfteil)	62
Abbildung 50: Vergleich zur Basis, HIII 3y, Position 2 (Kopf vor IP).....	62
Abbildung 51: HI-Versuch 110ms nach Zündung (Zeitpunkt des Erstkontaktes)	63
Abbildung 52: HI-Versuch 120ms nach Zündung	63
Abbildung 53: HI-Versuch 200ms nach Zündung (Umkehrpunkt des Impaktors).....	63
Abbildung 54: Kraft-Weg-Kurven verschiedener Horizontal-Impaktor-Tests	63
Abbildung 55: Berechnete Massenstromverläufe der drei Gasgenerator-Stufen	65
Abbildung 56: Auslegung für 50%-Mann, EuroNCAP	66
Abbildung 57: Auslegung für 5%-Frau, US-NCAP.....	67
Abbildung 58: Längsbewegung des Fußes bei unterschiedlichen Straffzeitpunkten	71
Abbildung 59: Längsgeschwindigkeit des Fußes relativ zum Fußraum bei unterschiedlichen Straffzeitpunkten	71
Abbildung 60: Vergleich der Kniewinkel bei unterschiedlichen Straffzeitpunkten.....	71
Abbildung 61: Gurtzugrichtungen (blau: in Serienfahrzeugen umgesetzt, rot: theoretisch optimal für eine Vorbeschleunigung des Insassen entgegen der Fahrtrichtung).....	72
Abbildung 62: Dummykinematik mit den unterschiedlichen, möglichen Straffvarianten.....	73
Abbildung 63: Trajektorien von Kopf, Brust und Becken bei unterschiedlichen Straff-Zeitpunkten ohne Freigabe der Rückenlehne; Straffung mit ca. 3,5kN	74
Abbildung 64: Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Straffzeitpunkten 50%-EuroNCAP.....	75
Abbildung 65: Verläufe der Brusteindrückung bei unterschiedlichen Straffzeitpunkten	75
Abbildung 66: Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Straffzeitpunkten 5%-USNCAP, v.l.n.r.: Basis, t_0-24ms , t_0-12ms , t_0 , t_0+12ms	76
Abbildung 67: Verlauf der Beckengurtkraft mit Serienstraffer am Gurtschloss für verschiedene Straffzeitpunkte	77
Abbildung 68: Prinzip-Schaltbild der voll variablen Prüfstandsgurtaktorik.....	78
Abbildung 69: Gurtaktorik mit Halterung für beidseitige Straffung und Kraftbegrenzung des Beckengurtes	80
Abbildung 70: Foto der eingebauten Gurtaktorik samt der Versorgungseinheit in der Schlittenkarosse	80
Abbildung 71: Verläufe des Straffdruckes und des Bremsdruckes.....	80

Abbildung 72: Kraftverlauf im Beckengurt	81
Abbildung 73: Straffwege an Endbeschlag und Gurtschloss	81
Abbildung 74: Bewegung des Dummys mit (rot) und ohne (blau) Kontakt mit der Rückenlehne	82
Abbildung 75: Kinematik des Insassen mit (oben) und ohne (unten) Kontakt mit der Rückenlehne....	83
Abbildung 76: Verläufe der Beckenbeschleunigung mit und ohne Kontakt mit der Rückenlehne	83
Abbildung 77: Anbindungsteile der Sitzstruktur an die Karosse	87
Abbildung 78: Vergleich der Beckenanbindung beim Seriensitz und dem versteiften Sitz	87
Abbildung 79: Untersuchung des Einflusses des steiferen Sitzes auf die Belastungswerte im Referenzfahrzeug	88
Abbildung 80: Schultergurtkräfte mit unterschiedlichen Kraftbegrenzern (50%-Dummy, EuroNCAP-Lastfall)	89
Abbildung 81: Anordnung der Fußraumkamera bei Schlittenversuchen	91
Abbildung 82: Verhängen des Luftsackes beim Austritt aus der IP (links: OoP-Versuch, rechts: Schlittenversuch).....	92
Abbildung 83: Positionierung des Airbags mit geänderter Modulöffnung im Vergleich zum Schlittenversuch	93
Abbildung 84: Ersatz-Airbagklappe in der Instrumententafel	96
Abbildung 85: Simulationsergebnisse Auslegung HIII 50%, EuroNCAP, Airbagauslösung 80ms vor t_0 , Straffung des Gurtes 17ms nach t_0	98
Abbildung 86: Vergleich der Verläufe der Brusteindrückung mit idealisiertem Rechtecksverlauf.....	99
Abbildung 87: Simulationsergebnisse Auslegung HIII 50%, EuroNCAP, Airbagauslösung t_0 -80ms, Straffung des Gurtes t_0 -17ms mit 1,5kN	100
Abbildung 88: Vergleich der Verläufe der Kopfbeschleunigung.....	100
Abbildung 89: Simulationsergebnisse Auslegung HIII 5%, US-NCAP, Airbagauslösung t_0 -80ms, Straffung des Gurtes t_0 -12ms mit 3kN	101
Abbildung 90: Vergleich des US-NCAP-Ratings für die 3 unterschiedlichen Varianten.....	101
Abbildung 91: Versuchsliste Schlittenversuche KW45 2010	102
Abbildung 92: Probleme bei der Positionierung des Airbags vor dem Insassen.....	103
Abbildung 93: Umschlagen des Gurtbandes im Gurtschloss bei den Versuchen mit der 5%-Frau	104
Abbildung 94: Vergleich der Positionierung des Airbags bei Simulation und Versuch (10-ST13)	105
Abbildung 95: Verläufe der Kopf- und Brustbeschleunigung beim 50%-Mann, EuroNCAP - konv. Straffzeitpunkt.....	105
Abbildung 96: Verläufe von Beckenbeschleunigung und Brusteindrückung beim 50%-Mann, EuroNCAP - konv. Straffzeitpunkt	106
Abbildung 97: Verläufe der Gurtkräfte beim 50%-Mann, EuroNCAP - konv. Straffzeitpunkt	106
Abbildung 98: Verläufe der Oberschenkelkraft links und des Nackenmoments beim 50%-Mann, EuroNCAP - konv. Straffzeitpunkt	107
Abbildung 99: Ergebnisse EuroNCAP-Rating Frontal beim 50%-Mann - konv. Straffzeitpunkt	107
Abbildung 100: Verläufe der Kopf- und Brustbeschleunigung beim 50%-Mann, EuroNCAP - früher Straffzeitpunkt.....	108
Abbildung 101: Verläufe von Beckenbeschleunigung und Brusteindrückung beim 50%-Mann, EuroNCAP - früher Straffzeitpunkt	108
Abbildung 102: Verläufe der Gurtkräfte beim 50%-Mann, EuroNCAP - früher Straffzeitpunkt.....	109
Abbildung 103: Verläufe der Oberschenkelkraft links und des Nackenmoments beim 50%-Mann, EuroNCAP - früher Straffzeitpunkt	109
Abbildung 104: Ergebnisse EuroNCAP-Rating Frontal beim 50%-Mann - früher Straffzeitpunkt	110
Abbildung 105: Verläufe der Kopf- und Brustbeschleunigung bei der 5%-Frau, US-NCAP - früher Straffzeitpunkt.....	111

Abbildung 106: Verläufe von Beckenbeschleunigung und Brusteindrückung bei der 5%-Frau, US-NCAP - früher Straffzeitpunkt	111
Abbildung 107: Verläufe der Gurtkräfte bei der 5%-Frau, US-NCAP - früher Straffzeitpunkt	112
Abbildung 108: Beinkinematik der 5%-Frau beim Versuch 10-ST17, Verhaken des linken Fußes im Fußraum	112
Abbildung 109: Verläufe der Oberschenkelkraft links und der Nackenkraft (Zug/Druck) bei der 5%-Frau, US-NCAP - früher Straffzeitpunkt	112
Abbildung 110: Ergebnisse US-NCAP-Rating Frontal bei der 5%-Frau - früher Straffzeitpunkt.....	113
Abbildung 111: Überarbeitung der Airbagform (HIII-50%)	114
Abbildung 112: Vergleich Energieeintrag in den Airbag, konv. Auslösung	115
Abbildung 113: Vergleich Insassenbelastungen bei konv. Auslösung, 50%-Dummy, Überblick und Kopfbeschleunigung	116
Abbildung 114: Vergleich Insassenbelastungen bei konv. Auslösung, 50%-Dummy, Brusteindrückung und N_{ij}	116
Abbildung 115: Vergleich Insassenbelastungen bei konv. Auslösung, 5%-Dummy, Überblick und Kopfbeschleunigung	117
Abbildung 116: Vergleich Insassenbelastungen bei konv. Auslösung, 5%-Dummy, Brusteindrückung und N_{ij}	117
Abbildung 117: Vergleich Insassenbelastungen 50%-EuroNCAP bei Basis, konventioneller und früher Auslösung.....	124
Abbildung 118: Vergleich Insassenbelastungen 05%-USNCAP bei Basis, konventioneller und früher Auslösung.....	125
Abbildung 119: Belastungsgrenzen für das EuroNCAP-Rating im Frontal-Lastfall	130
Abbildung 120: Grenzwerte der Verletzungskriterien für den FMVSS208-Lastfall [65].....	131
Abbildung 121: Schematische Darstellung des Gasgenerators des Referenzfahrzeuges	132
Abbildung 122: Unterschiedliche Dummies mit dem Serien-Airbag des Referenzfahrzeuges 70ms nach t_0	132
Abbildung 123: Ausgewählte Verletzungskriterien der 5%-Frau bei verschiedenen Lastfällen	133
Abbildung 124: Zeitliche Verläufe der Brusteindrückung und der N_{ij} -Werte der 5%-Frau bei verschiedenen Lastfällen	133
Abbildung 125: Ausgewählte Verletzungskriterien des 50%-Mannes bei verschiedenen Lastfällen..	134
Abbildung 126: Zeitliche Verläufe Kopfbeschleunigung und der Brusteindrückung des 50%-Mannes bei verschiedenen Lastfällen	134
Abbildung 127: Ergebnisse von zwei Basisversuchen mit HIII 3y in Position 2	135

10 Literaturverzeichnis

1. Adomeit Heinz Dieter, Just Thomas, and Adomeit Julius: Das hohe Schutzniveau eines Pre-Crash Rückhaltesystems und seine breitbandige Wirkung; Proceedings of 7.VDI Tagung Fahrzeugsicherheit; ISBN: 978-3-18-092078-8; Berlin, 2009a; pp: 227-246;
2. Aldaghtas T.A., Burke C, Jenkins J.D., Rizzo A, Pullarkat R, and Griffen M: Intestinal Injuries in Motor Vehicle Crashes: The forgotten Injury; Proceedings of FISITA 2010; Budapest, Hungary, Paper No: F2010D078; 2010a;
3. Audi AG; Audi pre sense - vorausschauende Sicherheit; http://www.audi.at/modelle/a8/a8_1_w12/ausstattung/assistentensysteme/audi_pre_sense/ access to website: (23-3-2011a)
4. Autoliv B.V.& Co.KG; Frontal Airbags; <http://www.autoliv.com/wps/wcm/connect/autoliv/home/what+we+do/airbags/frontal+airbags> access to website: (1-3-2011b)
5. Autoliv B.V.& Co.KG; Pedestrian Protection Airbag, Active Hood; <http://www.autoliv.com/wps/wcm/connect/autoliv/home/what+we+do/research/some+projects/pedestrian+protection> access to website: (24-3-2011c)
6. Bauer K and Steeger B: Optimierung zukünftiger Rückhaltesysteme für globale Anforderungen unter Verwendung von PreCrash-Informationen; Proceedings of 6.VDI Tagung Fahrzeugsicherheit; Berlin, 2007a;
7. Baumann K.H., Schoeneburg Rodolfo, and Justen R: The Vision for a comprehensive Safety Concept; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Amsterdam, Paper No: 01-0493; 2001a;
8. Beesten Benno, Hirth Andreas, Reilink Robert, Remensperger Rolf, Rieger Doris, and Seer Günther: OOP-Simulation - Tool to design Airbags?; Proceedings of Airbag 2000; Karlsruhe, 2004a;
9. Bundesanstalt für Straßenwesen - bast; Getötete im Straßenverkehr; www.bast.de access to website: (11-4-2011d)
10. Carhs GmbH. Safety Companion 2010; Publisher: Carhs GmbH; 2010b
11. Carhs GmbH. Safety Companion 2011; Publisher: Carhs GmbH; 2011a
12. Catalá-Prat À, Reulke R, and Köster F: Early detection of hazards in driving situations through multi-sensor fusion; Proceedings of FISITA 2008; Munich, Germany, Paper No: F2008-08-148; 2008a;
13. Chan C-Y. Crash Sensing in Automotive Air Bag Systems; Publisher: SAE; 2000
14. Chichos D., de Vogel D., and Otto M.: Crash-Analyse Beschreibung der Kriterien; 2005a, (Report);
15. Couturier Stéphane, Faure Jacques, Satué Ricardo, Huguet Joaquin, and Hordonneau Julien: Procedure to assess submarining in frontal impact; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Lyon, France, Paper No: 07-0481; 2007b;
16. Daimler AG; Das Insassenschutzsystem PRE-SAFE; <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1301676-49-1281438-1-0-0-1302066-0-1-135-7145-0-0-0-0-0-0-0.html> access to website: (23-3-2011e)
17. Daimler AG; PRE-SAFE Pulse: An automatic nudge in the ribs; <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1214698-1-1214757-1-0-0-1214699-0-0-135-7165-0-0-0-0-0-0-0.html> access to website: (23-3-2011f)

18. Daimler AG; PRE-SAFE Structure: Aufblasbare Metallstrukturen; <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1214698-49-1214713-1-0-0-1214699-0-0-135-7165-0-0-0-0-0-0.html> access to website: (23-3-2011g)
19. Daimler AG; Size Adaptive Airbags: Maßgeschneiderte Airbags; <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1214698-49-1214741-1-0-0-1214699-0-0-135-7165-0-0-0-0-0-0.html> access to website: (23-3-2011h)
20. Denton ATD; Adult Frontal Impact ATDs; <http://www.radenton.com/dentonatd/VESTA.html> access to website: (1-7-2011i)
21. Denton ATD; Virtual Products; <http://www.dentonatd.com/virtualproducts/virtualproducts.html> access to website: (1-7-2011j)
22. DePottey T and Schneider D: Airbag Cushion with adaptive Venting for reduced out-of-position Effects; Patent No.:US2006/0151979 A1; 13-7-2006a;
23. Drücker Jan-Peter: Metamodelle als alternatives Werkzeug für die Auslegung des Rückhaltesystems im Frontcrash; Proceedings of Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag; Weimar, Germany, 2008b;
24. Dynamore GmbH; Frontal Impact Dummy Models from FTSS; http://www.dynamore.de/models/front-dummy/frontal-impact-dummy-models-from-ftss-1?set_language=en access to website: (1-7-2011k)
25. Eickhoff Burkhard, Zellmer Harald, and Forster Erik: The mechanism of belt induced chest deflection: analysis and possibilities for reduction; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Lyon, France, Paper No: 07-0202; 2007c;
26. Ejima S, Zama Y, Ono K, Kaneoka K, Shiina I, and Asada H: Prediction of pre-impact occupant kinematic behavior based on the muscle activity during frontal collision; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Stuttgart, Germany, Paper No: 09-0913; 2009b;
27. Europäische Kommission: Weißbuch - Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum - Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem; 2011b, (Report);
28. Faure Jaques, Couturier Stéphane, Page Yves, and Labrousse Maxime: The benefits of double pretension in decreasing knees & lower legs injuries in frontal impacts; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Lyon, France, Paper No: 07-0491; 2007d;
29. Ford Motor Company; Rear Inflatable Seat Belts; www.media.ford.com access to website: (12-5-2011l)
30. Fredin S: The Evolution of Passive Safety - how Active Safety may enable; Proceedings of 6.VDI Tagung Fahrzeugsicherheit; Berlin, 2007e;
31. Fredriksson R, Flink E, Boström Ola, and Backman K: Injury mitigation in SUV-to-pedestrian impacts; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Lyon, France, Paper No: 07-0380; 2007f;
32. Fürstenberg K, Dietmayer K. Fahrzeugumfelderfassung mit mehrzeiligen Laserscannern; Technisches Messen, Volume: 71, Number 3, 2004b, pp: 164-172;
33. Gabler H C, Hinch J. Evaluation of advanced airbag deployment algorithm performance using event data recorders; Annual AAAM Conf., Volume: 52, 2008c, pp: 175-184;
34. Gonter M: Steuerkonzepte für adaptive Airbagsysteme zur insassen- und unfallspezifischen Optimierung des Insassenschutzes; Dresden, Germany; Thesis/Dissertation 2007g;
35. Griotto G., Lemmen P., van den Eijnden E., van Shie C., and Cioero J.: Real Time Control of Restraint Systems in Frontal Crashes; Proceedings of SAE 2007 World Congress; Paper No: 2007-01-1504; 2007h;

36. Haberjahn M: Low-Level-Fusion eines Laserscanner- und Stereokamera-Systems in der Fahrzeugumfelderfassung; 2010c, (Report);
37. Hahn D, Mamedniyazova N, and Adomeit H D: Weitere Sicherheitspotentiale in Insassenschutzsystemen bei Aktivierung durch Pre-Crash-Informationen; Proceedings of 6.VDI Tagung Fahrzeugsicherheit; Berlin, 2007i;
38. Hahn W: Die Entwicklung der Fahrzeugsicherheit in Europa; Proceedings of 6.VDI Tagung Fahrzeugsicherheit; Berlin, 2007j;
39. Hella KG; Elektronischer Einparkassistent; www.hella.de access to website: (4-4-2011m)
40. Hoffmann Jörg, Bito Kazuaki, and Sakamoto Masaanari: Investigation into a restraint system device addressing different occupant seating positions and real world accident scenarios; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Lyon, France, Paper No: 07-0173; 2007k;
41. Hong Soongu, Jung Hunhee, Cho Byungryong, and Kim Ikwhan: A study on invisible knee airbag cushion folding design using DOE (design of experimental) method; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Lyon, France, Paper No: 07-0274; 2007l;
42. Hu J, Rupp JD, Lamb T, Michalak E, Chang C, Schneider LW. Computational Investigation of the Effects of Driver and Vehicle Interior Factors on the Risk of Knee-Thigh-Hip Injuries in Frontal Crashes; SAE International, 2010d,
43. Humanetics Innovative Solutions; Hybrid III 5th Percentile Female; <http://www.dentoncoe.de/services/de/hiii-5.html> access to website: (1-7-2011n)
44. Humanetics Innovative Solutions; Hybrid III 95th Large Male Dummy; <http://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/frontal-impact/hybrid-iii-95th> access to website: (1-7-2011o)
45. Intas G, Stergiannis P. Seat Belt Syndrome: A global issue; Health Science Journal, Volume: 4, Number 4, 2010e, pp: 202-209;
46. INVENT: Ergebnisbericht - INVENT "erfahren" - mobil mit 8 Sinnen; 2005b, (Report);
47. Ke Dong and Jenne-Tai Wang: Continuously variable deployment airbag; Patent No.:US20100109306A1; 5-6-2011c;
48. Key Safety Systems; KSS Supplies industry`s first inflatable seatbelt; www.keysafetyinc.com access to website: (12-5-2011p)
49. Klinich K.D., Flannagan C.A., Nicholson K, Schneider, L. W., and Rupp, J. D.: Abdominal Injury in Motor-Vehicle Crashes; UMTRI-2008-40, 2008d, (Report);
50. Kompaß K. Fahrassistenzsysteme der Zukunft - auf dem Weg zum autonomen Pkw?; Publisher: Springer; 2008e
51. Könning M and Heger T: Usage of surround sensor information for passive safety-challenges and chances; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Stuttgart, Germany, Paper No: 09-0319; 2009c;
52. Krafft M, Kullgren, A., Lie, A., Strandroth J, and Tingvall C: The effects of automatic emergency braking on fatal and serious injuries; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Stuttgart, Germany, Paper No: 09-0419; 2009d;
53. Kramer F. Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen; 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Edition; Publisher: Vieweg & Sohn Verlag - GWV Fachverlage GmbH; 2006b
54. Kühne K.-P., Sommer K.-H., Schock M., Weber M., and Albert J.: Airbag module having an airbag with an adaptive ventilation opening; Patent No.:WO 2010/121717 A1; 2010f;
55. Lehmann H: Grundlagenuntersuchung numerischer Methoden für Airbagsimulation hinsichtlich ihrer Prognosefähigkeit im "Out of Position"-Bereich; Dresden, Germany; Thesis/Dissertation 2006c;

56. Livermore Software Technology Corp.; Hybrid III 50th Percentile;
<http://models.lstc.com/pages/available/HybridIII50.htm> access to website: (1-7-2011q)
57. Lüke S, Rieth P, and Darms M: From Brake Assist to autonomous collision avoidance; Proceedings of FISITA 2008; Munich, Germany, Paper No: F2008-08-155; 2008f;
58. Lundell B, Jakobsson L, Alfredson B, Lindström M, and Simonsson L: The WHIPS Seat - A car seat for improved protection against neck injuries in rear end impacts; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Windsor, Canada, Paper No: 98-S7-O-08; 1998a;
59. Luttenberger Peter: Entwicklung einer variablen Gurtaktorik für Entwicklungsversuche; Thesis/Dissertation 2010g;
60. Mao Y and Appel H: Influence of Air Bag folding Pattern in OOP-injury Potential; Proceedings of SAE World Congress; ISBN: 0148-7191; Detroit, Michigan, 2001b;
61. Meinecke M.-M. and Obojski M A: Potentials and limitations of pre-crash systems for pedestrian protection; Proceedings of Workshop on intelligent transportation; Hamburg, Germany, 2005c;
62. Mellinghoff U., Breitling T, Schoeneburg Rodolfo, and Metzler H.-G.: The Mercedes-Benz Experimental Safety Vehicle 2009; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Stuttgart, Germany, Paper No: 09-0257; 2009e;
63. Merz U, Bachmann R, Bogenrieder R, and Wagner A: Pre-Sense - Bindeglied zwischen Umfeldsensorik und akutem Insassenschutz; Proceedings of 6.VDI Tagung Fahrzeugsicherheit; Berlin, 2007m;
64. Müller E.Helmut, Linn Burghard. Seatbelt Pretensioners; SAE International, 1998b,
65. National Highway Traffic Safety Administration: FMVSS 208 - Occupant crash protection; 2000r
66. Newman J: A generalized acceleration model for brain injury threshold (GAMBIT); Proceedings of IRCOBI; 1986; pp: 121-131;
67. NHTSA: Counts of frontal airbag related fatalities and seriously injured persons; 1-10-2001c, (Report);
68. Painter M, Massanell J, Prestele C, Wilks R, Schöpp H, Hagebecker B, and Buxbaum B: Erfassung kritischer Fahrsituationen mit einer PMD 3D-Kamera; Proceedings of 6.VDI Tagung Fahrzeugsicherheit; Berlin, 2007n;
69. Renault s.a.s.; Active anti-submarining Airbag;
<http://www.renault.com/en/Lists/ArchivesDocuments/active-anti-submarining-airbag.pdf>
access to website: (27-1-2011s)
70. Richert J: Contribution to the design and the optimization of adaptive restraint systems to improve the automotive passive safety; Valenciennes, France; Thesis/Dissertation 2007o;
71. Ryan Shawn. An innovative approach to adaptive airbag modules; SAE International, 1998c,
72. Safe-U; Safe-U - Sensors and system architecture for vulnerable road users protection;
<http://www.save-u.org/> access to website: (5-4-2011t)
73. Schmitt K, Niederer P, Muser M, Walz F. Trauma-Biomechanik; Publisher: Springer Verlag; 2010h
74. Schoeneburg Rodolfo, Baumann K.H., and Justen R: Pre-Safe - The next step in the enhancement of vehicle safety; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Nagoya, Japan, Paper No: 03-410; 2003;
75. Schoeneburg Rodolfo and Breitling Thomas : Enhancement of active & passive safety by future Pre-Safe Systems; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Washington, Paper No: 05-0080; 2005d;

76. Schönekas A: Frontalaufprall; Proceedings of Grazer Safety Update 2008; Graz, Paper No: GSU-2008-07; 2008g;
77. Siemens VDO Automotive AG; Wedgetronic Seatbelt; www.siemensvdo.de access to website: (2007u)
78. Sohr S and Heym A: Benefit of adaptive occupant restraint systems with focus on the new US-NCAP rating requirements; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Stuttgart, Germany, Paper No: 09-0322; 2009f;
79. Steffan H, Hofinger M, Parenteau C, Shah M, Webber J, Darok M, and Leinzinger P: Abdominal Responses to dynamically Lap Belt loading; Proceedings of IRCOBI; 2002;
80. Strobel T, Serval A, Coue C, and Tatschke T: Compendium on Sensors - State-of-the-art of Sensors and Sensor Data Fusion for Automotive Preventive Safety Applications; 2004c, (Report);
81. Takata Petri AG: Takata Company Profile; 2011d, (Report);
82. Thomas Scott D., Hawthorn Laura A. Dual Depth Passenger Airbag; SAE International, 2005e,
83. Toyota; Toyota adds to Pre-Crash Safety Technologies; <http://corporatemediatoyota.eu/PressReleases/Pages/CorporatePressRelease.aspx?pressReleaseId=347&returnUrl=/Assets/Pages/Details.aspx?iop=10#> access to website: (26-2-2009v)
84. TRW Automotive; Fixed Airbag - Asymmetric Airbag; http://www.trw.com/sites/default/files/FixedAirbagAsymmetric_eng09.pdf access to website: (6-12-2010w)
85. TRW Automotive; Adaptive Cruise Control (ACC); <http://www.adaptive-cruise-control.com/> access to website: (4-4-2011x)
86. TRW Automotive; Advanced Passenger Technology: Active Venting; http://www.trw.com/sub_system/single_stage_technology access to website: (7-3-2011y)
87. TRW Automotive; PPI 3-1s/PPI 3-2s Pyrotechnic Passenger Inflator; http://www.trw.com.br/produtos/oss_inflators-english.pdf access to website: (26-1-2011z)
88. Vacek S: Videogestützte Umfelderkennung zur Interpretation von Verkehrssituationen für kognitive Automobile; Karlsruhe, Germany; Thesis/Dissertation 2008h;
89. Wang C and Zhou Q.: Concept Study of Adaptive Seatbelt Load Limiter Using Magnetorheological Fluid; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Paper No: 09-0081; 2009g;
90. Wohllebe T., Gonter M., and Meinecke M.-M.: Potential of Pre-Crash Restraints in Frontal Collisions; Proceedings of Airbag 2000; Karlsruhe, Germany, Paper No: V7; 2006d;
91. Zellmer Harald, Kahler Christoph, and Eickhoff Burkhard: Optimised pretensioning of the belt system: A rating criterion and the benefit in consumer tests; Proceedings of ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Washington, USA, Paper No: 05-0004; 2005f;