



 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

# COMPARE - Sicherheitstechnische Beurteilung von nicht kraftschlüssigen Anpralldämpfern zur Absicherung von Hindernissen

## Ein Projekt finanziert im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung 2018 **VIF 2018**

August 2022









Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung: Bundesministerium für Klimaschutz Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien Radetzkystraße 2 1030 Wien Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG Praterstern 3 1020 Wien

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft Austro Tower Schnirchgasse 17 1030 Wien ASFINAG

**Für den Inhalt verantwortlich:** TU Graz, Institut für Fahrzeugsicherheit Inffeldgasse 23/I 8010 Graz

### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH Thematische Programme Sensengasse 1 1090 Wien









 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

# COMPARE - Sicherheitstechnische Beurteilung von nicht kraftschlüssigen Anpralldämpfern zur Absicherung von Hindernissen

Ein Projekt finanziert im Rahmen der

## Verkehrsinfrastrukturforschung

## VIF 2018

Autorinnen und Autoren:

Ernst TOMASCH Gregor GSTREIN Hermann STEFFAN

Auftraggeber: Bundesministerium für Klimaschutz ÖBB-Infrastruktur AG Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

### Auftragnehmer:

TU Graz, Institut für Fahrzeugsicherheit



# COMPARE - SICHERHEITSTECHNISCHE BEURTEILUNG VON NICHT KRAFTSCHLÜSSIGEN ANPRALLDÄMPFERN ZUR ABSICHERUNG VON HINDERNISSEN

Ernst Tomasch, Gregor Gstrein, Hermann Steffan

Acronym:	COMPARE
Project Ref:	873194
Client:	Client
Project Partners:	-
Date:	05.08.2022
Pages:	145
Confidentiality:	Public
Version:	Final
Keywords:	Verletzungskriterien, Anpralldämpfer, EN 1317, THIV, ASI, PHD, OIV, ORA, HIC
Abstract:	Die bei EN 1317 Versuchen eingesetzten Fahrzeuge müssen für den aktuellen Verkehr
	in Europa gängige Modelle sein, jedoch nicht dem neuesten Stand der Technik entspre-
	chen und sind in der Regel sehr alt. Das Ziel dieser Untersuchung ist eine Bewertung der
	Insassensicherheit beim Anprall an nicht kraftschlüssig mit dem Boden verbundene An-
	pralldämpfer mit Fahrzeugen die typischerweise für EN 1317 Versuche zum Einsatz
	kommen und Fahrzeuge mit verbesserter Sicherheitsausstattung (Airbag, Gurtkraftbe-
	grenzer, etc.). Der Anprall soll mit voller Überdeckung und mit einer Teilüberdeckung
	bei einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h erfolgen. Die in der EN1317 bewerteten
	Kriterien (ASI, THIV) weisen bei der Teilüberdeckung einen deutlich höheren Wert auf,
	als bei voller Überdeckung. Jedoch sind Insassenkriterien (z.B. HIC, etc.) die in der Fahr-
	zeugsicherheit bewertet werden, deutlich unter festgelegten Grenzwerten. Insassen
	sind nach diesen Kriterien bei den untersuchten Anprallkonfigurationen gut geschützt,
	wobei Fahrzeuge mit verbesserter Sicherheitsausstattung deutlich besser ab schneiden.

The information contained herein is the property of the Vehicle Safety Institute – Graz University of Technology and does not necessarily reflect the views or policies of the [Client] for whom this report was prepared. Whilst every effort has been made to ensure that the matter presented in this report is relevant, accurate and up-to-date, Vehicle Safety Institute at Graz University of Technology cannot accept any liability for any error or omission, or reliance on part or all of the content in another context.









Kurzfassung

### **KURZFASSUNG**

#### Problemstellung

Der Schutz von Fahrzeuginsassen gegen einen Anprall an ein Hindernis an der Fahrbahnseite erfolgt durch Fahrzeugrückhaltesysteme, welche nach Anforderungen der EN 1317 geprüft sind. Diese Systeme werden durch standardisierte Versuche bewertet, ohne jedoch die weitere Verwendung (z.B. Einsatz vor Tunnelportalen, Absicherung von Gefahrenstellen in Kurven etc.) zu berücksichtigen. Die bei diesen Versuchen eingesetzten Fahrzeuge müssen, entsprechend der Norm EN 1317, für den aktuellen Verkehr in Europa gängige Modelle sein. Diese müssen jedoch nicht dem neuesten Stand der Technik entsprechen und sind für die Zertifizierungsversuche in der Regel bereits sehr alt. Es ist nicht bekannt, ob sich aufgrund der Weiterentwicklung der Sicherheitstechnik der Fahrzeuge gegenüber den in den Zertifizierungstests verwendeten Pkw Unterschiede hinsichtlich der Bewertung der Anprallheftigkeit ergeben.

#### Ziel

Das Ziel dieser Untersuchung ist eine Bewertung der Insassensicherheit beim Anprall an nicht kraftschlüssig mit dem Boden verbundene Anpralldämpfer. Die Anprallszenarien sollen deutlich von den Anprallkonfigurationen der EN 1317 abweichen und keine Zertifzierungsversuche darstellen, um die Wirkungsweise bei auch von der Norm abweichenden Szenarien zu untersuchen. Als Fahrzeuge kommen sowohl typische für EN 1317 Versuche verwendete Pkw, als auch modernere Fahrzeuge mit verbesserter Sicherheitsausstattung (Airbag, Gurtkraftbegrenzer, etc.) zum Einsatz.

#### Methode

In vier Versuchen werden die Fahrzeuge gegen einen nicht kraftschlüssig mit dem Boden verbundenen Anpralldämpfer Alpina F1-80 beschleunigt. Dabei werden die Fahrzeugbeschleunigungen im Fahrzeugschwerpunkt (entsprechend den Vorgaben der EN 1317) mitaufgezeichnet. Zusätzlich erfolgt eine messtechnische Erfassung von Insassenbelastungen an einer anthropomorphen Prüfpuppe. Der Anprall erfolgt mit voller Überdeckung und mit einer Teilüberdeckung von 50% bei einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h. Aus den messtechnischen Aufzeichnungen werden die Kriterien der EN 1317 und Insassenkriterien der Fahrzeugsicherheit an Kopf, Brust, Becken/Oberschenkel ausgewertet und gegenübergestellt.

#### Ergebnisse

Das Fahrzeug mit verbesserter Sicherheitsausstattung schneidet sowohl beim Anprall mit voller Überdeckung als auch bei der Teilüberdeckung deutlich besser ab, als das typischerweise für EN 1317 Zertifzierungstests eingesetzte Fahrzeug. Bei der vollen Überdeckung werden die Insassen bei beiden







 Bundesministerium Elimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

#### Kurzfassung

Fahrzeugen, dem typischerweise eingesetzten Pkw als auch beim Fahrzeug mit verbesserter Sicherheitsausstattung, deutlich besser geschützt als bei der Teilüberdeckung. Bei der Teilüberdeckung erfolgt ein Durchschlagen an das Back-Up und die daraus resultierenden hohen Fahrzeugbeschleunigungen wirken sich negativ auf den ASI und THIV aus. Die von der EN 1317 abweichenden Anprallbedingungen, insbesondere die geringere Überdeckung, führen daher zu einem deutlich höheren ASI und THIV. Obwohl das Fahrzeug mit verbesserter Sicherheitsausstattung durchwegs besser abschneidet als das für EN 1317 Versuche herkömmlich verwendete Fahrzeug, sind die Kriterienwerte bei der Teilüberdeckung deutlich schlechter als bei einer vollen Überdeckung.

Interessanterweise führt die geringere Überdeckung bei den gemessenen Insassenbelastungswerten (HIC, a3ms Kopfbeschleunigung, a3ms Brustkorbbeschleunigung, etc.), sowohl für den typischerweise eingesetzten Pkw als auch beim Fahrzeug mit verbesserter Sicherheitsausstattung, zu einer geringeren Verschlechterung als bei den Fahrzeugmesswerten (ASI und THIV) und sind deutlich unter den im Euro NCAP festgelegten Grenzen.

Wenngleich auch die Anzahl an Tests sehr gering war, wurden Korrelationen zwischen den Kennwerten berechnet. Hierbei wurden die höchsten Korrelationen mit dem ASI und der a3ms Kopfbeschleunigung, dem ASI und dem HIC15 sowie dem ASI und der a3ms Brustkorbbeschleunigung festgestellt. Entsprechend einer ASI Verletzungsrisikokurve, wäre beim Anprall mit dem hier verwendeten und für EN 1317 Versuche herkömmlich eingesetzten Fahrzeug, das Risiko einer MAIS 3+ Verletzung bei ca. 50%. Bei dem Fahrzeug mit verbesserter Sicherheitsausstattung würde sich dabei ein Risiko von 29% ergeben.

#### Fazit

Durch die gewählte Anprallkonfiguration mit einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h muss der Anpralldämpfer um das 1,56-fache mehr an Energie aufnehmen, als es im Vergleich dazu beim Zertifizierungstest der Fall wäre. Die in der EN 1317 üblichen Kennwerte ASI und THIV sind dadurch deutlich höher, als bei einem Zertifizierungstest. Jedoch sind, gemäß üblicher Insassenkriterien der Fahrzeugsicherheit, die Insassen bei den untersuchten Anprallkonfigurationen gut geschützt. Insassen in Fahrzeugen mit verbesserter Sicherheitsausstattung wären allerdings noch besser geschützt, als Insassen von alten Fahrzeugen.

Die Kriterien ASI und THIV werden bereits in der Literatur als nicht optimal zur Bewertung der Insassensicherheit diskutiert und die Grenzwerte als eher konservativ interpretiert. Als Alternativen wird immer wieder der HIC vorgeschlagen. Dieser hätte den Vorteil, dass die Beschleunigung direkt im Kopf der Prüfpuppe gemessen wird und ein direkter Zusammenhang mit der Verletzungsschwere besteht. Jedoch ist der HIC auch wesentlich vom Insassenrückhaltesystem (z.B. Airbag, Gurtstraffer, Gurtkraftbegrenzer, etc.) abhängig. Zumindest sollten Insassenkriterien ergänzend zum ASI und THIV aufgezeichnet werden.







 Invades ministerium Chraschurt, Unweit, Erwege, Mobilität, Involation and Technologue TU Graz I COMPARE

#### Kurzfassung

Die Versuche haben gezeigt, dass ein Anprall mit einer Teilüberdeckung zu deutlich schlechteren Insassenbelastungswerten führt, als ein Anprall mit voller Überdeckung. Der in der EN 1317-3 als Prüfung 2 festgelegte Versuch (frontal, ¼ Fahrzeug versetzt) sollte in der Weise adaptiert werden, dass beim Versatz des Fahrzeugs eine Teilüberdeckung geprüft wird. Die Teilüberdeckung sollte in einer Größenordnung von 50% Überdeckung am Anpralldämpfer liegen.









Abstract

### ABSTRACT

#### Scope

The protection of vehicle occupants against impact with an obstacle on the side of the road is provided by vehicle restraint systems which are tested according to the requirements of EN 1317. These systems are evaluated by means of standardized tests without, taking into account their further use (e.g. use in front of tunnel portals, protection of hazardous areas in bends, etc.). The vehicles used in these tests must, in accordance with the EN 1317, be models commonly used for current traffic in Europe. However, these vehicles do not have to correspond to the latest state of the art occupant protection technology and are usually already very old. It is not known whether the improved vehicle safety technology compared to the passenger cars currently used in the approval tests will result in differences with regard to the assessment of the occupant protection and impact severity.

#### Objective

The objective of this investigation is to evaluate the occupant safety in the event of an impact against crash cushions that are not mounted to the surface. The impact scenarios shall deviate significantly from the impact configurations of EN 1317. The impact scenarios shall not represent approval tests in order to investigate the protection level of scenarios which substantially deviate from the standard approval tests. The vehicles used will be typical passenger cars used for EN 1317 tests as well as vehicles with improved occupant protection equipment (airbag, belt force limiters, etc.).

#### Method

In four tests, the vehicles are accelerated against an Alpina F1-80 crash cushion that is not mounted to the surface. The vehicle accelerations at the vehicle's centre of gravity (in accordance with the specifications of EN 1317) are recorded. In addition, occupant loads are measured on an anthropomorphic test device. The impact is to take place with full overlap and with an vehicle offset i.e. partial overlap of 50% at an impact speed of 100 km/h. For the assessment, the criteria of EN 1317 and occupant criteria of vehicle safety at the head, chest, pelvis/femur are compared.

#### Results

The vehicle with improved occupant protection performs significantly better in both impact scenarios, the full overlap and partial overlap crashes than the vehicle typically used for EN 1317 approval tests. In the case of full overlap, the occupants of both vehicles, the typically used passenger car and the vehicle with improved occupant protection, are significantly better protected than in the case of partial overlap. In the case of partial overlap, the back-up of the crash cushion is hit and the resulting high vehicle accelerations have a negative effect on the ASI and THIV. The impact conditions that deviate from EN 1317, in particular the partial overlap, therefore lead to a significantly higher ASI and THIV.







 Bundesministerium Elinaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

#### TU Graz I COMPARE

#### Abstract

Although the vehicle with improved occupant protection performs consistently better in terms of occupant protection measures than typically used vehicles for EN 1317 tests, the evaluation criterion ASI and THIV for the partial overlap are significantly worse than for full overlap.

Interestingly, the partial overlap results in less deterioration of the occupant metrics (HIC, a3ms head acceleration, a3ms chest acceleration, etc.) compared with the vehicle metrics (ASI and THIV) for the typical passenger car and for the vehicle with improved occupant protection and are well below the limits defined in Euro NCAP.

Although the number of tests was very small, correlations between the parameters were calculated. The highest correlations were found with the ASI and the a3ms head acceleration, the ASI and the HIC15 and the ASI and the a3ms chest acceleration. According to an ASI injury risk curve, the risk of MAIS 3+ injury would be about 50% in the case of an impact with a typical passenger car used for EN 1317 tests. For the vehicle with improved occupant protection, the risk would be 29%.

#### Conclusion

Due to the selected impact configuration with an impact speed of 100 km/h, the crash cushion must absorb 1.56 times more energy compared to the certification test. The metrics ASI and THIV, which are commonly used in EN 1317, are therefore higher than in a certification test. Even though, according to standard occupant criteria for vehicle safety, occupants are well protected in the crash configurations studied. However, occupants in vehicles with improved occupant protection would be better protected than occupants vehicles typically used for EN 1317 tests.

The criteria ASI and THIV are already discussed in the literature as not optimal for the evaluation of occupant safety and the limit values are interpreted as rather conservative. HIC is repeatedly proposed as an alternative. This would have the advantage that the acceleration is measured directly in the head of the anthropometric test device and there is a direct correlation with the injury severity. However, the HIC is also significantly dependent on the occupant restraint system (e.g. airbag, belt tensioner, belt force limiter, etc.). At the very least, occupant criteria should be recorded in addition to the ASI and THIV.

The tests have shown that an impact with partial overlap leads to significantly worse occupant load values than an impact with full overlap. The test specified in EN 1317-3 as test 2 (frontal, ¼ vehicle offset) should be adapted in such a way that the vehicle has an offset and is not striking with full overlap. The partial overlap should be in the order of 50% overlap at the crash cushion.







Inhaltsverzeichnis

### INHALTSVERZEICHNIS

1 E	INLEITUNG	1
1.1	Motivation	1
1.2	Forschungsziel	2
2 S	TAND DER TECHNIK	4
2.1	Verletzur	
2.1	Verletzungsschwere	4
2.2	Verletzungskriterien und Verletzungsrisiken	10
<b>2.3</b>	Korrelation von Insassen, und Eabrzeug-Kriterien	10
2.3.1	Korrelation von Eabrzeugkriterien mit Eabrzeugmasse und Annrallgeschwindigkeit	16
2.3.2	Korrelation von Vorletzungsrisiken mit Vorletzungskriterion	10
2.5.5		10
2.3.4	Zusannenassung	15
3 N	1ETHODE	22
3.1	Versuchs-Konfiguration	22
3.1.1	Tunnel-Pannenbucht	22
3.1.2	Anpralldämpfer	22
3.1.3	Anprallkonfiguration	23
3.1.4	Testfahrzeuge	25
3.1.5	Versuchsmatrix	25
3.2	Messdatenerfassung	26
3.2.1	Fahrzeuginstrumentierung	26
3.2.2	Anthropomorphe Prüfpuppe	27
3.3	Videoaufzeichnung	28
3.4	Bewertungskriterien basierend auf der Fahrzeugbeschleunigung	29
3.4.1	Flail space model	29
3.4.2	Acceleration Severity Index (ASI)	30
3.4.3	Theoretical Head Impact Velocity (THIV)	31
3.4.4	Post-Impact Head Deceleration (PHD)	31
3.4.5	Occupant Impact Velocity (OIV)	32







#### Inhaltsverzeichnis

3.4.6	Occupant Ride down Acceleration (ORA)	32
3.4.7	Maximale resultierende Fahrzeugbeschleunigung	32
3.4.8	"Moving average acceleration" aXms der resultierenden Fahrzeugbeschleunigung	33
3.4.9	Kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung delta-v	33
3.4.10	Energieäquivalente Geschwindigkeit	33
3.5 B	Bewertungskriterien basierend auf Insassenwerten	34
3.5.1	Head Injury Criterion (HIC)	34
3.5.2	a3ms Kopfbeschleunigung	36
3.5.3	Nackenkräfte und Momente	36
3.5.4	Nackenverletzungskriterium Nij	37
3.5.5	a3ms Brustkorbbeschleunigung	38
3.5.6	Brustkorbeindrückung	39
3.5.7	Viscous Criterion (VC)	39
3.5.8	Untere Extremitäten - Oberschenkelkräfte	40
3.5.9	Schultergurtkräfte	40
3.6 B	3ewertungsmatrix	41
4 ER	GEBNISSE	43
4.1 E	Einzelversuchsergebnisse	43
4.1.1	Versuch 1	43

4.1.2	Versuch 2	45
4.1.3	Versuch 3	47
4.1.4	Versuch 4	49

4.2	Analyse der Fahrzeugkriterien	51
4.2.1	Fahrzeugbeschleunigung	51
4.2.2	ASI	54
4.2.3	THIV und OIV	55
4.2.4	PHD und ORA	56
4.2.5	Energieäquivalente Geschwindigkeit (EES)	56
4.3	Kopfkriterien	58
4.3.1	HIC	58
4.3.2	a3ms	59

4.4	Nacken	60
4.4.1	Scherkraft	60





Inhaltsverzeichnis	
4.4.2 Zugkraft	60
4.4.3 Nackenmoment	61
4.4.4 Nij	62
4.5 Brustkorb	63
4.5.1 Brustkorbbeschleunigung a3ms	63
4.5.2 Brustkorbeindrückung	63
4.5.3 Viscous Criterion	64
4.6 Untere Extremitäten - Oberschenkelkräfte	65
4.7 Schultergurtkräfte	66
4.8 Zusammenfassung und Korrelation der Fahrzeug- und Insassenkriterien	67
5 DISKUSSION	72
5.1 Fahrzeugkriterien	72
5.2 Insassenkriterien	75
5.2.1 Kopf	75
5.2.2 Nacken	76
5.2.3 Brustkorb	77
5.2.4 Untere Extremitäten – Oberschenkelkräfte	78
5.2.5 Schultergurtkräfte	78
5.3 Korrelation der Fahrzeug- zu Insassenkriterien	78
5.3.1 HIC vs. ASI und THIV/OIV bzw. PHD/ORA	78
5.3.2 a3ms Kopfbeschleunigung vs. ASI und THIV/OIV bzw. PHD/ORA	79
5.3.3 Nackenkriterien vs. ASI und THIV/OIV bzw. PHD/ORA	79
5.3.4 Brustkorbeindrückung vs. ASI und THIV/OIV bzw. PHD/ORA	80
5.3.5 a3ms Brustkorbbeschleunigung vs. ASI und THIV/OIV bzw. PHD/ORA	80
5.3.6 Viscous Criterion vs. ASI und THIV/OIV bzw. PHD/ORA	81
5.3.7 Untere Extremitäten – Oberschenkelkräfte vs. ASI und THIV/OIV bzw. PHD/ORA	81
6 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT	82
6.1 Zusammenfassung	82
6.2 Fazit	85
7 AUSBLICK	88



Inhaltsverzeichnis



ASFINAG



TU Graz I COMPARE

8	LITERATURQUELLEN	89
A	APPENDIX	A-1
<b>A.</b> 1	1 Versuch 1	A-3
A.2	2 Versuch 2	A-8
A.3	3 Versuch 3	A-13
A.4	4 Versuch 4	A-18
В	APPENDIX	В-23
B.1	L HIC15 vs. Fahrzeugkriterien	B-23
B.2	2 a3ms Kopfbeschleunigung vs. Fahrzeugkriterien	B-24
<b>B.</b> 3	3 Nij vs. Fahrzeugkriterien	B-25
<b>B.4</b>	1 Nackenscherkraft vs. Fahrzeugkriterien	B-26
B.5	5 Nackenzugkraft vs. Fahrzeugkriterien	B-27
в.6	5 Nackenmoment Extension vs. Fahrzeugkriterien	B-28
B.7	a3ms Brustkorbbeschleunigung vs. Fahrzeugkriterien	B-29
B.8	3 Brustkorbeindrückung vs. Fahrzeugkriterien	B-30
B.9	Viscous Criterion vs. Fahrzeugkriterien	B-31
B.1	10 Oberschenkelkraft vs. Fahrzeugkriterien	B-32
c	APPENDIX	C-33

C.1	Korrelation R und Signifikanz zwischen den einzelnen Insassenkriterien und der	
Fahrz	zeugbeschleunigung aXms	C-33









Abbildungsverzeichnis

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Durchschnittliches Fahrzeugalter von Pkw beim Anpralltest gemäß EN 1317 1
Abbildung 2: Zusammenhang zwischen AIS-Einzelverletzungen und der Überlebenswahrscheinlichkeit [17] 5
Abbildung 3: Anprall an die Stirnseite einer Tunnelpannenbucht (links) [18] und Beschädigung eines Fahrzeugs
beim Anprall an einen Anpralldämpfer (rechts) (Quelle: TU Graz) 6
Abbildung 4: Verletzungsschwere nach Körperregion von Pkw Insassen beim Anprall an ein
Fahrzeugrückhaltesystem (CEDATU) 8
Abbildung 5: Verletzungsschwere beim Anprall eines Pkw an ein Fahrzeugrückhaltesystem (IGLAD) 9
Abbildung 6: Verletzungsschwere nach den Körperregionen beim Anprall eines Pkw an ein
Fahrzeugrückhaltesystem (IGLAD) 9
Abbildung 7: Verletzungsschwere bezogen auf das Fahrzeuggewicht (IGLAD) 10
Abbildung 8: Zusammenhang zwischen ASI und HIC nach Shojaati und Schüler [9, 10] 11
Abbildung 9: Zusammenhang zwischen ASI und Anprallgeschwindigkeit (links) und ASI und HIC (rechts) bei
Madymo Simulationen an eine Leitschiene nach Klootwijk und Hoogvelt [14] 11
Abbildung 10: Zusammenhang zwischen HIC und ASI bzw. THIV nach Sturt und Fell [13] 13
Abbildung 11: Erreichte Punktebewertung beim Euro NCAP Seitenanprall nach Sturt und Fell [13] 13
Abbildung 12: Zusammenhang zwischen HIC und ASI bzw. THIV nach Chell et al. [12] 14
Abbildung 13: Zusammenhang zwischen HIC und ASI bzw. THIV nach Tomasch und Gstrein [28] 14
Abbildung 14: Zusammenhang zwischen ASI und HIC (links) und OIV und HIC (rechts) bei Frontalanpralltests $^1$ nach
Gabauer und Thomson [11] 15
Abbildung 15: Korrelation der Fahrzeugkriterien OIV, ORA und ASI mit der Fahrzeugmasse und der
Anprallgeschwindigkeit [29] 17
Abbildung 16: Verletzungsrisikofunktion in Zusammenhang mit dem ASI (Airbag und Gurt: obere Bilder; nur
Airbag: untere Bilder) [30] 18
Abbildung 17: Verletzungsrisikofunktion in Zusammenhang mit dem OIV (Airbag und Gurt: obere Bilder; nur
Airbag: untere Bilder) [30] 19
Abbildung 18: Exponentielle Korrelation zwischen ASI und HIC bzw. THIV und HIC unterschiedlicher Studien <sup>2</sup> 20
Abbildung 19: Aufbau Pannenbucht mit Betonblöcken und verschraubte Stahlträger 22
Abbildung 20: Nicht-rückleitender und nicht-kraftschlüssig mit dem Boden verbundener Anpralldämpfer 23
Abbildung 21: Schematische Darstellung der voll überdeckten (links) und teilüberdeckten Anprallkonfiguration
(rechts) 23
Abbildung 22: Theoretischer Zusammenhang zwischen Abkommensgeschwindigkeit und Abkommenswinkel 24
Abbildung 23: Zusammenhang zwischen Abkommensgeschwindigkeit und Abkommenswinkel auf Autobahnen
und Schnellstraßen (aktualisiert aus Tomasch et al. [39]) (links). Abkommenswinkel in einem
Geschwindigkeitsbereich zwischen 90 km/h und 110 km/h auf Autobahnen [31] (rechts). 25
Abbildung 24: Fahrzeugkoordinatensystem (links) und Position der Sensoren im Fahrzeugschwerpunkt (rechts)

27







Abbildungsverzeichnis	
Abbildung 25: Sensorpositionen und -Ausrichtung in der anthropomorphen Prüfpuppe	28
Abbildung 26: Schematische Positionen der Videokameras	29
Abbildung 27: "Flail space model" nach Michie [6] in Gabauer und Gabler [30]	30
Abbildung 28: Verletzungsrisikokurve von Schädelfrakturen bezogen auf den HIC nach Hertz [58] in [52]	35
Abbildung 29: Risikokurven der Verletzungsschwere zu HIC [59]	36
Abbildung 30: Nij Risikokurven für AIS 3+ und AIS 5+ Verletzungen nach Mertz [65] und Prasad [64] in [52]	38
Abbildung 31: Verletzungsrisikokurve für Oberschenkelkräfte [52]	40
Abbildung 32: Beispielhafte Farbklassifizierung	42
Abbildung 33: Fahrzeuglängsbeschleunigung bei voller Überdeckung (links) und Teilüberdeckung (rechts)	52
Abbildung 34: Fahrzeuglängsbeschleunigung (links) und resultierende Fahrzeugbeschleunigung (rechts)	52
Abbildung 35: Maximale Beschleunigung und aXms Fahrzeugbeschleunigung in den vier Anprallversuchen	52
Abbildung 36: Geschwindigkeitsverlauf in Längsrichtung der Fahrzeuge in den vier Anprallversuchen	54
Abbildung 37: ASI in den vier Anprallversuchen	55
Abbildung 38: THIV und OIV in den vier Anprallversuchen	55
Abbildung 39: PHD und ORA in den vier Anprallversuchen	56
Abbildung 40: Seitliches Beschädigungsbild der Fahrzeuge zur Abschätzung der EES	57
Abbildung 41: Vergleich des HIC der vier Anprallversuche und Grenzen gemäß Euro NCAP Frontalanprall (I	inks:
HIC15, rechts: HIC36)	58
Abbildung 42: Vergleich a3ms Kopfbeschleunigung der vier Anprallversuche und Grenzen gemäß Euro N	ICAP
Frontalanprall	59
Abbildung 43: Vergleich der Scherkräfte der vier Anprallversuche und Grenzen gemäß Euro NCAP Frontalan	prall
	60
Abbildung 44: Vergleich der Zugkräfte der vier Anprallversuche und Grenzen gemäß Euro NCAP Frontalan	prall
	61
Abbildung 45: Vergleich der Nackenmoment für Flexion (unten links) und Extension (unten rechts) der	vier
Anprallversuche und Grenzen gemäß Euro NCAP Frontalanprall	62
Abbildung 46: Vergleich des Nackenkriteriums Nij der unterschiedlichen Belastungskonfigurationen (links)	und
der Maximalwerte (rechts) der vier Anprallversuche	63
Abbildung 47: Brustkorbbeschleunigung der vier Anprallversuche und Grenzen gemäß FMVSS 208	63
Abbildung 48: Vergleich der Brustkorbeindrückung der vier Anprallversuche und Grenzen gemäß Euro N	ICAP
Frontalanprall	64
Abbildung 49: Viskosekriterium der vier Anprallversuche und Grenzen gemäß Euro NCAP Frontalanprall	64
Abbildung 50: Zeitlicher Verlauf der Oberschenkelkräfte in den vier Anprallversuchen	65
Abbildung 51: Oberschenkelkräfte der vier Anprallversuche und Grenzen gemäß Euro NCAP Frontalanprall	65
Abbildung 52: Verlauf der Schultergurtkräfte	66
Abbildung 53: Farbklassifizierung des Verletzungsrisikos beim Insassen	67
Abbildung 54: Relativwerte der Insassenkriterien bezogen auf die unterschiedlichen Grenzen des Frontanp	oralls
gemäß Euro NCAP oder der FMVSS 208	68









Tabellenverzeichnis

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: AIS Körperregionen [17]	4
Tabelle 2: AIS Verletzungsschwere mit Beispielen [17]	5
Tabelle 3: Linearer Korrelationskoeffizient und Signifikanz zwischen ASI, THIV und ORA mit den Insassenki	riterien
(HIC, Brustbeschleunigung a3ms und Brustkorbeindrückung (CD: Chest Deflection) <sup>1</sup> auf Grundlage von G	abauer
und Thomson [11]	16
Tabelle 4: Mittelwerte der Kriterien bezogen auf die Anprallgeschwindigkeiten <sup>1</sup> auf Grundlage von Gabau	ier und
Thomson [11]	16
Tabelle 5: Lineare Korrelation zwischen ASI bzw. THIV und dem HIC unterschiedlicher Studien	20
Tabelle 3-1: Versuchsmatrix	26
Tabelle 2: Fahrzeuginstrumentierung	27
Tabelle 3: Sensorbelegung der anthropomorphen Prüfpuppe	28
Tabelle 4: Grenzwerte Beschleunigungen [42]	31
Tabelle 5: Grenzwerte OIV [48, 49]	32
Tabelle 6: Grenzwerte ORA [48, 49]	32
Tabelle 7: Grenzwerte für den HIC	35
Tabelle 8: Grenzwert der maximalen Kopfbeschleunigung gemäß	36
Tabelle 9: Kritische Grenzwerte für Nackenkräfte und Momente im Euro NCAP [3]	37
Tabelle 10: Kritische Grenzwerte für Nackenkräfte und Momente in der FMVSS 208 [4]	37
Tabelle 11: Kritische Grenzwerte für Brustbeschleunigungen in der FMVSS [4]	38
Tabelle 12: Kritische Grenzwerte für die Brustkorbeindrückung	39
Tabelle 13: Kritische Grenzwerte für das Viskose Kriterium	39
Tabelle 14: Kritische Grenzwerte für die Oberschenkelkraft	40
Tabelle 15: Kriterien und Grenzwerte für den Insassenschutz gemäß Euro NCAP Frontalanprall [3]	41
Tabelle 16: Grenzwerte der Verletzungskriterien gemäß FMVSS 208 [4]	42
Tabelle 17: Maximale Beschleunigung und aXms Fahrzeugbeschleunigung der vier Anprallversuche	53
Tabelle 18: Risiko einer AIS Verletzung bezogen auf den HIC36 (Berechnung gemäß [59])	59
Tabelle 19: Bewertungskriterien bezogen auf Fahrzeugmessdaten	69
Tabelle 20: Bewertungskriterien bezogen auf Messdaten der anthropomorphen Prüfpuppe	70
Tabelle 21: Lineare Korrelation R und Signifikanz zwischen Fahrzeug- und Insassenkriterien	(grün:
Signifikanzniveau 5%, orange: Signifikanzniveau 10%)	71
Tabelle 22: Risiko einer Kopfverletzung nach AIS Schweregraden gemäß NHTSA und Prasad und Mertz [59	9] 76









Abkürzungsverzeichnis

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AIS Abbreviated Injury Scale ASI Acceleration Severity Index ATD Anthropomorphic Test Device **CD** Chest Deflection CE Compression / Extension CEDATU Central Database for In-Depth Accident Study CF Compression / Flexion EDR Event Data Recorder EES Energy Equivalent Speed Euro NCAP European New Car Assessment Protocol FE Finite Elemente FMVSS Federal Motor Vehicle Safety Standard GSI Gadd Severity Index HIC Head Injury Criterion IGLAD Initiative for the Global harmonization of Accident Data MAIS Maximum Abbreviated Injury Scale MiniDAU Mini Data Acquisition Unit

NCE Neck Compression Extension NCF Neck Compression Flexion National Highway Traffic Safety NHTSA Administration NTDB National Trauma Data Base NTE Neck Tension Extension NTF Neck Tension Flexion **OIV** Occupant Injury Velocity **ORA** Occupant Ridedown Acceleration PMHS Post Mortem Human Surrogates R Bestimmtheitsmaß Roadside Infrastructure for Safer RISER European Roads TE Tension / Extension TF Tension / Flexion THIV Theoretical Head Impact Velocity UN ECE United Nations Economic Commission for Europe VC Viscous Criterion WSTC Wayne State Tolerance Curve









Einleitung

## **1 EINLEITUNG**

### 1.1 Motivation

Zur Absicherung von festen Hindernissen bei beengten Verhältnissen (z.B. Trenninselspitz) werden beispielsweise Anpralldämpfer verwendet. Für diese gibt es gemäß EN 1317 [1] standardisierte Prüfvorschriften für eine CE Kennzeichnung. Hierbei handelt es sich um konkrete Prüfvorschriften, jedoch ohne Bezug auf die Verwendung und von den Prüfvorschriften abweichende Fahrzeuge bzw. Anprallsituationen (z.B. Anprallgeschwindigkeit, Anprallwinkel). Je nach Bauart des Anpralldämpfers (zurückleitend, nicht-zurückleitend) sind bis zu sechs Versuche mit unterschiedlichen Fahrzeugklassen, Anprallkonfiguration (Winkel, Überdeckung) sowie Anprallgeschwindigkeit erforderlich, um eine Zulassung für eine bestimmte Leistungsklasse zu erhalten [1]. Die für die Prüfungen zu verwendenden Fahrzeuge müssen laut Norm EN 1317 Modelle aus der Produktion und bei Fahrzeugen bis einschließlich 1.500 kg für den aktuellen Verkehr in Europa gängige Modelle sein. Das Mindestprüfgewicht der Fahrzeuge ist 900 kg. Es dürfen keine Reparaturen oder Veränderungen, einschließlich Verstärkungen, vorgenommen werden, die die allgemeinen Eigenschaften des Fahrzeugs ändern oder dessen Zulassung aufheben würden. Für einen (Zertifzierungs-)Test von Anpralldämpfern nach den Kriterien der EN 1317 verwendeten Fahrzeuge müssen jedoch nicht notwendigerweise dem neuesten Stand der Technik entsprechen. In der Regel sind die verwendeten Fahrzeuge sehr alt und vorhandene Airbags werden beim Test deaktiviert. Das Durchschnittsalter des Fahrzeugbestands in Deutschland betrug 2017 9,3 Jahre und für 2023 ist prognostiziert, dass es auf 10 Jahre ansteigt [2]. Dennoch sind im Vergleich dazu die Fahrzeuge bei einem Anpralltest deutlich älter, wie eine Auswertung von Versuchsdaten der TU Graz verdeutlicht. Das durchschnittliche Alter der Pkw beim Anpralltest ist 21,5 (SA=4,3) Jahre und reicht von 12,1 bis zu 32 Jahre (Abbildung 1).



Abbildung 1: Durchschnittliches Fahrzeugalter von Pkw beim Anpralltest gemäß EN 1317

Es ist zu vermuten, dass Fahrzeuge mit verbesserter Sicherheitsausstattung (Airbag, Gurtstraffer, Gurtkraftbegrenzer, etc.) und verbunden mit einer höheren Fahrzeugmasse, beim Anprall ein geringeres







Einleitung

Verletzungsrisiko aufweisen, als Fahrzeuge, welche nur den Kriterien der EN 1317 entsprechen, jedoch keine adäquate verbesserte Sicherheitsausstattung verbaut haben bzw. diese deaktiviert ist.

### **1.2** Forschungsziel

Ziel dieses Forschungsprojektes ist eine objektive Beurteilung der Insassensicherheit von Pkw beim Anprall an nicht kraftschlüssig mit dem Boden verbundenen Anpralldämpfern. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden bereits nach EN 1317 geprüfte und zertifizierte CE-gekennzeichnete Produkte verwendet. Die Anprallszenarien weichen jedoch deutlich von den Anprallkonfigurationen gemäß EN 1317 ab und sind demnach <u>nicht</u> mit einem Zertifizierungstest vergleichbar.

Bei den Anprallversuchen sollen neben den herkömmlichen in der EN 1317 zulässigen Fahrzeugen auch Fahrzeuge mit verbesserter Sicherheitsausstattung (Airbag, Gurtstraffer, etc.) berücksichtigt werden. Gemäß EN 1317 ist keine volle messtechnische Erfassung von Insassenwerten an anthropomorphen Prüfpuppen (ATD: Anthropomorphic Test Device) vorgesehen. Für diese Studie sollen bei den Anpralltests in der Bewertung die in der Fahrzeugindustrie üblicherweise verwenden Kriterien (wie z.B. HIC) erfasst und berücksichtigt werden.

Folgende Anprallszenarien sind zu untersuchen:

- Versuch 1:
  - o Anprall: frontal, mittig, Überdeckungsgrad Fahrzeug: 100%
  - Anprallwinkel: 0°
  - Fahrzeug: gemäß EN 1317 mit einem Gewicht von 900 +/- 40 kg
  - Anprallgeschwindigkeit: 100 km/h
- Versuch 2:
  - o Anprall: frontal, mittig, Überdeckungsgrad Fahrzeug: 100%
  - Anprallwinkel: 0°
  - Fahrzeug: aktueller Pkw der Kompaktklasse (z.B. VW Golf) mit verbesserter Sicherheitsausstattung
  - o Anprallgeschwindigkeit: 100 km/h
- Versuch 3:
  - o Anprall: frontal, Fahrzeug versetzt, Überdeckungsgrad Fahrzeug: 50%
  - Anprallwinkel: 0°
  - Fahrzeug: gemäß EN 1317 mit einem Gewicht von 900 +/- 40 kg
  - Anprallgeschwindigkeit: 100 km/h
- Versuch 4:









Einleitung

- o Anprall: frontal, Fahrzeug versetzt, Überdeckungsgrad Fahrzeug: 50%
- Anprallwinkel: 0°
- Fahrzeug: aktueller Pkw der Kompaktklasse (z.B. VW Golf) mit verbesserter Sicherheitsausstattung
- Anprallgeschwindigkeit: 100 km/h

Neben den üblichen Messwerten im Fahrzeuge sollen zusätzliche messtechnische Aufzeichnungen an einem ATD (Kopf, Brust, Becken/Oberschenkel) erfolgen. Die ermittelten Kriterien gemäß EN 1317 sollen mit den Kriterien der anthropomorphen Prüfpuppe gegenübergestellt werden.







 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Introvation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Stand der Technik

## **2 STAND DER TECHNIK**

Während in der Entwicklung von Fahrzeugen anthropomorphe Prüfpuppen bei entsprechenden Tests zum Einsatz kommen [3–5], wird für die Bewertung der Insassensicherheit beim Anprall an Objekten des Straßenraumes (z.B. Fahrzeugrückhaltesysteme, Tragkonstruktionen für die Straßenausstattung) auf Risikomodelle zurückgegriffen (z.B. "flail space model" [6] zur Berechnung des THIV (Theoretical Head Impact Velocity) [7, 8]. Hierbei werden auf Grund von Messdaten im Fahrzeug Kriterien berechnet. In vielen Studien wurde bereits versucht einen Zusammenhang zwischen Kriterien der Fahrzeugsicherheit und Bewertung der Insassensicherheit beim Anprall an Objekten des Straßenraums herzustellen [9–15]. Die meisten Studien beziehen sich auf Fahrzeugrückhaltesysteme gemäß EN 1317-2 [9, 10, 12, 14, 15] mit Anprallwinkeln von 20°. Lediglich Gabauer und Thomson [11] haben in ihrer Studie Frontalkollisionen ausgewertet.

### 2.1 Verletzungsschwere

In der nationalen Statistik wird die Verletzungsschwere nach leicht, schwer und tödlich verletzt unterteilt. Für eine detaillierte und objektive Bewertung der Verletzungsschwere kommt in der Unfallforschung das AIS (Abbreviated Injury Scale) zur Anwendung - diese Bewertungsklassifikation wurde in den 1960iger Jahren entwickelt [16]. Mit dem AIS wird jede Einzelverletzung objektiv bewertet und einer entsprechenden Verletzungsschwere zugeordnet. Dabei unterscheidet man sechs Verletzungsschweregrade (Tabelle 2) und neun Körperregionen (1: Kopf, 2: Gesicht, 3: Hals/Nacken, 4: Brustkorb, 5: Abdomen, 6: Wirbelsäule, 7: Obere Extremitäten, 8: Untere Extremitäten, 9: Extern (Hautverletzungen / Verbrennungen) (Tabelle 1) [17]. Die Körperregion "Extern" ist in dem Sinn keine eigene Körperregion.

Körperregion	Description	Beschreibung	
1	Head (Cranium and Brain)	Kopf (Schädel und Hirn)	
2	Face, including eye and ear Gesicht inkl. Augen und Ohren		
3	Neck	Hals (ohne Rückenmark)	
4	Thorax	Brustkorb	
5	Abdomen and Pelvic Contents	Abdomen und Becken	
6	Spine (Cervical, Thoracic, Lumbar)	e (Cervical, Thoracic, Lumbar) Wirbelsäule (Hals, Brust, Lenden)	
7	Upper Extremity	Obere Extremitäten	
8	Lower Extremity and Buttocks	Untere Extremitäten	
9	External (Skin) and Thermal Injuries	Äußere Verletzungen und Verbrennungen	







 Bundesministerium Elimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Stand der Technik

Tabelle 2: AIS Verl	etzungsschwere	e mit Beispielen	[17]

Schweregrad	Beschreibung	Beispiele
1	Leicht verletzt (Minor)	Schürfwunde, Nasenbeinfraktur, Muskelprellung
2	Ernsthaft verletzt (Moderate)	Schädelbasisfraktur; Oberkieferfraktur, 2-3 Rippenfrakturen, Fraktur Mittelfuß, Beckenfraktur
3	Schwer verletzt (Serious)	2-3 Rippenfrakturen mit Hämato- oder Pneumothorax, Milz- Ruptur, Femurfraktur
4	Sehr schwer verletzt (Severe)	Beidseitige Lungen-Lazeration, Nieren/Leber Ruptur
5	Kritisch verletzt (Critical)	Großes epidurales oder subdurales Hämatom, vollständige Zerstörung von Organen
6	Maximal verletzt (Maximum, currently untreatable)	Massive Destruktion von Hirnschädel und Gehirn, Aorten-La- zeration, Abriss Leber
9	Unbekannte Verletzungsschwere	

Werden mehrere Verletzungen diagnostiziert, kommt das MAIS (Maximum AIS) zur Anwendung, wobei die schwerste Verletzung die Verletzungsschwere des Insassen definiert. Der in Abbildung 2 dargestellte Zusammenhang zwischen AIS-Einzelverletzungen und der Überlebenswahrscheinlichkeit wurde aus Auswertungen der National Trauma Data Base (NTDB) ermittelt.

Das AIS wird in weitere Folge mit Verletzungskriterien in Zusammenhang gebracht und meist werden die Verletzungsschweregrade gruppiert, z.B. AIS 3+, MAIS3+. Das bedeutet das in diesen Fällen Verletzungen des Schweregrads 3 und höher zusammengefasst werden. Beim AIS 3+ werden alle Verletzungen, die ein Verkehrsopfer aufweist, mit einem Schweregrad von 3 oder höher berücksichtigt, unabhängig von der Körperregion. Bei MAIS 3+ Verletzungen wird hingegen nur die maximale Verletzungsschwer je Körperregion berücksichtigt und dementsprechend alle Schweregrade von 3 und höher zusammengefasst.



Abbildung 2: Zusammenhang zwischen AIS-Einzelverletzungen und der Überlebenswahrscheinlichkeit [17]







 Bundesministerlum Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Stand der Technik

### 2.2 Verletzungsanalyse von Pkw-Kollisionen mit Fahrzeugrückhaltesystemen

Der Anprall an ein ortsfestes Hindernis, insbesondere gegen eine starre Wand, ist mit massiven Intrusionen in die Fahrgastzelle verbunden (Abbildung 3, links). Im Vergleich dazu ist die Beschädigung eines Fahrzeugs beim Anprall an einen Anpralldämpfer (Abbildung 3, rechts) relativ gering. Es sind zwar massive Beschädigungen an der Fahrzeugfront festzustellen, jedoch bleibt die Fahrgastzelle intakt. Bei diesem Unfall blieb der Insasse, bis auf eine Daumenprellung, unverletzt. Das Geschwindigkeitslimit in diesem Straßenabschnitt betrug 130 km/h. Mit welcher Geschwindigkeit das Fahrzeug schließlich an den Anpralldämpfer anprallte, konnte auf Grund fehlender weiterer Daten nicht ermittelt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Anprallgeschwindigkeit über 100 km/h lag.



Abbildung 3: Anprall an die Stirnseite einer Tunnelpannenbucht (links) [18] und Beschädigung eines Fahrzeugs beim Anprall an einen Anpralldämpfer (rechts) (Quelle: TU Graz)

Zur Bewertung eines Verletzungsmusters der Insassen beim Anprall gegen ein Fahrzeugrückhaltesystem wurden die Unfalldatenbank CEDATU (Central Database for In-Depth Accident Study) [19, 20] und die IGLAD (Initiative for the Global harmonization of Accident Data) [21, 22] ausgewertet.

Die CEDATU ist eine österreichweite Unfalldatensammlung von Unfällen mit Personenschaden und auch Sachschaden und wird vom Institut für Fahrzeugsicherheit der TU Graz betrieben. Am derzeitigen Stand sind etwa 4.200 Verkehrsunfälle für eine Auswertung verfügbar. Nach Anwendung von Filterkriterien konnten neun Kollisionen an Rückhaltesystemen ausgewertet werden.

Folgende Filterkriterien wurden für die Analyse von Unfällen mit Rückhaltesystemen angewandt:

- o Es werden nur Unfälle mit einem Unfallbeteiligten betrachtet
- Es werden nur Unfälle von Pkw mit einem Rückhaltesystem ausgewertet. Es wurde keine Unterscheidung nach Stahl oder Beton getroffen.





Stand der Technik

- Es werden keine Folgekollisionen berücksichtigt. D.h. es werden nur Unfälle, in welcher es zu einer Einzelkollision mit Rückhaltesystem gekommen ist, berücksichtigt. Damit sollen Verletzungen, die unter Umständen durch Folgekollisionen hervorgerufen werden, ausgeschlossen werden.
- Die Verletzungsschwere wird nach dem AIS nach Körperregion unterschieden. Es wird keine maximale Verletzungsschwere je Körperregion gebildet.

Die IGLAD ist eine weltweite Unfalldatenzusammenführung von bestehenden Unfalldaten. Derzeit sind etwa 8.000 Verkehrsunfälle gesammelt. 76 Unfälle mit Rückhaltesystemen konnten nach Anwendung der nachfolgenden Filterkriterien mit folgenden Einschränkungen analysiert werden:

- Es werden nur Unfälle mit einem Beteiligten betrachtet.
- Es werden nur Kollisionen von Pkw mit dem Rückhaltesystem ausgewertet. Unter der Kategorie "Rückhaltesystem" der Datensammlung können auch Kollisionen mit Anpralldämpfern codiert sein. Eine Analyse von Kollisionen gegen Anpralldämpfern ist nicht möglich.
- In den Daten ist keine Unterscheidung nach Stahl und Beton möglich. Es kann lediglich ein Anprall gegen ein Rückhaltesystem ausgewertet werden.
- Es werden keinen Folgekollisionen berücksichtigt, d.h. Verletzungen, welche unter Umständen durch nachfolgende Kollisionen verursacht werden können, werden in der Analyse nicht berücksichtigt.
- Es kann nur maximale Verletzungsschwere bezogen auf die Körperregion MAIS (Maximum Abbreviated Injury Scale) ausgewertet werden.

In Abbildung 4 ist die Verletzungsschwere nach den einzelnen Körperregionen aus den Unfalldaten der CEDATU dargestellt. Insbesondere der Kopf, der Brustkorb und die unteren Extremitäten werden beim Anprall an ein Rückhaltesystem verletzt. Mit zunehmender Verletzungsschwere erhöht sich der Anteil bei den Brustkorbverletzungen, aber auch bei Kopfverletzungen ist eine Zunahme des Anteils festzustellen. Die Wirbelsäule ist nicht untergliedert in die einzelnen Körperregionen "Nacken", "Brustkorb" und "Abdomen", sondern wird als eigene AIS Körperregion definiert. In der Körperregion "Nacken" werden keine Skeletverletzungen klassifiziert. Die Verletzungen beziehen sich hierbei vorwiegend auf Gefäß- und Organverletzungen. Daher ist es nachvollziehbar, dass in den analysierten Datensätzen für die Körperregion "Nacken" keine Verletzungen aufscheinen.

Auf Grund der geringen Fallzahl sind weitere Schlussfolgerungen hier allerdings nicht sinnvoll.







Stand der Technik



Abbildung 4: Verletzungsschwere nach Körperregion von Pkw Insassen beim Anprall an ein Fahrzeugrückhaltesystem (CEDATU)

Bei den Unfalldaten der IGLAD ist die Verletzungsschwere MAIS 1 am häufigsten (Abbildung 5). Die am häufigsten verletzten Körperregionen (MAIS 1+) sind der Kopf, der Brustkorb und die Extremitäten (Abbildung 6). Mit zunehmender Verletzungsschwere gewinnen jedoch Kopf- und Brustkorbverletzungen an Bedeutung. So sind bei MAIS 3+ und MAIS 4+ Verletzungen der Kopf und der Brustkorb die dominanten Körperregionen.

Hinsichtlich des Fahrzeuggewichts lässt sich kein eindeutiger Trend in Bezug auf die Verletzungsschwere ableiten (Abbildung 7). Sowohl bei MAIS 1 Verletzungen ist eine große Spannweite bei den Fahrzeuggewichten festzustellen. Mit zunehmender Verletzungsschwere wird allerdings die Spannweite bei den Fahrzeuggewichten deutlich kleiner.









Stand der Technik



#### Abbildung 5: Verletzungsschwere beim Anprall eines Pkw an ein Fahrzeugrückhaltesystem (IGLAD)





system (IGLAD)







TU Graz I COMPARE

Stand der Technik



Abbildung 7: Verletzungsschwere bezogen auf das Fahrzeuggewicht (IGLAD)

### 2.3 Verletzungskriterien und Verletzungsrisiken

In diesem Kapitel werden Verletzungskriterien und Verletzungsrisiken aus der Literatur zusammengefasst. Es werden die Erkenntnisse zu Zusammenhängen zwischen Fahrzeugkriterien und Insassenkriterien beschrieben.

#### 2.3.1 Korrelation von Insassen- und Fahrzeug-Kriterien

Einer der ersten Versuche einen Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Bewertungskriterien (Fahrzeug: ASI, Insasse: HIC) herzustellen erfolgte durch Shojaati und Schüler [9, 10] gemäß den Anprallbedingungen TB11 nach EN 1317-2 [23]. Bei den Versuchen wurde Beschleunigungen in einem Dummykopf mitgemessen. In Abbildung 8 ist der Zusammenhang zwischen HIC und ASI dargestellt, welcher auf Basis von neun Anpralltests hergestellt wurde. Dieser hat nach den Darstellungen Shojaati und Schüler [10] und in Shojaati [9] einen exponentiellen Verlauf. Demnach wäre bei einem ASI von 2,0 ein HIC von etwa 1.000 zu erwarten. Allerdings sind weder Shojaati und Schüler [10] noch in Shojaati [9] Angaben zu der ermittelten Exponentialfunktion enthalten, sodass der dargestellte Verlauf nicht nachvollzogen werden kann. Es entsteht der Eindruck, dass die Kurve manuell hinzugefügt wurde. Aus Mangel an konkreten Angaben zu den Werten von ASI und HIC erfolgte eine Schätzung auf Grund





Stand der Technik

der Werte in der veröffentlichten Abbildung (Abbildung 8). Eine Schätzung auf Grund der Datenpunkte ergibt ein R<sup>2</sup> von 0,6792. Eine Schätzung von Roque und Cardoso [24] kommt auf ein R<sup>2</sup> von 0,7694.



Abbildung 8: Zusammenhang zwischen ASI und HIC nach Shojaati und Schüler [9, 10]

Von Klootwijk und Hoogvelt [14] wurden im EU Projekt RISER (Roadside Infrastructure for Safer European Roads) [25] mit dem Mehrkörper-Simulationsprogramm Madymo 22 Simulationen mit einer Stahlleitschiene durchgeführt. Die Anprallgeschwindigkeiten wurden zwischen 10 und 28 m/s variiert, die Anprallwinkel zwischen 5 und 35° und der Fahrzeugwinkel zur Leitschiene zwischen 0 und 45°. Details zu den Simulationen sind dem RISER Deliverable D03 [26] zu entnehmen. Die Simulationen wiesen einen ASI von kleiner als 2,00 und einen HIC von kleiner als 1.000 auf (Abbildung 9).



Abbildung 9: Zusammenhang zwischen ASI und Anprallgeschwindigkeit (links) und ASI und HIC (rechts) bei Madymo Simulationen an eine Leitschiene nach Klootwijk und Hoogvelt [14]





 Bundesministerlum Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Stand der Technik

Von Anghileri et al. [15] wurden 23 Versuche mit dem Test TB11 ausgewertet und der ASI (Acceleration Severity Index) und THIV mit dem HIC (Head Injury Criterion) korreliert. Welche konkreten Fahrzeugrückhaltesysteme dabei berücksichtigt wurden, ist nicht bekannt. Drei der untersuchten Versuche wiesen einen HIC größer als 1.000 auf, obwohl der ASI als auch der THIV die, in der EN 1317, definierten Grenzwerte für die Anprallheftigkeitsstufe B nicht überschritten. Diese hohen HIC Werte waren auf einen direkten Kopfkontakt mit dem Rückhaltesystem zurückzuführen. In anderen Versuchen wurde ein höherer ASI, als für die Anprallheftigkeitsstufe B zulässig, festgestellt, wobei der HIC unter 100 lag.

Für eine Simulationsstudie wurden von Sturt und Fell [13] drei Anprallversuche zur Validierung der FE-Modelle (Finite Elemente) durchgeführt. Es wurden in der FE-Simulation Anprallgeschwindigkeiten zwischen 90 km/h und 150 km/h und Anprallwinkel zwischen 10° und 25° variiert. Als Fahrzeugrückhaltesystem wurde eine Betonbarriere gewählt. Das Ziel war eine Korrelation zwischen Verletzungsrisiko und Anprallschwere aufzuzeigen und Grenzwerte für das Verletzungsrisiko vorzuschlagen. Für die Bewertung wurden HIC, Nackenkräfte, Nackenmomente und Brustkorbeindrückung mit den Infrastrukturkriterien ASI und THIV korreliert. Die akzeptable Grenze für den HIC wurde mit einem Wert von 325 festgelegt. Bei diesem Wert wäre das Risiko einer AIS 2+ (Abbreviated Injury Scale) unter 10% [27]. Bis auf drei Simulationen war der HIC durchwegs unter diesem Wert (Abbildung 10). In den drei Simulationen erfolgte ein Kopfanprall gegen den Fahrgastinnenraum. Der ASI erreichte in den Simulationen einen maximalen Wert von ca. 2,3 und der THIV ca. 42,5 km/h. Für weitere Bewertungen wurde das Euro NCAP Bewertungsprotokoll beim Seitenanprall herangezogen. Dabei werden für die Körperregionen Kopf, Brustkorb, Abdomen und Becken jeweils maximal vier Punkte vergeben. Die dabei erreichten Punkte wurden dem ASI und THIV gegenübergestellt (Abbildung 11). Mit zunehmender Unfallschwere, d.h. mit zunehmendem ASI und THIV erreichte der Brustkorb nicht mehr die volle Punkteanzahl. Dies erfolgt ab einem ASI von etwa 2,0 und ab einem THIV von 35 km/h. Für Sturt und Fell [13] sind bei Einhalten der Grenzwerte für ASI und THIV gemäß EN 1317 [1] keine schweren Verletzungen des Brustkorbs, des Abdomens oder des Becken zu erwarten. Ebenso sind Messdaten für den Kopf innerhalb akzeptabler Werten, sofern der ASI unter 2,0 und der THIV unter 35 km/h bleiben. Für Verletzungen des Nackens wären die Grenzen für den ASI bei 1,5 und 30 km/h beim THIV. Jedenfalls sind für Sturt und Fell [13] Werte für den ASI über 2,0 und THIV über 38 km/h nicht akzeptabel. Die Autoren schlussfolgern, dass die Ergebnisse nicht notwendigerweise auf andere Rückhaltesysteme übertragbar sind.

Das von Sturt und Fell [13] zur Punktebewertung verwendete Euro NCAP (European New Car Assessment Programme) Bewertungsprotokoll mit der Version 4.1 ist aus dem Jahre 2004. Das derzeitige







TU Graz I COMPARE

Stand der Technik

Bewertungsprotokoll hat die Versionsnummer 8.1 und ist aus 2022. Ein direkter Vergleich der Punktevergabe zwischen den beiden Versionen ist daher nicht möglich. Eine erneute Bewertung der Simulationsergebnisse mit dem derzeit aktuellen Bewertungsprotokoll würde unter Umständen zu anderen Ergebnissen kommen.



Abbildung 10: Zusammenhang zwischen HIC und ASI bzw. THIV nach Sturt und Fell [13]



Abbildung 11: Erreichte Punktebewertung beim Euro NCAP Seitenanprall nach Sturt und Fell [13]

Bei Chell et al. [12] wurden Zusammenhänge zwischen ASI und THIV mit dem HIC aus 28 Anpralltests gegen Stahlleitschienen und fünf Anpralltests gegen Betonbarrieren untersucht. Ebenso wurde die 3ms Kopfbeschleunigung und das Risiko von Nackenverletzungen betrachtet. Der HIC15 war bis auf drei der untersuchten Anprallversuche durchwegs unter dem Limit von 700 gemäß Euro NCAP [3] oder FMVSS 208 (Federal Motor Vehicle Safety Standard) [4]. Die a3ms Kopfbeschleunigung wurde in der Veröffentlichung allerdings nicht explizit angegeben. Die Nackenverletzungen wurden nur relativ bewertet.







 Bundesministerlum Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Stand der Technik



Abbildung 12: Zusammenhang zwischen HIC und ASI bzw. THIV nach Chell et al. [12]

Tomasch und Gstrein [28] analysierten 73 Anprallversuche an Stahlleitschienen und Betonbarrieren mit unterschiedlichen Aufhaltestufen und Untergründen (Abbildung 13). Zwischen HIC und ASI ist eine sehr leichte, nicht signifikante (p=0,261), Korrelation (R=0,13) festzustellen. Für den HIC und THIV ist ebenso eine sehr leichte, nicht signifikante (p=0,230), Korrelation (R=0,14) festzustellen.



Abbildung 13: Zusammenhang zwischen HIC und ASI bzw. THIV nach Tomasch und Gstrein [28]

In den vorangegangenen Studien wurden Anpralltests an Fahrzeugrückhaltesysteme untersucht und Zusammenhänge zwischen ASI bzw. THIV und Kriterien in der Fahrzeugentwicklung hergestellt. Nachfolgend wurden von Gabauer und Thomson [11] allerdings 24 Versuche mit insgesamt 44 Messdatensätzen von anthropomorphen Prüfpuppen von Frontalanpralltests mit voller Überdeckung und mit Teilüberdeckung untersucht. Dabei handelte es sich aber nicht um Anpralltests gegen Fahrzeugrückhaltesystemen an Straßen. Die Anprallgeschwindigkeiten reichten von 40 km/h bis 64 km/h. Kriterien die untersucht wurden waren der HIC, die Brustkorbeindrückung, 3ms Brustbeschleunigung und die Oberschenkelkräfte. Korreliert wurden diese Kriterien mit Infrastrukturkriterien ASI, OIV (Occupant Injury Velocity) und ORA (Occupant Ridedown Acceleration). Die Insassen waren bei den Versuchen mit







 Bundesministerlum Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Stand der Technik

25 mph und 30 mph nur durch einen Airbag geschützt und bei 35 mph und 40 mph durch einen Airbag und Gurt.

Beispielhaft dargestellt ist der Zusammenhang zwischen ASI und HIC sowie OIV und HIC aus der Studie von Gabauer und Thomson [11] in Abbildung 14<sup>1</sup>. Ein ASI von unter bzw. ca. 1,4 wurde nur bei Anpralltests mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h (25 mph) festgestellt. Beispielsweise ist der HIC bei einer Anprallgeschwindigkeit von 56 km/h (35 mph) zwischen 300 und 1.000 und der ASI zwischen 1,7 und 2,3 bzw. der OIV zwischen rd. 12 m/s und 17 m/s. Aus Sicht von Gabauer und Thomson [11] ist kein Zusammenhang zwischen HIC und ASI bzw. OIV sowie der Brustkorbeindrückung mit ASI bzw. OIV festzustellen. Zu beachten ist, dass der HIC und Brustkorbeindrückung massiv vom Insassen-Rückhaltesystem (z.B. Airbag, Gurtstraffer, etc.) im Fahrzeug abhängig sind. Bezogen auf den HIC wäre die größte Korrelation mit der ORA festzustellen, wobei der ASI am stärksten mit der maximalen Brustbeschleunigung korreliert. Bezogen auf die analysierten Fahrzeug-Kriterien ist für Gabauer und Thomson [11] der ASI und OIV als eher konservativ einzustufen. Weitere Erklärungen zu dieser Schlussfolgerung werden von Gabauer und Thomson nicht angeführt.



Abbildung 14: Zusammenhang zwischen ASI und HIC (links) und OIV und HIC (rechts) bei Frontalanpralltests<sup>1</sup> nach Gabauer und Thomson [11]

Betrachtet man nur die Daten bei einer Anprallgeschwindigkeit von 56 km/h (35 mph), so kann zwischen ASI und HIC eine negative Korrelation (R=-0,46) bei einem p-Wert von 0,025 festgestellt werden (Tabelle 3). Bei einer Anprallgeschwindigkeit von 40 km/h (25 mph) eine positive (R=0,4) und bei einer Anprallgeschwindigkeit von 48 km/h (30 mph) ist der Korrelationskoeffizient R=0,02. Aus den Daten kann zwischen ASI und HIC nur ein schwacher Zusammenhang vor (R=0,25). Zwischen THIV und HIC kann ein deutlicher linearer Zusammenhang festgestellt werden (R=0,64).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Die Einzelwerte wurden aus der Studie auf Grund der vorhandenen Diagramme abgeschätzt







TU Graz I COMPARE

Stand der Technik

Bei einer Anprallgeschwindigkeit von 40 km/h kann im Mittel ein ASI von 1,85 und ein HIC von 194 festgestellt werden (Tabelle 4). Tendenziell nehmen alle Werte mit zunehmender Geschwindigkeit zu.

Tabelle 3: Linearer Korrelationskoeffizient und Signifikanz zwischen ASI, THIV und ORA mit den Insassenkriterien (HIC, Brustbeschleunigung a3ms und Brustkorbeindrückung (CD: Chest Deflection)<sup>1</sup> auf Grundlage

	40 km/h	48 km/h	56 km/h	64 km/h	Gesamt
ASI vs. HIC	0,4 (p=0,327)	0,02 (p=0,971)	-0,46 (p=0,025)	-0,62 (p=0,382)	0,25 (p=0,100)
OIV vs. HIC	-0,07 (p=0,862)	-0,61 (p=0,106)	-0,29 (p=0,170)	-0,41 (p=0,589)	0,64 (p=0,000)
ORA vs. HIC	-0,08 (p=0,858)	0,16 (p=0,700)	-0,05 (p=0,805)	0,62 (p=0,384)	0,58 (p=0,000)
ASI vs. chest 3ms	0,72 (p=0,043)	0,63 (p=0,091)	0,25 (p=0,239)	0,17 (p=0,825)	0,57 (p=0,000)
OIV vs. chest 3ms	-0,24 (p=0,575)	0,03 (p=0,953)	-0,16 (p=0,444)	0,42 (p=0,577)	0,48 (p=0,001)
ORA vs. chest 3ms	0,35 (p=0,391)	-0,52 (p=0,185)	-0,25 (p=0,241)	0,29 (p=0,708)	0,35 (p=0,021)
ASI vs. CD	0,44 (p=0,270)	-0,1 (p=0,810)	0,1 (p=0,641)	0,94 (p=0,055)	-0,01 (p=0,944)
OIV vs. CD	-0,24 (p=0,561)	0,07 (p=0,866)	0,25 (p=0,248)	0,86 (p=0,138)	-0,33 (p=0,026)
ORA vs. CD	0,17 (p=0,689)	0,05 (p=0,897)	-0,31 (p=0,138)	-0,62 (p=0,382)	-0,19 (p=0,208)

von Gabauer und Thomson [11]

Tabelle 4: Mittelwerte der Kriterien bezogen auf die Anprallgeschwindigkeiten<sup>1</sup>

	40 km/h	48 km/h	56 km/h	64 km/h
ASI	1,85 (SD: 0,33)	1,81 (SD: 0,2)	2,06 (SD: 0,18)	2,16 (SD: 0,28)
ΟΙV	12,33 (SD: 0,33)	14,4 (SD: 0,42)	16,25 (SD: 0,66)	17 (SD: 1,42)
ORA	3,43 (SD: 1,45)	4,09 (SD: 2,84)	10,06 (SD: 2,25)	20 (SD: 3,43)
ніс	194,13 (SD: 89,2)	225 (SD: 59,47)	674,79 (SD: 175,8)	724 (SD: 181,58)
chest a3ms	39,11 (SD: 8,48)	42,59 (SD: 5,48)	48,77 (SD: 5,63)	59,5 (SD: 7,69)

auf Grundlage von Gabauer und Thomson [11]

#### 2.3.2 Korrelation von Fahrzeugkriterien mit Fahrzeugmasse und Anprallgeschwindigkeit

Burbridge et al. [29] untersuchten den Zusammenhang von Fahrzeugkriterien OIV, ORA und ASI mit der Fahrzeugmasse und der Anprallgeschwindigkeit von 11 unterschiedlichen Anpralldämpfern. Die Fahrzeugmassen variierten zwischen 800 kg und 2.500 kg und die Anprallgeschwindigkeiten zwischen 18 m/s und 32 m/s (64,8 km/h bzw. 115,2 km/h). Der Anprall erfolgte frontal an den Anpralldämpfer. In Abbildung 15 sind die Versuchsergebnisse dargestellt. Jeder Punkt in der Abbildung stellt für die jeweilige Anprallkonfiguration einen Versuch dar. So sind in einer vertikalen Punktereihe die 11 Versuche zusammengefasst. Es kann jedoch vorkommen, dass einzelne Versuchsergebnisse deckungsgleich sind. Sehr deutlich festzustellen ist eine Abnahme von OIV, ORA und ASI mit zunehmendem Fahrzeuggewicht (a-c). Bei der Anprallgeschwindigkeit ist keine Tendenz festzustellen (d-i). Jedoch sind die Fahrzeugkriterien bei Fahrzeugen mit einer geringeren Masse deutlich höher (g-i) als bei Fahrzeugen mit





 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Intovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Stand der Technik

höherer Masse (d-f). Die Spannweite der einzelnen Versuche ist bei Fahrzeugen mit niedrigerer Fahrzeugmasse jedoch deutlich größer (g-i) als bei Fahrzeugen mit höherer Masse (d-f).



Abbildung 15: Korrelation der Fahrzeugkriterien OIV, ORA und ASI mit der Fahrzeugmasse und der Anprallgeschwindigkeit [29]

### 2.3.3 Korrelation von Verletzungsrisiken mit Verletzungskriterien

Gabauer und Gabler [30] untersuchten 180 Verkehrsunfälle und haben die Messdaten aus den Fahrtenschreibern (EDR: Event Data Recorder) ausgelesen. Aus den aufgezeichneten Daten wurden ASI und OIV berechnet und mit der Verletzungsschwere, gemäß einer Klassifizierung nach dem AIS, korreliert. Es wurden nur Frontalkollisionen ausgewertet. In Abbildung 16 und Abbildung 17 sind die Verletzungsrisikokurven mit den jeweiligen 95% Konfidenzintervallen abgebildet. Bei einem ASI von 1,4 ist das Risiko einer MAIS 2+ Verletzung bei angegurteten und mit einem Airbag geschützten Insassen bei ca. 38% (Abbildung 16). Hingegen liegt das Verletzungsrisiko für MAIS 2+ Verletzungen für nicht angegurtete (nur durch einen Airbag geschützte) Insassen bei ca. 64%. Für MAIS 3+ Verletzungen ist das Risiko 11% für angegurtete und mit einem Airbag geschützte Insassen. Für nicht angegurtete Insassen beträgt das Risiko einer MAIS 3+ Verletzung jedoch ca. 37%.







TU Graz I COMPARE

Stand der Technik

Bei der OIV von 33 km/h ist die Wahrscheinlichkeit einer MAIS 2+ Verletzung bei angegurteten und mit einem Airbag geschützten Insassen bei ca. 25% (Abbildung 17). Für nicht angegurtete Insassen liegt das Risiko bei ca. 32%. Die Verletzungswahrscheinlichkeit für MAIS 3+ bei dieser OIV ist bei ca. 7% für angegurteten und mit einem Airbag geschützten und ca. 3% für einen nicht angegurteten Insassen.



Abbildung 16: Verletzungsrisikofunktion in Zusammenhang mit dem ASI (Airbag und Gurt: obere Bilder; nur Airbag: untere Bilder) [30]







 Bundesministerlum Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Stand der Technik



Abbildung 17: Verletzungsrisikofunktion in Zusammenhang mit dem OIV (Airbag und Gurt: obere Bilder; nur Airbag: untere Bilder) [30]

#### 2.3.4 Zusammenfassung

Die meisten Studien [10, 12–14, 28], welche sich mit der Korrelation des ASI bzw. THIV mit biomechanischen Kriterien (z.B. HIC) zum Insassenschutz beschäftigten, analysierten Anprallversuche gemäß EN 1317-2 [23]. Für Fahrzeugrückhaltesysteme gemäß EN 1317-2 [23] ist ein schräger Fahrzeuganprall festgelegt, wobei die, für die Evaluierung der Insassenwerte, in der Literatur verwendete anthropometrische Prüfpuppe Hybrid HIII für einen Frontanprall entwickelt wurde. Derzeit wurden nur von Gabauer und Thomson [11] Frontalanprallversuche ausgewertet, mit welchen ein Zusammenhang zwischen ASI bzw. THIV und dem HIC sehr gut abgeleitet werden kann. Dabei wurden allerdings Versuche zur Bewertung der Insassensicherheit für die Entwicklung von Fahrzeugen bis zu einer Anprallgeschwindigkeit von 56 km/h analysiert. Gemäß Gabauer und Thomson [11] ist der HIC und die Brustkorbeindrückung höchst abhängig vom Insassenrückhaltesystem. Insbesondere, wenn diese Kriterien mit dem ASI verglichen werden. Die höchste Korrelation wurde zwischen ASI und der Brustkorbbeschleunigung festgestellt. Die ORA korrelierte am höchsten mit dem HIC. Bezogen auf Insassenkriterien wäre für Gabauer und Thomson [11] der ASI und die OIV als eher konservativ einzustufen. Der ASI war






 Bundesministerlum Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Stand der Technik

in einem Bereich zwischen 1,5 und 2,4 und der OIV lag zwischen 43 km/h und 64 km/h, wobei der HIC durchwegs unter 1.000 lag.

Bei den Studien zu Fahrzeugrückhaltesystemen und Korrelation von ASI bzw. THIV mit dem HIC und einer größeren Anzahl an Versuchen [12, 15, 28], ist eine leichte lineare Korrelation zwischen ASI und HIC bzw. THIV und HIC festzustellen (Tabelle 5). In jenen Studien mit niedriger Versuchsanzahl [9, 13] ist die Korrelation sehr hoch. Bis auf die Untersuchung von Shojaati [9] sind die Korrelationskoeffizienten nicht signifikant (p>0,05). Wird der ASI mit dem HIC bzw. der THIV mit dem HIC mit einer Exponentialfunktion beschrieben (Abbildung 18), so wird bei Shojaati [9] ein Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> von ca. 0,7 erreicht und bei Sturt und Fell [13] ein R<sup>2</sup> von ca. 0,87. Wird in den anderen Studien [12, 15, 28] ebenfalls eine Exponentialfunktion zu Grunde gelegt, so kann keine derart hohe Korrelation festgestellt werden. In Tabelle 5 sind lineare Korrelationen dargestellt. In Abbildung 18 können die Korrelationskoeffizienten für exponentielle Korrelationen abgelesen werden.

Tabelle 5: Lineare Korrelation zwischen ASI bzw. THIV und dem HIC unterschiedlicher Studien

	Versuchsanzahl	ASI vs. HIC		THIV vs. HIC	
		R	р	R	р
Shojaati <sup>2</sup> [9]	9	0,74	0,023	-	-
Anghileri et al. [15]	23	0,24	0,266	0,41	0,053
Sturt und Fell <sup>2</sup> [13]	3	0,86	0,335	0,90	0,293
Klootwijk und Hoogvelt <sup>3</sup> [14]	22	0,90	-	-	-
Chell et al. [12]	28	0,22	0,212	0,25	0,163
Tomasch und Gstrein [28]	73	0,13	0,261	0,14	0,230
Gesamt <sup>₄</sup>	136	0,18	0,032	0,18	0,044



Abbildung 18: Exponentielle Korrelation zwischen ASI und HIC bzw. THIV und HIC unterschiedlicher Studien<sup>2</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Die Einzelwerte sind aus den Studien auf Grund der vorhandenen Diagramme abgeschätzt

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Bei Klootwijk und Hoogvelt werden nur Simulationsergebnisse bewertet

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Ohne Klootwijk und Hoogvelt, da diese Daten auf Simulationen beruhen







 Bundesministerium Elimaschutz, Unwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Stand der Technik

Für Gabauer und Gabler [30] sind, gemäß ihrer Studie zur Verletzungsschwere und Verletzungskriterien an Hand von EDR (Event Data Recorder) Daten, der ASI und OIV sehr gut geeignet das Verletzungsrisiko für nicht angegurtete Insassen zu prognostizieren. Der OIV ist dafür besonders geeignet, da hierbei das für die Berechnung zu Grunde liegende Modell darauf aufbaut. Obwohl der ASI für angegurtete Insassen entwickelt wurde, konnte keine bessere Vorhersage des Verletzungsrisikos festgestellt werden, als mit dem OIV. Als Einschränkungen werden der Fokus auf Frontalkollisionen und auf die EDR Daten eines einzelnen Fahrzeugherstellers angeben.

Studien zu Anprallversuchen an Anpralldämpfer und dazugehörige Korrelationen von ASI bzw. THIV mit biomechanischen Kennwerten der Fahrzeugentwicklung liegen nicht vor.







 Bundesministerlum Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Methode

# **3 METHODE**

Zur Bewertung der Insassensicherheit beim Anprall an einen Anpralldämpfer unter bestimmten Bedingungen, welche von den Zertifzierungstest nach EN 1317 abweichen, wurden vier Versuche durchgeführt. Dabei kollidieren die Fahrzeuge unter unterschiedlichen Anprallkonfigurationen gegen den Anpralldämpfer. Die Bewertung der Insassensicherheit erfolgt sowohl auf Grund von Fahrzeug- als auch Insassenkriterien.

## 3.1 Versuchs-Konfiguration

Nicht kraftschlüssige Anpralldämpfer, zum Schutz der Fahrzeug-Insassen beim Anprall, werden typischerweise vor Tunnelportalen oder in Tunnelpannenbuchten eingesetzt. Für die sicherheitstechnische Beurteilung dieser Schutzeinrichtungen wurde ein typisches Anprallszenario in einem Prinzipversuch nachgestellt.

## 3.1.1 Tunnel-Pannenbucht

Um die Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen aus dem Projekt BENCHMARK [31] vergleichen zu können, wurde derselbe Versuchsaufbau gewählt. Die Tunnel-Pannenbucht für den Versuchsaufbau ist eine Konstruktion aus massiven Betonblöcken, welche miteinander über Ankerstangen verbunden und über verschraubte Stahlträger auf der Fahrbahn abgestützt sind (Abbildung 19).



Abbildung 19: Aufbau Pannenbucht mit Betonblöcken und verschraubte Stahlträger

## 3.1.2 Anpralldämpfer

Als Anpralldämpfer wurden nicht-rückleitende und nicht-kraftschlüssig mit dem Boden verbundene Anpralldämpfer von ALPINA (F1-80) der Leistungsstufe 80 verwendet (Abbildung 20). Die Länge beträgt 3.600 mm und die Breite 2.380 mm.









Methode



Abbildung 20: Nicht-rückleitender und nicht-kraftschlüssig mit dem Boden verbundener Anpralldämpfer

## 3.1.3 Anprallkonfiguration

#### Versuchsaufbau

Der Anpralldämpfer wird gemäß dem Montagehandbuch für den F1-80 in einem Abstand von ca. einem Meter vor der Betonwand positioniert (Abbildung 21). Der Aufstellwinkel zur Fahrbahn ist 5°. Der Überdeckungsgrad des Fahrzeugs beträgt 100% bzw. 50%.



Abbildung 21: Schematische Darstellung der voll überdeckten (links) und teilüberdeckten Anprallkonfiguration (rechts)

#### Prüfgeschwindigkeit

Entsprechend der Anforderungen der Ausschreibung und analog zum Projekt BENCHMARK [31] wurde die Prüfgeschwindigkeit mit 100 km/h festgelegt. Die Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs wird ca. 2 m vor dem Anprall gemessen.

#### Anprallwinkel

Der theoretisch mögliche Abkommenswinkel ist eine Funktion der gefahrenen Geschwindigkeit, Straßenverhältnissen (trocken, nass, etc.), dem Kurvenradius und vom seitlichen Abstand des Fahrzeugs zum Fahrbahnrand [32]. Ähnliche Überlegungen wurden von Burgett und Gunderson [33] sowie Martin et al. [34] getroffen. Dabei wird die Ausnutzung der physikalischen Grenzen beim Verlenken und einer darauffolgenden Kreisbogenfahrt zu Grunde gelegt, wobei das Fahrzeug gerade noch nicht zu schleudern beginnt. Der Abkommenswinkel nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit ab. Der Zusammenhang zwischen Abkommensgeschwindigkeit, Abkommenswinkel, Kurvenradius und Fahrbahnzustand





 Bundesministerlum Klinaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Methode

ist in Abbildung 22 dargestellt. Bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h und einem seitlichen Fahrzeugabstand zum Fahrbahnrand von 0,5 m auf trockener Fahrbahn (Griffigkeit bzw. Reibungsbeiwert:  $\mu$ =0,7) errechnet sich ein theoretischer Abkommenswinkel von 5-6°, je nachdem ob das Fahrzeug auf der Kurvenaußen- oder Kurveninnenseite abkommt.

Durch Realunfallanalysen der Unfalldatenbank CEDATU [19, 20] konnten die Zusammenhänge der theoretischen Überlegungen bestätigt werden [35–39]. Bei einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 90 km/h und 110 km/h lässt sich ein durchschnittlicher Abkommenswinkel auf Autobahnen und Schnellstraßen von 4,9° (SA=4,1) feststellen (Abbildung 23) und ein Medianabkommenswinkel von 3,0° [31].

Für die Anprallversuche wird ein Abkommenswinkel von 5° festgelegt. Gemäß dem Montagehandbuch für den Anpralldämpfer ALPINA F1-80 ist ein Aufstellwinkel zum Fahrbahnrand von 5° vorgesehen. Daraus ergibt sich ein Anprallwinkel für die Versuche von 0°.



Abbildung 22: Theoretischer Zusammenhang zwischen Abkommensgeschwindigkeit und Abkommenswinkel





 Bundesministerium Riimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Methode





#### 3.1.4 Testfahrzeuge

Für die Versuche, welche bezüglich des Prüffahrzeuges den Anforderungen nach EN 1317-3 [1] entsprechen, wurden zwei Opel Corsa mit einem Gesamtgewicht (inkl. anthropometrische Prüfpuppe 80kg) von 935 kg bzw. 937 kg verwendet (herkömmliches in EN 1317 Tests verwendetes Fahrzeug). Das Erstzulassungsdatum der Fahrzeuge war Monat 10 aus 1997 bzw. Monat 10 aus 1998. Die Fahrzeuge sind mit Airbags und Gurtstraffer ausgestattet. Der Airbag war für den Versuch deaktiviert. Der Gurtstraffer wurde nicht deaktiviert.

Für die Versuche mit den neueren Fahrzeugen wurden zwei VW Golf 6 (Fahrzeuge mit verbesserter Sicherheitsausstattung) mit einem Gesamtgewicht von jeweils 1.245 kg verwendet. Das Baujahr der Fahrzeuge war Monat 3 bzw. Monat 4 aus 2009. Beide Fahrzeuge waren mit Airbags, Gurtstraffer und Gurtkraftbegrenzer ausgerüstet. Der Airbag war für den Versuch aktiviert.

#### 3.1.5 Versuchsmatrix

In Tabelle 3-1 ist die vollständige Versuchsmatrix zusammengefasst. Die Anprallgeschwindigkeit wird in einem Abstand von ca. zwei Meter vor dem Anpralldämpfer gemessen. Gemäß EN 1317-3 [1] muss die Geschwindigkeit in einem Abstand von maximal sechs Metern vor dem Anpralldämpfer gemessen werden.

Bei Versuch #3 wurde das Notbremssystem der Versuchsanlage aktiviert, sodass das Fahrzeug voll gebremst mit dem Anpralldämpfer kollidierte. Die gemessene Geschwindigkeit ca. zwei Meter vor dem







TU Graz I COMPARE

Methode

Anpralldämpfer betrug 99,45 km/h. Zum Versuchszeitpunkt war die Fahrbahn nass ( $\mu$ =0,5). Die Anprallgeschwindigkeit reduzierte sich dadurch auf ca. 98 km/h.

	Einheit	#1	#2	#3	#4
Anpralldämpfer		ALPINA F1-80	ALPINA F1-80	ALPINA F1-80	ALPINA F1-80
Fahrzeug		VW Golf 6	Opel Corsa	VW Golf 6	Opel Corsa
Erstzulassung		2009.03	1997.10	2009.04	1998.10
Fahrzeuggewicht	[kg]	1.245	935	1.245	937
Länge	[m]	4,21	3,74	4,21	3,74
Breite	[m]	1,79	1,62	1,79	1,62
Radstand	[m]	2,574	2,443	2,574	2,443
Airbag		aktiviert	deaktiviert	aktiviert	deaktiviert
Gurtstraffer		ја	ја	ја	ja
Gurtkraftbegrenzer		ja	nein	ja	nein
Anprallgeschwindigkeit <sup>1)</sup>	[km/h]	101,12	101,04	99,45 <sup>2)</sup>	100,28
Abstand Dämpfer zur Stirnwand	[cm]	100	102	100	99
Anprallwinkel	[°]	0,1	0,9	0,1	0,5
Überdeckungsgrad	[%]	100	100	50	50
Fahrbahnbedingung		trocken	trocken	nass	feucht

Tabelle 3-1: Versuchsmatrix

1) gemessen rund 2 m vor dem Anpralldämpfer

2) das Notbremssystem wurde vor dem Anprall aktiviert, sodass das Fahrzeug voll gebremst mit dem Anpralldämpfer kollidierte. Anprallgeschwindigkeit ca. 98 km/h

## 3.2 Messdatenerfassung

#### 3.2.1 Fahrzeuginstrumentierung

Zur Aufzeichnung von Beschleunigungen und Drehraten wurden zwei Beschleunigungssensoren (Hersteller: Meas-Spec; Modell: 1203) und ein Drehratensensor (Hersteller: IES; Modell: 2103-2400) im Bereich des Schwerpunktes der Fahrzeuge montiert. Der Messbereich der Beschleunigungssensoren beträgt 100 g und jener des Drehratensensor 2.400 °/s. Alle Sensoren sind auf einer Metallplatte montiert und diese am Fahrzeug befestigt (Abbildung 24 (rechts)). Alle Sensoren sind kalibriert. Das Koordinatensystem des Fahrzeugs wurde gemäß EN 1317-1 [7] festgelegt (Abbildung 24 (links)).

Für die Messdatenerfassung wurde eine MiniDAU (Mini Data Acquisition Unit) von Kayser Threde (K3700 MiniDAU<sup>®</sup>) verwendet. Die Aufzeichnungsrate beträgt 10 kHz. Die Messdaten werden über einen Kontaktschalter synchronisiert.









Methode

Position	Parameter	Messkanal	Hersteller	Modell	Anzahl
Schwerpunkt	Beschleunigung 1	A <sub>x</sub> , A <sub>y</sub> , A <sub>z</sub>	Meas-Spec	1203	3
Schwerpunkt	Beschleunigung 2	A <sub>x</sub> , A <sub>y</sub> , A <sub>z</sub>	Meas-Spec	1203	3
Schwerpunkt	Drehrate	Az	IES	2103-2400	1
					7

## Tabelle 2: Fahrzeuginstrumentierung



Abbildung 24: Fahrzeugkoordinatensystem (links) und Position der Sensoren im Fahrzeugschwerpunkt (rechts)

#### 3.2.2 Anthropomorphe Prüfpuppe

Für den Versuch wurde eine männliche Hybrid HIII 50th Perzentile anthropomorphe Prüfpuppe (ATD) mit einem Gewicht von ca. 78 kg verwendet. Diese wird in der Fahrzeugentwicklung beim Frontalanprall eingesetzt ([3, 4, 40]). In Anlehnung an den Euro NCAP Frontalanprall [41] wurde die ATD mit den in Tabelle 3 angegebenen Sensoren instrumentiert. Die Sensorpositionen sind in Abbildung 25 gekennzeichnet. Knie, Unterschenkel und Lendenwirbelsäule werden beim Euro NCAP nur zu Monitoringzwecken aufgezeichnet und fließen nicht in eine Bewertung ein. Daher wurden diese beim Test nicht berücksichtigt.







 Bundesministerium Klimaschutz, Uwwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Methode

#### Tabelle 3: Sensorbelegung der anthropomorphen Prüfpuppe

Position	Parameter	Messkanal	Hersteller	Modell	Anzahl
Kopf	Beschleunigung	A <sub>x</sub> , A <sub>y</sub> , A <sub>z</sub>	Endevco	7264-2000TZ	3
Nesker	Kraft	Fx, Fy, Fz	Denton	J1716A	3
Nacken	Moment	M <sub>x</sub> , M <sub>y</sub> , M <sub>z</sub>	Denton	J1716A	3
	Beschleunigung	A <sub>x</sub>	Humanetics	H64B-2000	1
Brustkorb	Beschleunigung	Ay	Endevco	7264-2000	1
	Beschleunigung	Az	Humanetics	H64B-2000	1
	Verschiebung	Dchest	FTSS	14CB1-3615	1
	Beschleunigung	Ax	Humanetics	H64B-2000	1
Becken	Beschleunigung	Ay	Meas-spec.	H64B-2000-360	1
	Beschleunigung	Az	Endevco	7264-2000	1
Oberschenkel (L & R)	Kraft	Fz	Denton	2121A	2
Schultergurt	Kraft	F	MSC	5111L/SB-16-TI	1
Beckengurt	Kraft	F	MSC	5111L/SB-16-TI	1
					20



Abbildung 25: Sensorpositionen und -Ausrichtung in der anthropomorphen Prüfpuppe

## 3.3 Videoaufzeichnung

Die Versuche wurden mit drei Hochgeschwindigkeitskameras mit 500 Bildern pro Sekunde aufgezeichnet. Die Positionen der Kameras sind in Abbildung 26 dargestellt. Eine Kamera wurde seitlich positioniert (1). Eine zweite Kamera hat den Versuch aus einem schrägen Blickwinkel aufgezeichnet (2). Mit







TU C

Methode

der dritten Kamera erfolgte eine Überkopfaufzeichnung (3) und mit der vierten Kamera (Bildrate: 24 Bilder pro Sekunde) wurde auch der Fahrzeugweg vor dem Anprall mitaufgezeichnet (4). Diese wurde vom Anfahrweg bis in die Endlage nach dem Anprall mitgeschwenkt.



Abbildung 26: Schematische Positionen der Videokameras

## 3.4 Bewertungskriterien basierend auf der Fahrzeugbeschleunigung

#### 3.4.1 Flail space model

Das "flail space model" wurde von Michie [6] vorgestellt und geht davon aus, dass die Insassenverletzungsschwere von der Anprallgeschwindigkeit, mit welcher der Insasse gegen Teile der Fahrgastzelle anprallt und der nachfolgenden Verzögerung, abhängt. Es wird angenommen, dass ein nicht angegurteter Insasse eine Wegstrecke von 0,6 m in longitudinaler und 0,3 m in lateraler Richtung frei fliegend ("flail") zurücklegt, bevor dieser auf einen Innenteil der Fahrgastzelle auftrifft (Abbildung 27). Die Fahrzeugrotation und die Nickbewegung bleiben unberücksichtigt und die Bewegung in Längs- und Querrichtung werden als unabhängig angenommen. Zum Zeitpunkt des Anpralls wird der größte Geschwindigkeitsunterschied berechnet und ergibt die OIV (Occupant Impact Velocity). Nach dem Anprall wird angenommen, dass der Insasse mit den Fahrzeugteilen in Kontakt verbleibt und mit dem Fahrzeug verzögert wird. Aus der daraus auftretenden Beschleunigung wird die ORA (Occupant Ridedown Acceleration) berechnet.



Methode



ASFINAG

 Bundesministerium Klinaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Image: State of the state



## 3.4.2 Acceleration Severity Index (ASI)

Obwohl in der CEN (Comité Européen de Normalisation) keine Details zum Hintergrund des ASI angegeben werden, gleicht die Berechnung des "Severity Index" (SI) von Weaver und Marquis [42, 43] jener des ASI. Der ASI errechnet sich aus den drei Komponenten x,- y, und z des Beschleunigungssensors im Fahrzeugschwerpunkt (Formel 1). Da hierbei nur Beschleunigungen des Fahrzeugs für die Berechnung verwendet werden, wird beim ASI angenommen, dass sich der Insasse während der Beschleunigungsphase über die gesamte Zeitdauer in direktem Kontakt mit dem Fahrzeug befindet.

Zur Festlegung von Grenzwerten wurden von Weaver und Marquis [44] Fahrzeugbeschleunigungen beim Überfahren von Böschungen mit unterschiedlichen Böschungsneigungen (von 3:1 bis 6:1) und Wassergräben unterschiedlicher Querprofile (V- Profil, Rundprofil, Trapezprofil und Trapezprofil mit abgerundeten Ecken) untersucht. Es wurden Fahrzeugversuche bei den Böschungsneigungen mit einer Geschwindigkeit von 96,5 km/h (60 mph) und für die Wassergräben mit einer Geschwindigkeit zwischen (30 mph) und (60 mph) durchgeführt. Die Abkommenswinkel betrugen 25°. Für einen nicht angegurteten Insassen wurde ein SI von 1,0 und für angegurtete Insassen ein SI von 1,6 als Grenzwert definiert. Die Grenzwerte der maximal zulässigen Beschleunigungen sind in Tabelle 4 angegeben. Nach Chi [45] gehen diese Grenzwerte zurück auf Schleudersitzversuche [46] und Untersuchungen von Hyde [47].

Die für die Berechnung des ASI benutzten Grenzwerte beziehen sich auf die Sicherung mit einem Beckengurt. Der ASI dient zur Bewertung der Insassensicherheit und wird in der der EN 1317 [1, 7, 23]







TU Graz I COMPARE

Methode

zur Klassifikation der Anprallheftigkeitsstufe und in der EN 12767 [8] zur Klassifikation der Energieabsorptionskategorie und der Insassensicherheitsstufe verwendet.

		Beschleunigung [g]				
		Longitudinal	Lateral	Vertikale		
Nicht ar	ngegurtet	<b>7</b> <sup>e</sup>	5 <sup>e</sup>	6 <sup>d</sup>		
Beckeng	gurt	12 <sup>b</sup>	9 <sup>c</sup>	10 <sup>c</sup>		
Becken-	und Schultergurt <sup>a</sup>	20ª	15ª	17ª		
a)	Maximalwerte nach Hyde [4]	n Hyde [47] in Chi [45]				
b)	Limit für Beckengurt gesiche	rte Insassen in Untersu	chungen an Anpralldän	npfer und "breakaway"		
	Untersuchungen (Entspricht	60% der Werte nach H	Hyde und Insassensiche	erung mit Becken- und		
	Schultergurt)					
c)	) Entspricht 60% der Werte der Insassensicherung mit Becken- und Schultergurt					
d)	Untere Grenze nach Hyde [47] in Chi [45] (Entspricht 60% der Werte in vertikaler Richtung nach					
	Hyde und Insassensicherung mit Beckengurt)					
e)	Entspricht 60% der Werte de	r Insassensicherung mit	t Beckengurt			

#### Tabelle 4: Grenzwerte Beschleunigungen [42]

#### 3.4.3 Theoretical Head Impact Velocity (THIV)

Der THIV geht auf das "flail space model" von Michie [6] zurück und wird in der EN 1317 [1, 7, 23] zur Klassifikation der Anprallheftigkeitsstufe und in der EN 12767:2008-01 [8] zur Klassifikation der Energieabsorptionskategorie und der Insassensicherheitsstufe verwendet. Beim Anprall des Fahrzeugs an ein Hindernis behält der Kopf als träge Masse seine Bewegung im Allgemeinen bei und bewegt sich (im Falle eines Frontalanpralls) weiter in Fahrtrichtung. Der THIV entspricht einer theoretischen Geschwindigkeit des Kopfes beim Erreichen der Fahrzeugraumgrenzen, d.h. beim theoretischen Anprall an die Fahrzeuginnenausstattung. Zur Ermittlung des THIV wird eine vereinfachte Geometrie des Fahrzeuginnenraumes angenommen. Im Gegensatz zum OIV wird beim THIV allerdings die Gierwinkelgeschwindigkeit berücksichtigt. Der THIV wird nach Formel 2 berechnet.

Formel 2

#### 3.4.4 Post-Impact Head Deceleration (PHD)

Ebenso wie der THIV geht der PHD auf das "flail space model" nach Michie [6] zurück. Es wird angenommen, dass der Kopf der anthropomorphen Prüfpuppe mit dem Fahrzeuginnenraum während der Kollision in Kontakt kommt und für die restliche Kontaktphase dieselbe Beschleunigung erfährt wie das







TU Graz I COMPARE

Methode

Fahrzeug. Der PHD ergibt sich aus dem Höchstwert der resultierenden Beschleunigung der Komponenten in x- und y-Richtung gemessen am Schwerpunkt. Der PHD wird in der EN 1317-2 [23] bzw. EN 1317-3 [1] nicht mehr verwendet.

Formel 3

#### 3.4.5 Occupant Impact Velocity (OIV)

Die Definition des OIV entspricht jener des THIV. Bei der Berechnung der OIV werden allerdings die Messdaten des Gyrosensors nicht berücksichtigt. D.h. der OIV wird nur aus den x- und y-Komponenten der Beschleunigungen im Schwerpunkt ermittelt. Die Grenzwerte sind in Tabelle 5 angegeben. Nach Michie [6] wird die niedrigere Grenze mit schweren Verletzungen korreliert, jedoch ist nicht mit tödlichen Verletzungen zu rechnen. Die OIV wird zur Bewertung von Rückhaltesystemen im Manual for Assessing Safety Hardware [48] verwendet.

Гabelle	5:	Grenzwerte	OIV	[48,	49]
---------	----	------------	-----	------	-----

		Preferred	Maximum		
Längs- und Querrichtung	m/s	9,1	12,2		
Längsrichtung*	m/s	3,0	4,9		
* Relevante Tests gemäß Manual for Assessing Safety Hardware [48]					

#### 3.4.6 Occupant Ride down Acceleration (ORA)

Die ORA entspricht dem PHD und wurde aus dem "flail space model" nach Michie [6] entwickelt. Die Grenzwerte sind in Tabelle 6 angegeben.

Tabelle 6: Grenzwerte	ORA	[48,	49]
-----------------------	-----	------	-----

		Preferred	Maximum
Längs- und Querrichtung	g	15,0	20,49

#### 3.4.7 Maximale resultierende Fahrzeugbeschleunigung

Von Park et al. [50] wird zur Beurteilung der Insassensicherheit bzw. Korrelation mit weiteren Insassenkriterien die maximale Fahrzeugbeschleunigung vorgeschlagen.







 Bundesministerlum Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Methode

#### 3.4.8 "Moving average acceleration" aXms der resultierenden Fahrzeugbeschleunigung

Diese wird von Park et al. [50] als Bewertungskriterium basierend auf der Fahrzeugbeschleunigung vorgeschlagen. Die "moving average acceleration" wird als Durchschnittswert von der Beschleunigung des Fahrzeugs bezogen auf ein entsprechendes Zeitintervall nach Formel 4 berechnet. Das Zeitintervall  $\Delta$ t kann eine Zeitspanne zur Gesamtdauer der Beschleunigung annehmen. In diesem Fall bedeutet die "moving average acceleration" die durchschnittliche Beschleunigung.

Formel 4

T Startzeitpunkt

 $\Delta t$  Zeitintervall

#### 3.4.9 Kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung delta-v

Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung ist ein Maß für die Verletzungsschwere von Fahrzeuginsassen. Dabei beschreibt diese die Geschwindigkeitsänderung, welche durch den Anprall auftritt. Delta-v ist eine vektorielle Größe und hat somit eine Größe und Richtung und errechnet sich aus der Geschwindigkeit zum Zeitpunkt des Stoßes und der Lösegeschwindigkeit nach dem Stoß. In der ISO 12353-1 ist die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung wie folgt definiert:

"Vector difference between impact velocity and separation velocity."

#### 3.4.10 Energieäquivalente Geschwindigkeit

Die energieäquivalente Geschwindigkeit (EES: Energy Equivalent Speed) ist ein Maß für die Deformation des Fahrzeugs, ausgedrückt in der Einheit km/h [51]. Im Gegensatz zur kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung ist die EES ein Skalar. Die energieäquivalente Geschwindigkeit ist nach der ISO 12353-1 wie folgt definiert:

"The equivalent speed at which a particular vehicle would need to contact any fixed rigid object in order to dissipate the deformation energy corresponding to the observed vehicle residual crush."







 Bundesministerium Elimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Methode

## 3.5 Bewertungskriterien basierend auf Insassenwerten

Von Kleinberger et al. [52] werden die in der Fahrzeugentwicklung verwendeten Verletzungskriterien für den Frontalanprall sehr gut zusammengefasst. Es wird darin auch auf die Grundlagenuntersuchungen verwiesen, auf welchen die Kriterien basieren und entwickelt wurden, sowie die Verletzungsrisiken, welche unter Einhaltung von Grenzwerten zu erwarten sind. Die von Kleinberger et al. [52] zur Verfügung stehende Studie dient als Grundlage für die in diesem Kapitel beschriebenen Verletzungskriterien.

## 3.5.1 Head Injury Criterion (HIC)

Der HIC geht zurück auf die Wayne State Tolerance Curve (WSTC). Die WSTC wurde erstmalig von Lissner [53] vorgestellt und durch Gurdjian et al. [54] erweitert. Von Gadd [55] wurde dann der Gadd Severity Index (GSI) entwickelt und von Versace [56] schließlich der HIC erstmals vorgestellt, der den GSI ersetzte. Von der NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) wurde der HIC noch leicht modifiziert und in den Teststandard FMVSS 208 übernommen [57]. Berechnet wird der HIC als Maximalwert aus der resultierenden Kopfbeschleunigung bezogen auf ein Zeitfenster von 36 ms oder 15 ms (Formel 5).

Formel 5

Das Risiko einer ASI 2+ Schädelfraktur errechnet sich nach Formel 6 und ist in Abbildung 28 dargestellt. Das Risiko einer AIS2+ Schädelfraktur bei einem HIC von 1.000 liegt bei etwa 47%. Bei einem HIC von 700 bei etwa 35% und bei einem HIC von 500 bei 20% [58]. In Tabelle 7 sind Grenzwerte unterschiedlicher Testvorschriften zusammengefasst. Je nach Insassentyp können sich dabei die Grenzwerte unterscheiden. In der FMVSS 208 [4] gilt für einen männlichen und weiblichen Erwachsenen, repräsentiert durch einen Hybrid HIII 50% und einen Hybrid HIII 5% Dummy, ein Grenzwert für den HIC15 von 700. Ebenso gilt diese Grenze im Euro NCAP Frontalanprall [3] für einen Erwachsenen als maximale Obergrenze ("Capping Limit")<sup>5</sup>. Es wird hierbei aber noch eine weitere Grenze mit einem HIC15 von 500 unterschieden, wodurch das Risiko einer AIS2+ Schädelfraktur noch geringer ist [58]. In der UN ECE-R 94 (United Nations Economic Commission for Europe) gilt als Maximalwert ein HIC36 von 1.000.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Das Bewertungssystem im Euro NCAP berücksichtigt zwei Grenzen für jedes Kriterium, das "Strengeres Limit" ("Upper Limit") und das "Niedrigeres Limit" ("Lower Limit"). Werden diese eingehalten, so werden eine bestimmte Anzahl an Punkten für jedes Kriterium vergeben. Wird jedoch das sogenannte "Capping limit" (Maximalwert) überschritten, so werden für kein einziges Kriterium Punkte vergeben.









Methode

Formel 6

- N kumulierte Normalverteilung
- μ 6,96352
- σ 0,84664



Abbildung 28: Verletzungsrisikokurve von Schädelfrakturen bezogen auf den HIC nach Hertz [58] in [52]

Dummytyp	HIC36	HIC15
FMVSS 208 [4]		
Hybrid HIII 50% Perzentile männlicher Dummy (49 CFR part 572, subpart E)	1.000	700
Hybrid HIII 5% Perzentile weiblicher Dummy (49 CFR part 572, subpart O)	-	700
12-Monate CRABI Dummy (49 CFR part 572, subpart R)	-	390
3-year-old child test dummy (49 CFR part 572, subpart P)	-	570
6-year-old child test dummy (49 CFR part 572, subpart N)	-	700
		500 <sup>1</sup>
Euro NCAP [3]	-	700 <sup>2</sup>
		700 <sup>3</sup>
UN ECE-R 94 [40]	1.000	-
1: Strengeres Limit		
2: Niedrigeres Limit		
3: Capping Limit		

Tabelle 7: Grenzwerte für den HIC

In Abbildung 29 sind Risikokurven unterschiedlicher Verletzungsschwere in Zusammenhang mit dem HIC dargestellt [59]. Die AIS 4 Risikokurve geht auf Untersuchungen von Prasad und Mertz zurück. Die restlichen Kurven wurden von der NHTSA basierend auf Prasad und Mertz erweitert.







Methode



Abbildung 29: Risikokurven der Verletzungsschwere zu HIC [59]

### 3.5.2 a3ms Kopfbeschleunigung

Die a3ms Kopfbeschleunigung als Kriterium geht ebenfalls auf die WTSC zurück. Um Gehirnverletzungen zu vermeiden, dürfen Beschleunigungen einen Wert von 80 g und einer Zeitspanne von mehr als 3 ms nicht überschreiten ([60] und Seiffert und Wech [61] in [12]).

	a3ms Kopf
	[g]
Euro NCAP [3]	72 <sup>1</sup> / 80 <sup>2</sup> / 80 <sup>3</sup>
UN ECE-R 94 [40]	80
1: Strengeres Limit	
2: Niedrigeres Limit	
3: Capping Limit	

## Tabelle 8: Grenzwert der maximalen Kopfbeschleunigung gemäß

#### 3.5.3 Nackenkräfte und Momente

Im Gegensatz zur FMVSS 208 [4] werden im Euro NCAP [3] nur die Scherkraft, Zugkraft und das Nackenmoment berücksichtigt. Grenzwerte zu Zug- und Scherkräfte gehen auf Nyquist et al. [62] in Kleinberger et al. [52] zurück. Darin wurden Grenzwerte für Zugkräfte von 3,3 kN und Scherkräfte von 3,0 kN







Methode

festgelegt. Grenzwerte zu zulässigen Nackenmomenten wurden von Mertz [63] in Kleinberger et al. [52] aus Versuchen mit Freiwilligen ermittelt und durch PMHS (Post Mortem Human Surrogates) für schwere Verletzungen erweitert. Der Grenzwert für das Nackenmoment in Extension wurde auf 57 Nm festgelegt. Bei einer Flexionsbewegung wurden keine Verletzungen festgestellt. Das Nackenmoment für Flexion wurde daher auf 190 Nm festgelegt. Im Euro NCAP [3] gelten die Grenzwerte der Tabelle 9.

Tabelle 9: Kritische Grenzwerte für Nackenkräfte und Momente im Euro NCAP [3]

Kriterium	Einheit	Strengeres Limit	Niedrigeres Limit	Capping limit
Scherkraft	[kN]	1,20	1,95	2,70 (Fahrer)
Zugkraft	[kN]	1,70	2,62	2,90 (Fahrer)
Nackenmoment Extension	[Nm]	36,00	49,00	57,00 (Fahrer)

#### 3.5.4 Nackenverletzungskriterium Nij

Das Konzept des Nackenverletzungskriteriums N<sub>ij</sub> wurde von Prasad und Daniel entwickelt [64] und wird in der FMVSS 208 [4] berücksichtigt. Das N<sub>ij</sub> ist eine lineare Kombination der axialen Kräfte und Momente für Flexion und Extension, welche über Grenzwerte [52] normalisiert werden. Das N<sub>ij</sub> wird nach Formel 7 berechnet. Es werden vier Lastfälle unterschieden (TE: Tension / Extension, TF: Tension / Flexion, CE: Compression / Extension, CF: Compression / Flexion).

Formel 7

F<sub>z</sub> axiale Kraft

- F<sub>int</sub> kritischer Grenzwert der axialen Kraft
- My Flexion/Extension Nackenmoment
- M<sub>int</sub> kritischer Grenzwert des Nackenmoments

Dummytyp	Nij	Zug	Druck	Flexion	Extension
	[-]	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]
Hybrid HIII 50% Perzentile männlicher Dummy (49 CFR part 572, subpart E)	1,0	6.806	6.160	310	135
Hybrid HIII 5% Perzentile weiblicher Dummy (49 CFR part 572, subpart O)	1,0	4.287	3.880	155	67

Tabelle 10: Kritische Grenzwerte für Nackenkräfte und Momente in der FMVSS 208 [4]





 Bundesministerium Klinaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Formel 8

Methode

Das Risiko einer AIS 3+ bzw. AIS 5+ Nackenverletzung bezogen auf das N<sub>ij</sub> errechnet sich nach Formel 8 und Formel 9 und ist in Abbildung 30 dargestellt. Bei einem N<sub>ij</sub> von 1,0 besteht für Insassen von Fahrzeugen ein Risiko einer AIS 3+ Verletzung von 15%. In Tabelle 10 und Tabelle 9 sind die entsprechenden Grenzwerte der FMVSS 208 und des Euro NCAP angegeben.





## 3.5.5 a3ms Brustkorbbeschleunigung

Erste Untersuchungen zu Brustbeschleunigungen gehen auf Stapp [66] in Kleinberger et al. [52] und Mertz und Gadd [67] in Kleinberger et al. [52] zurück. Darin wird eine Grenzbeschleunigung von 60 g vorgeschlagen und in der FMVSS 208 [4] berücksichtigt (Tabelle 11). Im Euro NCAP [3] Testprotokoll wird die Brustbeschleunigungen nicht berücksichtigt.

	a3ms Brustkorb
	[g]
Hybrid HIII 50% Perzentile männlicher Dummy (49 CFR part 572, subpart E)	60
Hybrid HIII 5% Perzentile weiblicher Dummy (49 CFR part 572, subpart O)	60
12-Monate CRABI Dummy (49 CFR part 572, subpart R)	50
3-year-old child test dummy (49 CFR part 572, subpart P)	55
6-year-old child test dummy (49 CFR part 572, subpart N)	60

Tabelle 11: Kritische Grenzwerte für Brustbeschleunigungen in der FMVSS [4]









Methode

#### 3.5.6 Brustkorbeindrückung

Nach Neathery et al. [68] sollte die maximale Brustkorbeindrückung 76 mm nicht überschreiten. Dieser Wert entspricht einem Risiko von 50% für eine AIS 3+ Verletzung bei einer 45-jährigen Person. Basierend auf den Daten von Neathery et al. [68] (in Kleinberger et al. [52]) schlugen Lau und Viano [69] eine maximale Brustkorbeindrückung von 65 mm vor. Nach Horsch und Schneider [70] wäre auch dieser Grenzwert zu hoch. Gemäß dieser Untersuchung würde eine Brustkorbeindrückung von 40 mm ein Risiko von 25% einer AIS 3+ Brustkorbverletzung bedeuten.

Grenzwerte zur Brustkorbeindrückung in unterschiedlichen Testverfahren sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

	Brustkorbeindrückung
	[mm]
FMVSS 208 [4]	
Hybrid HIII 50% Perzentile männlicher Dummy (49 CFR part 572, subpart E)	63
Hybrid HIII 5% Perzentile weiblicher Dummy (49 CFR part 572, subpart O)	52
12-Monate CRABI Dummy (49 CFR part 572, subpart R)	-
3-year-old child test dummy (49 CFR part 572, subpart P)	34
6-year-old child test dummy (49 CFR part 572, subpart N)	40
Euro NCAP [3]	18 <sup>1</sup> / 42 <sup>2</sup> * / 42 <sup>3</sup> *
UN ECE-R 94 [40]	50
1: Strengeres Limit 2: Niedrigeres Limit 3: Capping Limit	
*: Ab 2023 betragen niedrigeres und Capping Limit 34,00 mm	

#### Tabelle 12: Kritische Grenzwerte für die Brustkorbeindrückung

#### 3.5.7 Viscous Criterion (VC)

Das von Lau und Viano [71]entwickelte Viskose Kriterium wird im Euro NCAP Frontalanprall [3] und der UN ECE-R 94 [40]berücksichtigt. Das Kriterium ist eine Kombination aus der Belastungsgeschwindigkeit und der Brustkorbeindrückung. Ein VC von 1,0 m/s bedeutet ein Risiko von 25% eine AIS 4+ Verletzung zu erleiden.

	Viscous Criterion
	[m/s]
Euro NCAP [3]	0,50 <sup>1</sup> / 1,00 <sup>2</sup> / 1, 00 <sup>3</sup>
UN ECE-R 94 [40]	1,0
1: Strengeres Limit	
2: Niedrigeres Limit	
3: Capping Limit	

#### Tabelle 13: Kritische Grenzwerte für das Viskose Kriterium







 Involveministerium Chaschutz, Unweit, Erwyne, Mobilität, Involution and Technologie TU Graz I COMPARE

Methode

#### 3.5.8 Untere Extremitäten - Oberschenkelkräfte

Nach Mertz (1989) in Kleinberger et al. [52] beträgt die Grenzbelastung für den Oberschenkelknochen bei einem männlichen Insassen bei 10 kN und 6,8 kN bei einem weiblichen. Eine Belastung von 10 kN entspricht einem 35% prozentigen Risiko einer AIS2+ Verletzung (Abbildung 31). Die Obergrenzen zu Oberschenkelbelastungen sind in Tabelle 14 zusammengefasst.



Abbildung 31: Verletzungsrisikokurve für Oberschenkelkräfte [52]

	Oberschenkelkraft
	[kN]
FMVSS 208 [4]	
Hybrid HIII 50% Perzentile männlicher Dummy (49 CFR part 572, subpart E)	10
Hybrid HIII 5% Perzentile weiblicher Dummy (49 CFR part 572, subpart O)	6,8
Euro NCAP [3]	2,60 <sup>1</sup> / 6,20 <sup>2</sup> / NZ <sup>3</sup>
UN ECE-R 94 [40]	9,07 (@ 0 ms) 7,58 (@ >=10ms)
1: Strengeres Limit	
2: Niedrigeres Limit	
3: Capping Limit (NZ: nicht zutreffend)	

Tabelle 14: Kritische Grenzwerte für die Oberschenkelkraft

#### 3.5.9 Schultergurtkräfte

Gemäß dem Frontanprall bei voller Überdeckung nach Euro NCAP liegt die Grenze für die Schultergurtkräfte bei 6 kN [3].







Methode

#### 3.6 Bewertungsmatrix

Die Bewertung der Insassensicherheit beim Anprall an ein Fahrzeugrückhaltesystem erfolgt auf Basis von den in der EN 1317 [7] und den beim Euro NCAP Frontanprall [3] oder FMVSS 208 [4] festgelegten Kriterien.

Das Bewertungssystem im Euro NCAP berücksichtigt zwei Grenzen für jedes Kriterium [3]. Werden diese eingehalten, so werden eine bestimmte Anzahl an Punkten für jedes Kriterium vergeben. Wird jedoch das sogenannte "Capping Limit" (Maximalwert) nicht eingehalten, so werden für kein einziges Kriterium Punkte vergeben. Im Folgenden sind die einzelnen Kriterien mit den Grenzwerten gemäß dem Euro NCAP Frontalanprall angegeben [3]:

Körperregion	Kriterium	Einheit	Strengeres Limit	Niedrigeres Limit	Capping Limit	
Kopf	HIC15 <sup>1)</sup>	[-]	500,00	700,00	700,00	
	a3ms <sup>2)</sup>	[g]	72,00	80,00	80,00	
Nacken	Scherkraft	[kN]	1,20	1,95	2,70 (Fahrer)	
	Zugkraft	[kN]	1,70	2,62	2,90 (Fahrer)	
	Nackenmoment	[Nm]	36,00	49,00	57,00 (Fahrer)	
Brustkorb	Deformation	[mm]	18,00	42,00 <sup>3)</sup>	42,00 <sup>3)</sup>	
	Viskose Kriterium	[m/s]	0,50	1,00	1,00	
	Schulterkräfte	[kN]	-	-	6	
Oberschenkel	Oberschenkelkraft	[kN]	2,60	6,20	NZ <sup>4)</sup>	
1) HIC15 bezogen auf 2) a3ms: resultierend	ein Zeitintervall von 15ms e Kopfbeschleunigung bezogen a	auf ein Zeitinterv	all von 3ms			
3) Ab 2023 betragen niedrigeres und Capping Limit 34.00 mm						

Tabelle 15: Kriterien und Grenzwerte für den Insassenschutz gemäß Euro NCAP Frontalanprall [3]

4) NZ: Nicht Zutreffend

In der FMVSS 208 werden teilweise ähnliche Kriterien berücksichtigt, jedoch unterscheiden sich dabei die Grenzwerte im Vergleich zum Euro NCAP. In Tabelle 16 sind die Kriterien und Grenzwerte zusammengefasst.







Methode

Körperregion	Kriterium	Einheit	Limit
Kopf	HIC15	[-]	500,00
	HIC36	[-]	1.000,00
Nacken	Nij		1,0
	Zugkraft	[kN]	6,806
	Druckkraft	[kN]	6,160
	Flexionsmoment	[Nm]	310
	Extensionsmoment	[Nm]	135
	Zugkraft	[kN]	4,17
	Druckkraft	[kN]	4,0
Brustkorb	Eindrückung	[mm]	63,00
	a3ms	[g]	60
Oberschenkel	Oberschenkelkraft	[kN]	10

#### Tabelle 16: Grenzwerte der Verletzungskriterien gemäß FMVSS 208 [4]

Die vereinfachte Darstellung der Insassensicherheit erfolgt über eine Farbklassifzierung, in der nach dem jeweiligen erreichten Kriteriumswert einer Körperregion eine bestimmte Farbe zugeordnet wird. Als Grenzwerte werden die Werte gemäß Euro NCAP Frontalanprall [3] verwendet. Werden in einer Körperregion zwei Kriterien bewertet, so führt jeweils der schlechtere Wert zur Klassifizierung. Folgende Farben werden vergeben:

- o Grün: Werte in der entsprechenden Körperregion sind unter dem strengeren Limit
- Gelb: Werte in der entsprechenden Körperregion sind zwischen dem niedrigeren und strengeren Limit
- Orange: Werte in der entsprechenden Körperregion sind zwischen dem strengeren Limit und dem Capping Limit bzw. unter dem Capping Limit
- o Rot: Werte in der entsprechenden Körperregion sind über dem Capping Limit



Abbildung 32: Beispielhafte Farbklassifizierung









Ergebnisse

# **4 ERGEBNISSE**

In diesem Kapitel werden zunächst die Versuchsergebnisse im Einzelnen betrachtet und Videodaten ausgewertet, sowie die Bewertungskriterien angeben.

# 4.1 Einzelversuchsergebnisse

## 4.1.1 Versuch 1

Das Fahrzeug trifft mit einer Überdeckung von 100% mittig auf den Anpralldämpfer. Das Back-Up des Anpralldämpfers beginnt sich nach etwa 70 ms zu verschieben und trifft nach etwa 316 ms mit der Hinterkante auf die Betonabsicherung. Das Fahrzeug wird vollständig verzögert und ab 450 ms gegen die Anprallrichtung zurück beschleunigt. Die Endlage wird nach 1,5 s erreicht und das Fahrzeug kommt mit einer Verdrehung von etwa 2° um die Hochachse zum Stillstand.

Das Fahrzeug wird während des Anpralls unter den Anpralldämpfer gedrückt und der Anpralldämpfer dadurch hochgehoben. Gleichzeitig wird das Prüffahrzeug voll in die Federn gedrückt und prallt mit der Bodenplatte auf der Fahrbahn an. Ein Anprall des Fahrzeugs an das Back-Up erfolgt nach etwa 150 ms, wobei sich das Fahrzeug und das Back-Up mit konstanter Geschwindigkeit gegen die Absicherung weiterbewegen. In dieser Phase kommt es zu keiner Beschleunigung im Fahrzeug. Ab etwa 316 ms prallt das Back-Up gegen die Betonabsicherung und es kommt erneut zu einem Beschleunigungsanstieg.

Etwa 20 ms nach dem Anprall werden die Frontairbags (Fahrerairbag, Knieairbag, Beifahrerairbag) geöffnet (am Video sichtbar). Die Seitenairbags (Vorhang, Sitz) lösen nicht aus. Der Gurtstraffer und der Gurtkraftbegrenzer wurde aktiviert. Es sind Gurtmarken festzustellen.

Der Kopf der anthropomorphen Prüfpuppe trifft nach etwa 60 ms auf den voll entfalteten Airbag auf. Die maximale Kopfbeschleunigung wird nach 127 ms erreicht. Die resultierende 3msec Kopf-Beschleunigung beträgt 26,01 g. Der HIC15 beträgt 52 und der HIC36 113.

Der ASI erreicht bei etwa 110 ms das Maximum mit 1,60 (Sensor 1) bzw. 1,58 (Sensor 2) und erreicht bei etwa 434 ms einen weiteren Peak (0,41 bei Sensor 1 und 0,4 bei Sensor 2), hervorgerufen durch den Anprall des Back-Up an die Absicherung. Der THIV wird zu 48,53 km/h bzw. 48,35 km/h errechnet. Es sind keine Intrusionen in die Fahrgastzelle festzustellen, die Fahrgastzelle bleibt unbeschädigt und die Radstände sind nicht verkürzt. Die Beschädigung ist vorwiegend im Bereich der Motorhaube, hervorgerufen durch das Unterfahren des Anpralldämpfers. Das Durchschlagen auf das Back-Up trägt nicht wesentlich zum Schadensbild bei.









Ergebnisse

Die zeitliche Abfolge des Anpralls für spezifische Ereignisse ist im Anhang A.1 dargestellt.









 Bundesministerium Elimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Ergebnisse

### 4.1.2 Versuch 2

Das Fahrzeug trifft mit einer Überdeckung von 100% mittig auf den Anpralldämpfer. Das Back-Up des Anpralldämpfers beginnt sich nach etwa 110 ms zu verschieben und trifft nach etwa 424 ms mit der Hinterkante auf die Betonabsicherung. Das Fahrzeug wird vollständig verzögert und ab 880 ms gegen die Anprallrichtung beschleunigt. Die Endlage wird nach 1,1 s erreicht und das Fahrzeug kommt mit einer Verdrehung von etwa 5° um die Hochachse zum Stillstand.

Ebenso wie im Versuch #1 wird das Fahrzeug während des Anpralls unter den Anpralldämpfer gezogen und der Anpralldämpfer dadurch leicht hochgehoben. Das Prüffahrzeug wird vollständig in die Federn gedrückt und prallt mit der Bodenplatte auf der Fahrbahn an. Ein Anprall des Fahrzeugs an das Back-Up kann durch die Staubentwicklung während des Versuchs nicht zweifelsfrei festgestellt werden.

Etwa 98 ms nach dem Anprall erfolgt der Anprall des Kopfes der anthropomorphen Prüfpuppe auf das Lenkrad. Ein eindeutiger Kontakt kann allerdings nicht identifiziert werden. Im Beschleunigungssignal des Kopfes ist hierzu keine Unregelmäßigkeit festzustellen, welche auf einen Anprall an das Lenkrad hindeuten würde. Die maximale Kopfbeschleunigung wird nach 95 ms erreicht. Die resultierende 3msec Beschleunigung beträgt 40,63 g. Der HIC15 beträgt 157 und der HIC36 331.

Der ASI erreicht bei etwa 105 ms das Maximum mit 1,66 (Sensor 1) bzw. 1,64 (Sensor 2). Der THIV wird zu 49,01 km/h bzw. 48,95 km/h errechnet.

Es kommt zu keinen Intrusionen in die Fahrgastzelle, jedoch ist ein Knick am seitlichen Dachträger auf der Fahrerseite im Bereich der B-Säule festzustellen. Durch den Anprall wird der Radstand beidseitig um etwa 6 cm verkürzt.

Der Gurtstraffer wurde aktiviert und es sind Gurtmarken festzustellen. Es sind Kniekontakte der anthropomorphen Prüfpuppe mit der Armaturentafel festzustellen.

Die zeitliche Abfolge des Anpralls für spezifische Ereignisse ist im Anhang A.2 dargestellt.









Ergebnisse







 Bundesministerium Dinaschutz, Umweit, Erwrgie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Ergebnisse



#### 4.1.3 Versuch 3

Das Fahrzeug trifft mit einer Überdeckung von 50% auf den Anpralldämpfer, sodass die Hälfte der rechten Fahrzeugfront überdeckt ist. Das Back-Up des Anpralldämpfers beginnt sich nach etwa 100 ms zu verschieben und trifft nach etwa 270 ms mit der Hinterkante auf die Betonabsicherung. Das Fahrzeug rotiert um die Hochachse in die Endlage und kommt nach 1,25 s entgegen der Anfahrrichtung zum Stillstand. Der Gierwinkel in der Endlage beträgt etwa 145° im Uhrzeigersinn, bezogen auf die Anprallposition. Das linke Vorderrad ist etwa 3,2 m und das linke Hinterrad etwa 4,6 m von der Ecke der Betonabsicherung entfernt.

Das Fahrzeug durchschlägt den Anpralldämpfer und prallt nach etwa 100 ms gegen das Back-Up. Die Beschädigung ist gemäß der Anprallkonfiguration an der vorderen rechten Fahrzeughälfte. Das rechte Vorderrad wird gegen den Radkasten verschoben. Der rechte Radstand wird um etwa 9 cm verkürzt. Links bleibt der Radstand durch den Anprall unverändert. Es können keine Intrusionen in den Fahrgastraum festgestellt werden.

Etwa 128 ms nach dem Anprall werden die Frontairbags (Fahrerairbag, Knieairbag, Beifahrerairbag) im Video sichtbar. Die Seitenairbags (Vorhang, Sitz) lösen nicht aus. Der Gurtstraffer und der Gurtkraftbegrenzer wurde aktiviert. Es sind Gurtmarken festzustellen.

Der Kopf der anthropomorphen Prüfpuppe trifft bei etwa 128 ms auf das Lenkrad bzw. den sich gerade entfaltenden Airbag. Im Beschleunigungssignal des Kopfes ist eine eindeutige Unregelmäßigkeit festzustellen. Die maximale Kopfbeschleunigung wird nach 147 ms erreicht. Die resultierende 3msec Beschleunigung beträgt 47,44 g. Der HIC15 beträgt 209 und der HIC36 363.

Der ASI erreicht bei etwa 136 ms das Maximum mit 2,11 (Sensor 1) bzw. 2,09 (Sensor 2). Der THIV wird zu 51,56 km/h bzw. 50,70 km/h errechnet.

Die zeitliche Abfolge des Anpralls für spezifische Ereignisse ist im Anhang A.3 dargestellt.







TU Graz I COMPARE

Ergebnisse









TU Graz I COMPARE

Ergebnisse



#### 4.1.4 Versuch 4

Ebenso wie in Versuch #3 trifft das Fahrzeug mit einer Überdeckung von 50% auf den Anpralldämpfer, sodass die Hälfte der rechten Fahrzeugfront überdeckt ist. Das Back-Up des Anpralldämpfers beginnt sich nach etwa 112 ms zu verschieben und trifft nach etwa 294 ms mit der Hinterkante auf die Betonabsicherung. Das Fahrzeug rotiert um die Hochachse in die Endlage und kommt nach 1,5 s entgegen der Anfahrrichtung zum Stillstand. Der Gierwinkel in der Endlage beträgt etwa 220° im Uhrzeigersinn, bezogen auf die Anprallposition. Das linke Vorderrad ist etwa 6,44 m und das linke Hinterrad etwa 5,66 m von der Ecke der Betonabsicherung entfernt.

Das Fahrzeug durchschlägt den Anpralldämpfer und prallt nach etwa 108 ms gegen das Back-Up. Die Beschädigung ist gemäß der Anprallkonfiguration an der vorderen rechten Fahrzeughälfte. Das rechte Vorderrad wird gegen den Radkasten verschoben. Der rechte Radstand wird um etwa 14 cm verkürzt, der linke um etwa 6 cm verlängert. Im Bereich der rechten B-Säule ist am seitlichen Dachlängsträger befindet sich ein leichter Knick. Intrusionen in den Fahrgastraum können nicht festgestellt werden.

Der Gurtstraffer wurde aktiviert und es sind Gurtmarken festzustellen.

Der Kopf der anthropomorphen Prüfpuppe trifft bei etwa 143 ms auf das Lenkrad. Im Beschleunigungssignal des Kopfes ist der Anprall eindeutig festzustellen. Die maximale Kopfbeschleunigung wird nach 148 ms erreicht. Die resultierende 3msec Beschleunigung beträgt 67,97 g. Der HIC15 beträgt 272 und der HIC36 312.

Der ASI erreicht bei etwa 130 ms das Maximum mit 2,63 (Sensor 1) bzw. 2,60 (Sensor 2). Der THIV wird zu 43,37 km/h bzw. 43,29 km/h errechnet.

Die zeitliche Abfolge des Anpralls für spezifische Ereignisse ist im Anhang A.4 dargestellt.







TU Graz I COMPARE

Ergebnisse









 Bundesministerium Dimaschutz, Umweit, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Ergebnisse



## 4.2 Analyse der Fahrzeugkriterien

#### 4.2.1 Fahrzeugbeschleunigung

Beim Anprall mit voller Überdeckung wird sowohl beim VW Golf als auch beim Opel Corsa eine durchschnittliche Beschleunigung von ca. 15 bis 20 g erreicht (Abbildung 34 und Abbildung 35). Die Berechnung der a3ms Fahrzeugbeschleunigung ergibt für den VW Golf bei der vollen Überdeckung einen Wert von 27,0 g und für den Opel Corsa 22,37 g. Beim VW Golf wird eine Beschleunigungsspitze gleich zu Beginn erreicht. Dadurch ist die a3ms deutlich höher als beim Opel Corsa. Bei der Teilüberdeckung ist die a3ms beim VW Golf 36,96 g und beim Opel Corsa 46,06 g. Das Fahrzeug erfährt bei der Teilüberdeckung eine deutlich höhere Beschleunigung als bei der vollen Überdeckung, hervorgerufen durch den Anprall an das Back-Up. Die unterschiedlichen aXms Beschleunigungen sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Beim Anprall bei voller Überdeckung zeigt sich zu Anprallbeginn ein deutlicher Peak im Beschleunigungssignal, welcher bei der Teilüberdeckung nicht festzustellen ist (Abbildung 33). Nach dem Peak nimmt die Beschleunigung ab und steigt anschließend wieder an. Unter Vernachlässigung des ersten Beschleunigungspeaks, hat der Beschleunigungsverlauf eine mehr oder weniger trapezförmige Charakteristik. Beim Anprall mit einer Teilüberdeckung wird eine Beschleunigung von ca. 8 bis 10 g erreicht bis die Fahrzeuge am Back-Up anschlagen. Ab diesem Zeitpunkt (ca. 100 ms) steigt die Beschleunigung bis auf ca. 30 bis 40 g an. Der Opel Corsa erfährt eine deutlich höhere maximale Beschleunigung (ca. 40 g) als der VW Golf (ca. 30 g). Die Beschleunigungs-Charakteristik ist zunächst trapezförmig. Nach dem Anprall an das Back-Up schließt ein dreieckiger Verlauf an.

In beiden Anprallkonfigurationen (volle Überdeckung und Teilüberdeckung) ist die Beschleunigungsdauer ca. 200 ms, wobei beim Opel Corsa bei der Teilüberdeckung die Beschleunigungsdauer ca. 170 ms beträgt.









Ergebnisse



Abbildung 33: Fahrzeuglängsbeschleunigung bei voller Überdeckung (links) und Teilüberdeckung (rechts)



Abbildung 34: Fahrzeuglängsbeschleunigung (links) und resultierende Fahrzeugbeschleunigung (rechts)



Abbildung 35: Maximale Beschleunigung und aXms Fahrzeugbeschleunigung in den vier Anprallversuchen







Ergebnisse

		#1	#2	#3	#4
		VW Golf 6	Opel Corsa	VW Golf 6	Opel Corsa
a max	[g]	28,47	22,73	37,85	48,17
a3ms	[g]	27,00	22,37	36,96	46,06
a5ms	[g]	26,72	21,87	34,46	44,46
a10ms	[g]	24,47	21,84	30,72	40,82
a15ms	[g]	22,51	21,29	28,60	37,69
a20ms	[g]	21,34	20,83	27,67	34,70
a25ms	[g]	21,02	20,05	26,19	29,00
a30ms	[g]	20,15	19,63	24,52	20,43
a50ms	[g]	17,88	17,67	16,66	14,80
a100ms	[g]	14,62	14,03	9,24	10,68

Tabelle 17: Maximale Beschleunigung und aXms Fahrzeugbeschleunigung der vier Anprallversuche

Bei der Teilüberdeckung wird nach ca. 100 ms (VW Golf) bzw. ca. 108 ms (Opel Corsa) ein Anprall des Fahrzeugs an das Back-Up festgestellt. Ab diesem Zeitpunkt beginnt die Fahrzeugbeschleunigung deutlich zu steigen. Bis zu diesem Zeitpunkt wird beim VW Golf ein Geschwindigkeitsabbau von ca. 27 km/h und beim Opel Corsa von ca. 37 km/h festgestellt (Abbildung 36). Somit prallen der VW Golf mit einer Geschwindigkeit von ca. 73 km/h und der Opel Corsa mit ca. 63 km/h gegen das Back-Up. Im Vergleich dazu ist zum selben Zeitpunkt bei der vollen Überdeckung ein Geschwindigkeitsabbau beim VW Golf von ca. 45 km/h und beim Opel Corsa von ca. 51 km/h festzustellen. Die beiden Fahrzeuge unterscheiden sich um ca. 300 kg im Fahrzeuggewicht. Der Opel Corsa hat ein Gewicht von 945 kg und der VW Golf 1.245 kg.

Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung in Fahrzeuglängsrichtung (y-Komponente bleibt unberücksichtigt), am Ende der Fahrzeugbeschleunigung (bei ca. 200ms), ist beim VW Golf bei ca. 91 km/h und beim Opel Corsa bei ca. 93 km/h bei einer vollen Überdeckung. Bei der Teilüberdeckung konnte eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung beim VW Golf von ca. 81 km/h und beim Opel Corsa von ca. 87 km/h festgestellt werden.







 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Nobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Ergebnisse



Abbildung 36: Geschwindigkeitsverlauf in Längsrichtung der Fahrzeuge in den vier Anprallversuchen

#### 4.2.2 ASI

Die Beschleunigungs-Charakteristik hat auch Auswirkungen auf den ASI-Verlauf (Abbildung 37). Bei der Teilüberdeckung ist der Anstieg des ASI flacher als bei einer vollen Überdeckung. Wenn die Fahrzeuge an das Back-Up anprallen ist eine deutliche Unstetigkeit im Kurvenverlauf festzustellen. Der ASI ist bei der vollen Überdeckung bei beiden Fahrzeugen auf ähnlichem Niveau. Beim VW Golf wurde ein ASI von 1,6 und beim Opel Corsa ein ASI von 1,66 errechnet. Bei der Teilüberdeckung hingegen ist der ASI beim VW Golf mit 2,11 deutlich niedriger als beim Opel Corsa mit 2,63. Hierbei hat vermutlich die höhere Masse des VW Golf einen positiven Einfluss auf den ASI.

Jedenfalls ist der ASI bei der Teilüberdeckung deutlich höher als bei einem Anprall mit voller Überdeckung, was auf den Anprall an das Back-Up zurückzuführen ist.







 Bundesministerlum Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Ergebnisse



Abbildung 37: ASI in den vier Anprallversuchen

## 4.2.3 THIV und OIV

Ein etwas anderes Bild ergibt sich für den THIV. Bei den Versuchen mit voller Überdeckung unterscheiden sich die Werte nur unwesentlich (Abbildung 38). Beim VW Golf ist ein THIV von 48,53 km/h und beim Opel Corsa ein THIV von 49,09 km/h festzustellen. Bei der Teilüberdeckung hingegen wurde beim VW Golf ein THIV von 51,56 km/h und beim Opel Corsa ein THIV von 43,37 km/h festgestellt.

Im Vergleich zum ASI ist beim THIV bei der vollen Überdeckung kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Fahrzeugen festzustellen. Hingegen ist bei der Teilüberdeckung der ASI beim Opel Corsa höher als beim VW Golf, der THIV für dieses Fahrzeug jedoch niedriger. Der THIV beim VW Golf ist durch Schwingungen im Beschleunigungssignal deutlich höher, als beim Opel Corsa. Werden diese Schwingungen geglättet, so würde der THIV in der Größenordnung zwischen 45 km/h bis 47 km/h liegen, jedoch nicht unter dem THIV des Opel Corsa. Das heißt, dass der THIV bei der Teilüberdeckung tendenziell niedriger wäre als bei der vollen Überdeckung.

Für den OIV ist eine ähnliche Tendenz festzustellen.



Abbildung 38: THIV und OIV in den vier Anprallversuchen








Ergebnisse

## 4.2.4 PHD und ORA

Der PHD liegt für den VW Golf bei voller Überdeckung bei 20,94 g und beim Opel Corsa bei 20,76 g, unterscheidet sich unbedeutend (Abbildung 39). Bei der Teilüberdeckung ist der PHD beim VW Golf mit 30,83 g deutlich niedriger als beim Opel Corsa mit 42,41 g. Ebenso kann das für die ORA festgestellt werden. Bei der vollen Überdeckung ist die ORA beim VW Golf 20,94 g und beim Opel Corsa 21,78 g. Bei der Teilüberdeckung ist die ORA beim VW Golf (31,9 g) deutlich niedriger als beim Opel Corsa (42,41 g).



Abbildung 39: PHD und ORA in den vier Anprallversuchen

## 4.2.5 Energieäquivalente Geschwindigkeit (EES)

Beim Anprall des VW Golf mit voller Überdeckung konnte keine Radstandsverkürzung festgestellt werden. Hingegen verkürzten sich der Radstände beim Opel Corsa auf beiden Seiten um ca. 6 cm. Bei der Teilüberdeckung wurde der rechte Radstand beim VW Golf um ca. 9 cm verkürzt und beim Opel Corsa wurde der Radstand um ca. 14 cm verkürzt. In Abbildung 40 sind die Beschädigungsbilder der einzelnen Fahrzeuge nach dem Versuch dargestellt.





 Bundesministerium Elimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

#### Ergebnisse



Abbildung 40: Seitliches Beschädigungsbild der Fahrzeuge zur Abschätzung der EES









Ergebnisse

## 4.3 Kopfkriterien

### 4.3.1 HIC

Der HIC ist im hohen Maß vom Fahrzeug und dessen Insassen-Rückhaltesystem abhängig. So ist bei voller Überdeckung beim VW Golf mit Gurtstraffer, Gurtkraftbegrenzer und Airbag ein HIC15 von 52 festzustellen (Abbildung 41; Beschleunigungsverlauf Kopf in Abbildung 42). Der Opel Corsa ist zwar mit einem Gurtstraffer ausgerüstet, ein Gurtkraftbegrenzer ist nicht im Fahrzeug und der Airbag wurde für den Test deaktiviert. Der HIC15 errechnet sich bei diesem Fahrzeug zu 157. Allerdings ist der VW Golf ca. 300 kg schwerer als der Opel Corsa. Bei der Teilüberdeckung ist ebenfalls der Einfluss der Insassenrückhaltesysteme festzustellen. Beim VW Golf ist der HIC15 209 und beim Opel Corsa 272. Bei der Teilüberdeckung ist für beide Fahrzeuge eine höherer HIC15 festzustellen als bei der vollen Überdeckung. Werden die zulässigen Grenzen für den HIC15 im Euro NCAP [3] oder auch in der FMVSS208 [4] herangezogen, so kann für keinen der vier Versuche ein Überschreiten der Grenze von 700 festgestellt werden. Beim Standardtest mit voller Überdeckung gemäß der EN 1317-3 [1] ist der HIC für beide Fahrzeuge in Relation zum Grenzwert von 700 sehr niedrig. Für ein Fahrzeug nur mit Gurtstraffer, Gurtkraftbegrenzer und Airbag noch einmal deutlich niedriger als für ein Fahrzeug nur mit Gurtstraffer.

Beim HIC36 ist bei der vollen Überdeckung ein ähnliches Bild festzustellen. Der HIC36 für den VW Golf ist 113 und für den Opel Corsa 331. Bei der Teilüberdeckung ist allerdings der HIC36 beim Opel Corsa (312) niedriger als beim VW Golf (363). Bei einem Grenzwert von 1.000 gemäß der FMVSS208 [4], ist der HIC36 bei den vier Versuchen ebenfalls weit unter der Grenze.



Abbildung 41: Vergleich des HIC der vier Anprallversuche und Grenzen gemäß Euro NCAP Frontalanprall

(links: HIC15, rechts: HIC36)







TU Graz I COMPARE

Ergebnisse

In Tabelle 18 ist das Risiko unterschiedlicher Verletzungsschweren in Bezug zum HIC36 der einzelnen Versuche zusammengefasst. Die Berechnung erfolgt gemäß NHTSA [59] und bezieht sich auf den HIC36.

So ist das Risiko einer AIS 3 Verletzung beim VW Golf und einer vollen Überdeckung bei 0,9%. Beim höchsten HIC (Opel Corsa mit Teilüberdeckung) wäre das Risiko einer AIS3 Verletzung bei 7,0%. Weitaus höher sind die Risiken für AIS 1 und AIS 2 Verletzungen. Allerdings sind diese auch deutlich weniger schwerwiegend.

	HIC36	AIS 1	AIS2	AIS3	AIS4	AIS5	AIS6
VW Golf, 100% Überdeckung	113	7,1%	2,4%	0,9%	0,2%	0,0%	0,0%
Opel Corsa, 100% Überdeckung	331	50,2%	18,3%	5,9%	1,3%	0,1%	0,0%
VW Golf, 50% Überdeckung	312	46,2%	16,5%	5,4%	1,2%	0,1%	0,0%
Opel Corsa, 50% Überdeckung	363	56,7%	21,6%	7,0%	1,5%	0,1%	0,0%

Tabelle 18: Risiko einer AIS Verletzung bezogen auf den HIC36 (Berechnung gemäß [59])

#### 4.3.2 a3ms

Die a3ms Kopfbeschleunigung beträgt für den Insassen im VW Golf bei der vollen Überdeckung 26 g und für den Opel Corsa 40,63 g. Auch hier kann ein optimales Insassenrückhaltesystem den Beschleunigungswert beeinflussen und deutlich reduzieren. Bei der Teilüberdeckung hat der VW Golf ebenfalls eine niedrigere a3ms (47,44 g) als der Opel Corsa (67,97 g). Die zulässige Grenze ("Capping Limit") gemäß dem Euro NCAP Frontalanprall [3] beträgt 80 g. Das strengere Limit liegt bei 72 g und wird in keinem der Versuche erreicht oder überschritten, wobei die a3ms Kopfbeschleunigung beim Opel Corsa bei der Teilüberdeckung an das strengere Limit heranreicht.











 Bundesministerlum Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Ergebnisse

## 4.4 Nacken

### 4.4.1 Scherkraft

Die maximal auftretenden Scherkräfte im Nacken sind für den VW Golf bei voller Überdeckung am geringsten (Abbildung 43). Zwischen dem Opel Corsa bei voller Überdeckung und dem VW Golf bei einer Teilüberdeckung ist nahezu kein Unterschied festzustellen. Beim VW Golf mit voller Überdeckung wird der Airbag rechtzeitig ausgelöst und der Dummy fällt in den entfaltenden Airbag. Im Vergleich zu den anderen Versuchen kann diese geringe Scherkraft erklärt werden. Beim Opel Corsa mit voller Überdeckung war der Airbag deaktiviert und somit eine höhere Belastung des Nackens festzustellen. Bei der Teilüberdeckung mit dem VW Golf hat der Airbag erst knapp vor dem Aufschlagen des Dummykopfes auf das Lenkrad geöffnet. Die deutlich höheren Scherkräfte im Vergleich zur vollen Überdeckung können damit zusammenhängen.



Abbildung 43: Vergleich der Scherkräfte der vier Anprallversuche und Grenzen gemäß Euro NCAP Frontalanprall

### 4.4.2 Zugkraft

Die Zugkraft ist am geringsten für den Anpralltest mit dem VW Golf und einer vollen Überdeckung (Abbildung 44). Beim Anpralltest mit dem Opel Corsa mit voller Überdeckung wurde der höchste Wert festgestellt, jedoch noch unter dem strengeren Limit gemäß Euro NCAP Frontalanprall [3]. Der Opel Corsa hat keinen Gurtkraftbegrenzer und der Brustkorb wird dadurch stärker zurückgehalten als beim VW Golf. Dadurch erfährt der ATD eine deutlich höhere Zugkraft im Nacken.







 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Ergebnisse





#### 4.4.3 Nackenmoment

Die Grenzwerte der Nackenmomente gemäß Euro NCAP Frontalanprall [3] werden in allen Tests deutlich unterschritten (Abbildung 45, rechts unten). Deutlich besser schneidet der VW Golf bei den Versuchen ab. Sowohl bei voller Überdeckung als auch bei der Teilüberdeckung. Der Opel Corsa weißt mehr als doppelt so hohe Werte auf als der VW Golf. Trotzdem werden die Grenzwerte auch in diesem Fahrzeug nicht erreicht. Für das Nackenmoment bei Flexion werden die Grenzwerte nach Mertz [63] in Kleinberger et al. [52] mit 190 Nm herangezogen. Auch für diese Belastungsrichtung wird der Grenzwert in keinem der vier Tests erreicht.









Ergebnisse



Abbildung 45: Vergleich der Nackenmoment für Flexion (unten links) und Extension (unten rechts) der vier Anprallversuche und Grenzen gemäß Euro NCAP Frontalanprall

## 4.4.4 Nij

Das Limit des Nij gemäß der FMVSS208 [4] wird in keinem Versuch und in keiner der vier Belastungskombinationen erreicht (Abbildung 46). Der höchste Wert wird beim Anpralltest mit voller Überdeckung mit dem Opel Corsa in der Belastungskombination NTF erreicht. Der zweithöchste Wert ist ebenfalls beim Opel Corsa bei der Teilüberdeckung in der Belastungskonfiguration NCF festzustellen.







 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Ergebnisse



Abbildung 46: Vergleich des Nackenkriteriums Nij der unterschiedlichen Belastungskonfigurationen (links) und der Maximalwerte (rechts) der vier Anprallversuche

# 4.5 Brustkorb

### 4.5.1 Brustkorbbeschleunigung a3ms

In Abbildung 47 ist der Verlauf der resultierenden Brustkorbbeschleunigung dargestellt. Die maximale Beschleunigung ist für die Versuche mit dem VW Golf deutlich niedriger als beim Opel Corsa. Der a3ms Wert für die volle Überdeckung beim VW Golf ist 23,47 g und beim Opel Corsa 28,3 g. Bei der Teilüberdeckung ist dies beim VW Golf 34,36 g und beim Opel Corsa 45,76 g. Der Grenzwert für die Brustkorbbeschleunigung wurde in der FMVSS 208 [4] mit 60 g festgelegt. In allen vier Versuchen wird dieser Wert nicht erreicht. Im Euro NCAP Frontalanprall wird die Brustkorbbeschleunigung nicht gesondert bewertet.



Abbildung 47: Brustkorbbeschleunigung der vier Anprallversuche und Grenzen gemäß FMVSS 208

### 4.5.2 Brustkorbeindrückung

Bei der Brustkorbeindrückung kann beim VW Golf sowohl bei der vollen Überdeckung als auch bei der Teilüberdeckung eine geringere Eindrückung im Vergleich zum Opel Corsa festgestellt werden (Abbildung 48). In allen vier Versuchen wird das derzeit noch gültige "Capping Limit" von 42 mm im Euro







Ergebnisse

NCAP [3] Frontalanprall unterschritten. Das mit 2023 in Kraft tretende "Capping Limit" von 34 mm wird beim Opel Corsa sowohl bei der vollen Überdeckung, als auch bei der Teilüberdeckung überschritten. Das strengere Limit mit 18 mm wird in keinem der vier Fälle erreicht.





## 4.5.3 Viscous Criterion

Das VC bleibt bei allen Versuchen unter dem Grenzwert von 1,0 m/s gemäß dem Euro NCAP Frontalanprall [3]. Selbst das strengere Limit von 0,5 m/s wird in allen vier Versuchen deutlich unterschritten. Bei diesem Kriterium kann jedoch für den Opel Corsa im Vergleich zum VW Golf ein niedriger Wert festgestellt werden. Bei voller Überdeckung ist das VC beim Opel Corsa 0,114 m/s und beim VW Golf wurde ein Wert von 0,137 m/s festgestellt. Bei der Teilüberdeckung war das VC beim Opel Corsa 0,161 m/s und beim VW Golf 0,171 m/s.



Abbildung 49: Viskosekriterium der vier Anprallversuche und Grenzen gemäß Euro NCAP Frontalanprall









Ergebnisse

## 4.6 Untere Extremitäten - Oberschenkelkräfte

Die definierten Grenzen der Oberschenkelkräfte im Euro NCAP Frontalanprall [3] werden in keinem der vier Anpralltests überschritten bzw. sind sehr deutlich unter den Grenzen (Abbildung 50 und Abbildung 51). Im Opel Corsa bei einem vollüberdeckten Anprall sind im rechten Oberschenkel die höchsten Werte festzustellen. Das niedrigere Limit Euro NCAP Frontalanprall [3] wird hier leicht überschritten.



Abbildung 50: Zeitlicher Verlauf der Oberschenkelkräfte in den vier Anprallversuchen



Abbildung 51: Oberschenkelkräfte der vier Anprallversuche und Grenzen gemäß Euro NCAP Frontalanprall









Ergebnisse

# 4.7 Schultergurtkräfte

Beim VW Golf wird unabhängig von der Anprallkonfiguration eine maximale Schultergurtkraft von ca. 4 kN erreicht (Abbildung 52). Beim Opel Corsa ist die Schultergurtkraft (5,8 kN) deutlich höher und erreicht beim Anprall mit voller Überdeckung fast die Grenze von 6 kN gemäß dem Euro NCAP Frontalanprall [3]. Im Falle der Teilüberdeckung überschreitet die Schultergurtkraft beim Opel Corsa den Grenzwert deutlich und erreicht einen Maximalwert von 7,6 kN.



Abbildung 52: Verlauf der Schultergurtkräfte







 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Ergebnisse

## 4.8 Zusammenfassung und Korrelation der Fahrzeug- und Insassenkriterien

Nach der festgelegten Farbcodierung, angelehnt an die Euro NCAP Bewertung, würden beim Anprall mit dem VW Golf mit voller Überdeckung alle Körperregionen bis auf den Brustkorb grün dargestellt werden (Abbildung 53). Beim Brustkorb ist das schlechtere Abschneiden auf die Brustkorbeindrückung zurückzuführen, welche gemäß Euro NCAP Frontaltest das strengere Limit überschreiten würde. Beim Opel Corsa würde das strengere Limit für den Brustkorb ebenfalls nicht unterschritten, jedoch bleiben die Werte unter dem derzeit gültigen Capping Limit. Da hierbei das Capping Limit ab 2023 niedriger ist, wurde der Brustkorb mit "orange" gekennzeichnet. Ab 2023 wäre nach dieser Klassifizierung der Brustkorbbereich "rot" eingefärbt. Die Gurtkräfte bleiben unter dem Limit und sind im "grünen" Bereich. Bei der Teilüberdeckung ergibt sich dasselbe Bild. Jedoch wird das Limit der Gurtkräfte beim Test mit dem Opel Corsa überschritten und daher sind die Gurtkräfte rot gekennzeichnet.

In Tabelle 19 und Tabelle 20 sind die ausgewerteten Bewertungskriterien zusammengefasst. In Abbildung 54 sind die Relativwerte bezogen auf die jeweiligen Grenzen im Frontanprall des Euro NCAP bzw. der FMVSS 208 angegeben. Bis auf den strengeren Grenzwert der Brustkorbeindrückung, welcher in jedem Test überschritten wird, die Gurtkräfte, welche nur beim Versuch mit dem Opel Corsa und einer Teilüberdeckung überschritten wird und die Oberschenkelkräfte beim Versuch mit dem Opel Corsa und einer vollen Überdeckung, bleiben die Insassenwerte stets unter den strengeren Grenzwerten.

Volle Übe	erdeckung	Teilüber	deckung
VW Golf 6	Opel Corsa	VW Golf 6	Opel Corsa

Abbildung 53: Farbklassifizierung des Verletzungsrisikos beim Insassen







 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Intovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Ergebnisse

Shoulder beit load     Shoulder beit load     Source of the source	Shoulder belt load         Image: Shoulder belt load           Femar compression         Image: Should belt load           Viscous criterion         Image: Should belt load           Dest compression         Image: Should belt load
Femur compression     Viscous criterion     Orest compression     acc3ms chest acceleration     Extension Nackenmoment()	Persur compression     Viscous criterion     Dest compression
Visions striterion Oriest compression acclaris chert acceleration Extension Olackenmoment	Visional criterion
Chest compression acclars chest accoleration Extension (Nackenmonnent)	B Overt compression
acclims chest acceleration Detension (Nackenmonnent)	0
Extension (Nackenmoment)	acc3ms cherif acceleration
	Extension (Nackenmoment)
Tension Manual	Tension Million
Shear English and a shear and a shear	Share and the second se
g allms head acceleration	g allms head acceleration
E HICLS II.	E HICIS HILL
142 A MA POOL O' 1"TACK ME' CAMELIND' 2024	(#4 Opel Corsa, 937 kg, Overlap: 50%)
Ing and more of a tage overlaps accel	(#4 Opel Corsa, 937 kg, Overlap: 50%)
Shoulder beit load annumentation	(#4 Opel Corsa, 937 kg, Overlap: 50%)
Shoulder beit load and a second	(#4 Opel Corsa, 937 kg, Overlap: 50%)
Shoulder beit load and a service of the service of	(#4 Opel Corsa, 937 kg, Overlap: 50%)
Shoulder beit load Shoulder beit load Viscous criterion Chest compression	(#4 Opel Corsa, 937 kg, Overlap: 50%)
Shoulder beit load	(#4 Opel Corsa, 937 kg, Overlap: 50%)     Shoulder belt load   Femur compension
Shoulder beit load Shoulder beit load Shoulder beit load Viscous criterion Chest compression auclins chest acceleration Extension (Nackermonent) Statesion (Nackermonent) Statesion (Nackermonent)	(#4 Opel Corsa, 937 kg, Overlap: 50%)    Shoulder belt load  Femar compension  Viscous criterion  Coest compression  auclets sheet alceleration  Extension (Nackermoment)  Stresson (Nackermoment)
Shoulder beit load Shoulder beit load Viscous criterion Duest compression auclines chest alceleration Extension (Nackermonent) Shear Shear	(A4 Opel Corsa, 937 kg, Overlap: 50%)
Shoulder belt load Shoulder belt load Shoulder belt load Viscous criterion Automotive to compression Automotive to compressi	(A4 Opel Corsa, 937 kg, Overlap: 50%)

Abbildung 54: Relativwerte der Insassenkriterien bezogen auf die unterschiedlichen Grenzen des Frontanpralls

gemäß Euro NCAP oder der FMVSS 208







 Bundesministerium Rimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Ergebnisse

			#1	#2	#3	#4
Position	Kriterium		VW Golf 6	Opel Corsa	VW Golf 6	Opel Corsa
Schwerpunkt	ASI (Sensor 1)	[-]	1,60	1,66	2,11	2,63
	ASI (Sensor 2)	[-]	1,58	1,64	2,09	2,60
	t <sub>ASI</sub> (Sensor 1)	[s]	0,1098	0,1044	0,1356	0,1298
	t <sub>ASI</sub> (Sensor 2)	[s]	0,1103	0,1045	0,1361	0,1299
	THIV (Sensor 1)	[km/h]	48,53	49,09	51,56	43,37
	THIV (Sensor 2)	[km/h]	48,35	48,95	50,70	43,29
	PHD (Sensor 1)	[g]	20,94	20,76	30,83	42,41
	PHD (Sensor 2)	[g]	20,81	20,67	30,80	42,22
	OIV (Sensor 1)	[m/s]	48,52	49,09	48,13	43,90
	OIV (Sensor 2)	[m/s]	48,37	49,03	47,53	43,74
	Δt (Sensor 1)	[s]	0,106	0,098	0,131	0,118
	Δt (Sensor 2)	[s]	0,106	0,098	0,131	0,118
	ORA (Sensor 1)	[g]	20,94	21,78	31,90	42,41
	ORA (Sensor 2)	[g]	20,81	21,67	31,78	42,22
	tora (Sensor 1)	[s]	0,108	0,093	0,128	0,121
	tora (Sensor 2)	[s]	0,108	0,093	0,128	0,120
	CoG amax (Sensor 1)	[g]	28,47	22,73	37,85	48,17
	CoG a3ms (Sensor 1)	[g]	27,00	22,37	36,96	46,06
	CoG a5ms (Sensor 1)	[g]	26,72	21,87	34,46	44,46
	CoG a10ms (Sensor 1)	[g]	24,47	21,84	30,72	40,82
	CoG a15ms (Sensor 1)	[g]	22,51	21,29	28,60	37,69
	CoG a20ms (Sensor 1)	[g]	21,34	20,83	27,67	34,70
	CoG a25ms (Sensor 1)	[g]	21,02	20,05	26,19	29,00
	CoG a30ms (Sensor 1)	[g]	20,15	19,63	24,52	20,43
	CoG a50ms (Sensor 1)	[g]	17,88	17,67	16,66	14,80
	CoG a100ms (Sensor 1)	[g]	14,62	14,03	9,24	10,68

## Tabelle 19: Bewertungskriterien bezogen auf Fahrzeugmessdaten







 Bundesministerlum Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Ergebnisse

Tabelle 20: Bewertungskriterien bezogen auf Messdaten der anthropomorphen Prüfpuppe

				#1	#2	#3	#4
Position	Krite	rium		VW Golf 6	Opel Corsa	VW Golf 6	Opel Corsa
Kopf	HIC3	6	[-]	113	331	363	312
	HIC1	5	[-]	52	157	209	272
	Bescl	nleunigung a3ms	[g]	26,01	40,63	47,44	67,97
	t <sub>a3ms</sub>		[ms]	127,14	94,86	16,59	148,17
Nacken	Sche	rkraft F <sub>x</sub>	[kN]	0,26	0,9	0,88	0,69
	t <sub>Fx</sub>		[s]	0,181	0,1135	0,1674	0,1545
	Zugkraft Fz		[kN]	0,88	1,59	1,22	1,14
	t <sub>Fz</sub>		[s]	0,1221	0,0917	0,1559	0,1439
	Nackenmoment Extension My		[Nm]	-11,16	-23,45	-9,68	-22,48
	Nackenmoment Flexion My		[Nm]	18,65	54,46	68,56	120,91
	t <sub>My E</sub>		[s]	0,5089	0,0689	0,2992	0,1775
	t <sub>My F</sub>		[s]	0,5686	0,1098	0,1497	0,1551
		NTE	-	0,083	0,076	0,031	0,167
	Nij	NTF	-	0,060	0,403	0,221	0,334
		NCE	-	0,027	0,101	0,073	0,070
		NCF	-	0,024	0,056	0,014	0,390
		Nij max	-	0,083	0,403	0,221	0,390
Brustkorb	Beschleunigung a3ms		[g]	23,47	28,3	34,36	45,76
	t <sub>a3ms</sub>		[ms]	150,36	69,31	150,9	152,6
	Kompression d <sub>x</sub>		[mm]	31,52	35	27,67	37,91
	t <sub>dx</sub>		[s]	0,1392	0,1099	0,1538	0,163
	Viscous Criterion (VC)		[m/s]	0,1367	0,1137	0,1709	0,1608
Oberschenkel	Oberschenkelkraft links (+)		[kN]	0.82	1 1 1	0.82	12
	Oberschenkelkraft rechts (+)		[kN]	0.79	0.81	0.65	0.87
	Ober	schenkelkraft links (-)	[kN]	-0.8	-0.88	_1 999	-0.299
	Ober	schenkelkraft rechts (-)		-0,0	-0,00	-0.82	-0,200
	Ober			-1,13	2,12	0,02	0,392
Gurtkräfte	Schu	ltergurt	[kN]	4,15	5,76	4,53	7,61
	Beck	engurt	[kN]	4,31	4,88	5,63	6,03
	ts	<u> </u>	[s]	0,1492	0,0837	0,1329	0,1544
	tв		[s]	0,1289	0,0683	0,1397	0,1513

In Tabelle 21 ist der Korrelationskoeffizient R und der dazugehörige Signifikantzwert p angegeben. Die grafischen Zusammenhänge sind in Anhang B dargestellt und die Korrelationen der aXms Fahrzeugbeschleunigungen mit den Insassenkriterien sind in Anhang C zusammengefasst.

Der ASI korreliert positiv (R=0,49), jedoch nicht signifikant (p=0,514), mit dem HIC15. Das bedeutet, dass mit zunehmendem ASI auch eine Zunahme des HIC15 festzustellen ist. Der THIV und OIV hingegen korrelieren negativ mit dem HIC, d.h. mit zunehmendem THIV bzw. OIV nimmt der HIC ab. Beim PHD





 Bundesministerium Elimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Ergebnisse

und bei der a3ms Fahrzeugbeschleunigung besteht eine positive, nicht signifikante Korrelation mit dem HIC15. Signifikante Zusammenhänge auf einem Signifikanzniveau von 5% zwischen den Kriterien sind in der Tabelle grün markiert. Die orange gekennzeichneten Zellen weisen auf ein Signifikanzniveau von 10% hin.

Bis auf den THIV und die OIV korrelieren ASI, PHD, ORA und die maximale Fahrzeugbeschleunigung durchwegs positiv mit den Verletzungskriterien für den Kopf, Nacken, Brustkorb und Schulterkräfte. Lediglich die Zugkraft im Nacken als auch der Nij<sub>max</sub> mit der OIV korrelieren gegenverkehrt. Der Nij wird prinzipiell in vier unterschiedlichen Belastungskombinationen unterteilt. In der Tabelle 21 ist jedoch nur der maximale Nij angegeben, da nur der maximale Wert für die Bewertung relevant ist.

Die maximale Fahrzeugbeschleunigung und die "moving average acceleration" korrelieren, unabhängig vom Zeitfenster, im ähnlichen Ausmaß mit den Insassenkriterien. Die Bewertung der Fahrzeugbeschleunigung über die "moving average acceleration" führt jedoch, zumindest bei den gegenständlichen Versuchen, zu keinem Mehrwert, weswegen dieser Wert in Tabelle 21 nicht enthalten ist. In Appendix C sind auch die Korrelationswerte zur "moving average acceleration" angegeben.

		ASI	THIV	PHD	OIV	ORA	COG amax
Kopf		0,49	0,1	0,43	-0,19	0,48	0,3
	HIC30	(p=0,514)	(p=0,902)	(p=0,567)	(p=0,811)	(p=0,519)	(p=0,703)
		0,9	-0,43	0,87	-0,73	0,9	0,77
	пістэ	(p=0,099)	(p=0,572)	(p=0,127)	(p=0,271)	(p=0,104)	(p=0,232)
	Konf o2mc	0,95	-0,63	0,94	-0,86	0,95	0,84
		(p=0,047)	(p=0,373)	(p=0,064)	(p=0,136)	(p=0,054)	(p=0,162)
Nacken	Shear	0,29	0,22	0,23	0,00	0,28	0,08
	Sileai	(p=0,711)	(p=0,78)	(p=0,77)	(p=0,998)	(p=0,718)	(p=0,921)
	Tonsion	-0,1	0,2	-0,15	0,25	-0,11	-0,35
	rension	(p=0,904)	(p=0,802)	(p=0,846)	(p=0,749)	(p=0,888)	(p=0,653)
	Extension	-0,27	0,63	-0,24	0,39	-0,24	-0,04
		(p=0,733)	(p=0,37)	(p=0,76)	(p=0,611)	(p=0,759)	(p=0,961)
	Nii may	0,46	-0,44	-0,87	0,94	0,82	0,2
		(p=0,542)	(p=0,563)	(p=0,129)	(p=0,058)	(p=0,183)	(p=0,795)
Brust-	Chest 23ms	0,99	-0,65	0,98	-0,91	0,98	0,91
korb		(p=0,014)	(p=0,351)	(p=0,023)	(p=0,09)	(p=0,018)	(p=0,093)
	Chest compression	0,38	-0,88	0,38	-0,61	0,36	0,23
	Chest compression	(p=0,618)	(p=0,117)	(p=0,621)	(p=0,385)	(p=0,642)	(p=0,766)
	Viscous Criterion	0,73	-0,07	0,74	-0,54	0,75	0,84
	viscous criterion	(p=0,271)	(p=0,925)	(p=0,258)	(p=0,459)	(p=0,252)	(p=0,158)
Ober-	Oborschonkolkraft	-0,76	0,67	-0,82	0,63	0,75	0,75
schenkel	Oberscheinkeinfall	(p=0,235)	(p=0,329)	(p=0,185)	(p=0,371)	(p=0,247)	(p=0,247)
Schulter	Schultorgurtkraft	0,75	-0,85	0,74	-0,83	0,73	0,59
	Schultergultklaft	(p=0,25)	(p=0,15)	(p=0,264)	(p=0,174)	(p=0,269)	(p=0,411)

Tabelle 21: Lineare Korrelation R und Signifikanz zwischen Fahrzeug- und Insassenkriterien (grün: Signifikanzni-veau 5%, orange: Signifikanzniveau 10%)







 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Diskussion

# **5 DISKUSSION**

Durch die gewählten Anprallbedingungen wurde bewusst eine der Norm abweichende Anprallkonfiguration geschaffen, um die Leistungsfähigkeit eines Anpralldämpfers unter realeren Bedingungen festzustellen. Mit der festgelegten Anprallgeschwindigkeit muss der Anpralldämpfer um das 1,56-fache mehr an Energie aufnehmen, als dies gemäß EN 1317 der Fall wäre. Die Kennwerte ASI, THIV und PHD sind daher höher als bei einem Zertifizierungstest, in welchem die Anprallgeschwindigkeit niedriger ist. Bei der Betrachtung der Beschädigungsbilder, kann im Vergleich zu einem Anprall gegen eine starre Wand (siehe Abbildung 3 nach Kunc et al. [18]), ein deutlicher Energieabbau durch den Anpralldämpfer festgestellt werden.

Insassenwerte (z.B. Kopfkriterien, etc.) sind aus den Zertifizierungstests nach EN 1317 nicht verfügbar. Es können daher nur die Grenzwerte, welche bei der Entwicklung von Insassenrückhaltsystemen gültig sind, als Vergleich herangezogen werden. Dabei scheinen die Insassen relativ gut geschützt zu sein.

# 5.1 Fahrzeugkriterien

Beim Anprall mit voller Überdeckung wird in beiden Versuchen eine gleichmäßige Verzögerung der Fahrzeuge erreicht. Unmittelbar nach dem Anprall wird ein steiler Anstieg des Beschleunigungssignals festgestellt und ein lokales Maximum von ca. 27 g (VW Golf) bzw. ca. 18 g (Opel Corsa) erreicht. Die Beschleunigung fällt anschließend auf 5 g und steigt kontinuierlich bis zur maximalen Beschleunigung von ca. 28 g (VW Golf) und ca. 23 g (Opel Corsa). Bei den Versuchen mit der Teilüberdeckung hingegen ist in den ersten 100 ms eine Beschleunigung von etwa 10-12 g für beide Fahrzeug festzustellen. Nach dieser ersten Zeitspanne kommt es zum Anprall am Back-Up, wodurch die Beschleunigung bis zu den maximalen Werten (VW Golf ca. 38 g und Opel Corsa ca. 48 g) steigen. Beim VW Golf mit Teilüberdeckung öffnet der Airbag erst nach etwa 128 ms, was durch Auswertung der Videodaten ermittelt wurde. Die Auslöseschwelle wird vermutlich bei einer Beschleunigung von 25 g liegen, denn beim Anprall mit voller Überdeckung wird das Öffnen des Airbags ab ca. 20 ms im Video sichtbar. Die Airbagauslösung ist jedoch neben dem Beschleunigungsniveau, der Fahrzeuggeschwindigkeit und weiteren Parametern, auch vom Anstieg im Beschleunigungssignal abhängig. Bei voller Überdeckung erfolgt ein steiler Anstieg der Beschleunigung und ein erster Peak mit 25 g wird dabei überschritten. Bei der Teilüberdeckung ist einerseits die Beschleunigung in den ersten 100 ms relativ gering und andererseits kein steiler Anstieg des Beschleunigungssignals festzustellen. Daher wird ein Auslösen der Airbags unmittelbar durch den Anprall nicht erreicht.







 Bundesministerium Elimaschutz, Unwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Diskussion

Die beschriebene Beschleunigungscharakteristik hat auch einen massiven Einfluss auf die in dieser Zeitspanne abgebaute Geschwindigkeit. Bei der Teilüberdeckung wird innerhalb der ersten 100 ms beim VW Golf ein Geschwindigkeitsabbau von ca. 27 km/h und beim Opel Corsa von ca. 37

Bei der Betrachtung des ASI ist bei voller Überdeckung zwischen den beiden Fahrzeugen kein wesentlicher Unterschied zu erkennen. Der ASI beim VW Golf ergibt sich zu 1,6 und beim Opel Corsa zu 1,66. Hingegen ist bei der Teilüberdeckung der ASI beim VW Golf mit 2,11 deutlich niedriger als beim Opel Corsa mit 2,63. Durch den Anprall der Fahrzeuge an das Back-Up bei der Teilüberdeckung ist der ASI jedenfalls höher als bei voller Überdeckung. Im zeitlichen Verlauf des ASI ist auch die unterschiedliche Charakteristik der Beschleunigungssignale zu erkennen. So ist der Anstieg bei den Versuchen mit voller Überdeckung deutlich steiler, als im Vergleich dazu die Verläufe bei der Teilüberdeckung, was auf die zunächst recht moderate Verzögerung bei der Teilüberdeckung zurückzuführen ist. Nachdem jedoch die Fahrzeuge gegen das Back-Up prallen steigt der ASI deutlich bis zum Erreichen des Maximums an. In beiden Fällen ist allerdings der ASI für das leichtere Fahrzeug höher als für das schwerere.

Für einen Vergleich der Kennwerte ASI, THIV und PHD beim Anprall gegen eine ungesicherte, starre Wand werden die Ergebnisse der Untersuchung von Kunc et al. [18] herangezogen. Diese wurden auf Grund von FE Simulationen der ermittelt. Als Fahrzeuge wurden ein Dodge Neon und ein Suzuki Swift gewählt. Der Dodge Neon fällt in die Gewichtsklasse des in dieser Studie verwendeten VW Golf und der Suzuki Swift entspricht in etwa dem Opel Corsa. Die Anprallgeschwindigkeit für den Dodge Neon war 80 km/h und für den Suzuki Swift 100 km/h. Es wurden fünf unterschiedliche Anprallwinkel simuliert, wobei der Anprallwinkel (ca. 4°) der Simulation #3 in Kunc et al. [18] noch am besten mit dem Anprallwinkel in der gegenständlichen Studie übereinstimmt. Alle anderen Simulationsläufe haben einen deutlich höheren Anprallwinkel.

Für die Simulation #3 (Anprall gegen eine ungesicherte, starre Wand) wurde für den Dodge Neon ein ASI von 4,12, ein THIV von 68,45 km/h und ein PHD von 59,74 [g] festgestellt und für den Suzuki Swift ein ASI von 3,54, ein THIV von 59,74 km/h und eine PHD von 55,74 [g]. Jedenfalls liegen alle drei Bewertungskriterien deutlich über den Grenzwerten der EN 1317, bei einer Anprallgeschwindigkeit gemäß EN 1317.

Für den Anpralldämpfer ALPINA F1-80 wird in der gegenständlichen Studie für den VW Golf ein ASI von 1,6 und für den Opel Corsa ein ASI von 1,66 festgestellt. Im Vergleich zu einer ungesicherten starren Wand, wird durch den ALPINA F1-80 der ASI auf weniger als die Hälfte (45%) reduziert. Beim THIV fällt der Unterschied mit ca. 82% nicht so deutlich aus. Der PHD wird auf ca. 37% des Wertes beim Anprall gegen eine ungesicherte starre Wand reduziert.





 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Diskussion

Folgt man der Studie von Gabauer und Gabler [30] zu Verletzungsrisikokurven in Zusammenhang mit dem ASI, so ist bei einem ASI von 1,6 (VW Golf, volle Überdeckung) mit einem Risiko von 48% eine MAIS 2+ Verletzung zu erwarten. Das Risiko einer MAIS 3+ Verletzung wäre bei 15%. Für den Opel Corsa bei voller Überdeckung mit einem ASI von 1,66 wäre das Risiko einer MAIS 2+ Verletzung bei 50,5% und bei 16,5% für MAIS 3+ Verletzungen. Im Falle einer Teilüberdeckung würde sich für den VW Golf ein Risiko von 70,5% für MAIS 2+ und von 29,0% für MAS 3+ Verletzungen ergeben. Beim Opel Corsa wäre mit einem Risiko von 88,0% für MAIS 2+ und mit 50,5% für MAIS 3+ Verletzungen zu rechnen. Gabauer und Gabler [30] merken jedoch an, dass die dafür untersuchten Verkehrsunfälle nur Daten von einem Fahrzeughersteller untersucht wurden. Allerdings erwarten sie keine große Varianz bei der Berücksichtigung weiterer Hersteller in deren Ergebnissen.

Beim THIV ist für die volle Überdeckung ebenso kein Unterschied zwischen den beiden Fahrzeugen festzustellen. Der VW Golf liegt mit 48,5 km/h nur geringfügig unter dem Opel Corsa mit 49,1 km/h. Bei der Teilüberdeckung ist der THIV beim Opel Corsa mit knapp 44 km/h geringer als der VW Golf mit ca. 48 km/h. Bei einer vollen Überdeckung und einem THIV von ca. 49 km/h wäre nach Gabauer und Gabler [30] das Risiko von MAIS 2+ Verletzungen bei ca. 60% und jenes von MAIS 3+ Verletzungen bei ca. 20%. Das Risiko von MAIS 2+ Verletzungen bei einer Teilüberdeckung im VW Golf wäre bei 66% und für MAIS 3+ Verletzungen bei 25%. Hingegen wäre das Risiko für MAIS 2+ Verletzungen für den Opel Corsa (THIV ca. 44 km/h) bei ca. 48% und bei ca. 14% für MAIS 3+ Verletzungen.

Werden die Grenzwerte der EN 1317 für die unterschiedlichen Anprallheftigkeitsstufen der Untersuchung von Gabauer und Gabler [30] zur Bewertung der Verletzungsschwere herangezogen, so wäre das Risiko einer MAIS 3+ Verletzung bei einem ASI von 1,9 bei ca. 23%. Bei einem ASI von 1,4 wäre das Risiko bei ca. 12%. Werden die OIV Risikokurven herangezogen, so wäre das Risiko einer MAIS 3+ Verletzung bei einem OIV von 44 km/h bei ca. 14%.

Die Kollisionsgeschwindigkeit wird durch den Anprall am Anpralldämpfer nahezu vollständig abgebaut. Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung ist, je nach Anprallkonfiguration, zwischen 81 km/h und 93 km/h. Gemäß Risikokurven, für Frontalkollisionen, nach Augenstein et al. [73] wären hierzu MAIS 3+ Verletzungen mit einem Risiko von 90% und darüber zu erwarten. Die Risikokurven nach Augenstein et al. wurden auf Basis von Fahrzeug-Fahrzeugkollisionen entwickelt. Obwohl die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung ein sehr guter Parameter zur Bewertung von Verletzungsrisiken ist, ist bei Kollisionen mit einem Anpralldämpfer die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung kein







 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Diskussion

geeigneter Parameter. Beispielsweise ist das Risiko einer MAIS 3 Kopf-Verletzung, bewertet auf Basis einer HIC Risikokurve [59], zwischen 0,9% und 7,0%.

Ebenso ist die EES kein geeigneter Parameter zur Bestimmung des Verletzungsrisikos der Insassen. Die Radstände sind beim VW Golf und voller Überdeckung nicht verkürzt. Beim Opel Corsa in dieser Anprallkonfiguration konnte eine Radstandverkürzung von ca. 6 cm festgestellt werden. Bei der Teilüberdeckung kam es beim VW Golf zu einer Radstandverkürzung von ca. 9 cm und beim Opel Corsa von ca. 15 cm. Das Fahrzeug musste demzufolge keine hohen Energien aufnehmen.

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Fahrzeugmasse und den einzelnen Kriterien kann aus den gegenständlichen Versuchen nicht abgeleitet werden, da das schwere Fahrzeug (VW Golf) auch das Fahrzeug mit der verbesserten Sicherheitsausstattung ist. Jedoch wurde in einer Untersuchung von Burbridge et al. [29] mit zunehmender Masse eine Tendenz zu niedrigeren Werten für den ASI, OIV bzw. ORA festgestellt. Die Fahrzeugmasse wirkt sich demnach positiv auf die Fahrzeugkriterien aus.

## 5.2 Insassenkriterien

### 5.2.1 Kopf

Die Analyse der Insassenkriterien zeigt teilweise ein deutliches Unterschreiten von Grenzwerten nach dem Euro NCAP Frontanprall [3] bzw. der FMVSS 208 [4]. Der höchste HIC15 wurde beim Opel Corsa und einer Teilüberdeckung mit 272 festgestellt, wobei das strengere Limit gemäß dem Euro NCAP Frontanprall [3] mit 500 festgelegt ist. Der VW Golf erreicht einen Wert von 209 und ist ebenfalls deutlich unter dem genannten Limit. Bei der vollen Überdeckung wurde für den VW Golf lediglich ein HIC15 von 52 festgestellt. Obwohl der HIC15 beim Opel Corsa etwa dreimal so hoch liegt, ist dieser mit 157 doch deutlich unter der strengeren Grenze des Euro NCAP [3]. Das sogenannte Capping Limit mit einem HIC15 von 700 bzw. der Grenzwert nach der FMVSS 208 [4] mit einem HIC15 von 700 ist jedenfalls weit unterschritten. Das Risiko einer entsprechenden Kopfverletzung gemäß AIS Schweregrad ist in Tabelle 22 zusammengefasst. Beim VW Golf und einer vollen Überdeckung wäre das Risiko einer AIS 3 Verletzung 0,1% und beim Opel Corsa bei 1,7%. Bei der Teilüberdeckung würde sich für den VW Golf ein Risiko für AIS 3 Verletzungen von 2,7% und für den Opel Corsa von 4,3% ergeben.





Diskussion

Tabelle 22: Risiko einer Kopfverletzung nach AIS Schweregraden gemäß NHTSA und Prasad und Mertz [59]

	HIC15	AIS 1	AIS 2	AIS 3	AIS 4	AIS 5	AIS 6
#1 VW Golf, 100% Überdeckung	52	0,6%	0,2%	0,1%	0,02%	0,00%	0,000%
#2 Opel Corsa, 100% Überdeckung	157	14,3%	4,7%	1,7%	0,36%	0,02%	0,000%
#3 VW Golf, 50% Überdeckung	209	24,3%	8,0%	2,7%	0,59%	0,04%	0,001%
#4 Opel Corsa, 50% Überdeckung	272	37,6%	12,9%	4,3%	0,92%	0,06%	0,001%

Der HIC15 und demnach auch das Verletzungsrisiko bei einem Anprall ist vom Fahrzeug selbst und dessen Sicherheitsausstattung und von der Anprallkonfiguration abhängig. So sind die Insassen im VW Golf bei einer vollen Überdeckung deutlich besser geschützt als im Opel Corsa bei einer Teilüberdeckung.

Ein ähnliches Bild ergibt die Analyse der a3ms Kopfbeschleunigung. Auch hier ist für den VW Golf bei einer vollen Überdeckung die niedrigste Beschleunigung von ca. 26 g festzustellen. Die Kopfbeschleunigung im Opel Corsa ist hierbei mit ca. 41 g schon deutlich höher. Der Anprall an das Back-Up bei der Teilüberdeckung führt beim VW Golf zu einer a3ms Kopfbeschleunigung von ca. 47 g und beim Opel Corsa werden ca. 68 g erreicht. In allen vier Versuchen bleiben die Werte jedoch unter dem strengeren Limit des Euro NCAP Frontanpralls [3] mit einem Limit von 72 g. Bei der Teilüberdeckung im VW Golf öffnet der Lenkradairbag ca. 128 ms nach dem Anprall. Der Dummykopf ist hierbei knapp vor dem Lenkrad und wird durch den sich öffnenden Airbag angeschossen. Unmittelbar zu diesem Zeitpunkt ist im Beschleunigungssignal des Kopfes eine eindeutige Beschleunigungsspitze festzustellen. Diese reicht bis auf ca. 67 g. Für die Berechnung der a3ms Beschleunigung ist diese jedoch nicht relevant, da die Zeitspanne dafür zu kurz ist. Nichtsdestotrotz ist die Interaktion des Airbag während der Entfaltung mit dem Insassen mit einem erheblichen Verletzungsrisiko verbunden [74].

#### 5.2.2 Nacken

Die strengeren Grenzwerte für die Scher- und Zugkraft als auch das Nackenmoment – Extension gemäß Euro NCAP Frontanprall [3] werden in keinem der vier Versuche überschritten. Auch hier schneidet der VW Golf beim Anprall mit voller Überdeckung am besten ab. Allerdings ist beim Opel Corsa bei der Teilüberdeckung die Nackenscherkraft geringer als beim VW Golf in der gleichen Anprallkonfiguration. Beim VW Golf öffnet sich der Airbag erst kurz vor dem Aufschlagen des Dummykopfes auf das Lenkrad. Dadurch kann die höhere Scherkraft beim VW Golf im Vergleich zum Opel Corsa unter Umständen erklärt werden. Weiters ist beim Opel Corsa eine höhere Gierbewegung durch den Anprall gegeben, was die Scherkraft ebenfalls beeinflussen kann. Da die Scherkraft beim Versuch mit dem Opel Corsa auch im Vergleich zur vollen Überdeckung geringer ist, lässt sich die niedrigere Scherkraft bei der Teilüberdeckung erklären.





 Bundesministerlum Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Diskussion

Bei den Zugkräften ist eine ähnliche Charakteristik gegeben. Das strengere Limit nach dem Euro NCAP Frontanprall [3] wird in keinem der Tests erreicht. Bei der vollen Überdeckung ist beim Opel Corsa die Zugkraft mit 1,59 kN relativ knapp unter der strengeren Grenze von 1,7 kN. Das Capping Limit mit 1,95 kN wird hingegen auch in diesem Test deutlich unterschritten. Den geringsten Wert (0,88 kN) weist der VW Golf bei der vollen Überdeckung auf.

Beim Nackenmoment ist das maximale Extensionsmoment, sowohl bei der vollen Überdeckung als auch bei der Teilüberdeckung in etwa gleich hoch. Dies kann bei beiden Fahrzeugen festgestellt werden. Das strengere Limit des Euro NCAP Frontanpralls [3] wird in keinem der vier Tests annähernd erreicht.

Der niedrigste Nij von 0,08 wurde beim VW Golf und bei voller Überdeckung festgestellt. Nach Mertz [65] und Prasad [64] in [52] wäre das Risiko einer AIS 3+ Nackenverletzung bei 2,3% und bei einer AIS 5+ Verletzung bei 1,5%. Bei einer Teilüberdeckung würde sich beim VW Golf ein maximaler Nij von 0,22 ergeben. Dies entspräche einem Risiko einer AIS 3+ Nackenverletzung von 3,2% und einem Risiko einer AIS 5+ Verletzung von 1,8%. Beim Opel Corsa bei voller Überdeckung lag der maximale Nij bei 0,4 und bei der Teilüberdeckung bei 0,39. Das Risiko einer AIS 3+ Nackenverletzung wäre ca. 4,6% und einer AIS 5+ Nackenverletzung ca. 2,3%. In einer Falluntersuchung von Chell et al. [12] würde in einem Test an ein H4b System bei einem ASI von 1,5 und THIV von 33 km/h das Risiko einer Nackenverletzung bei 30% liegen und eine Verletzungsschwere von AIS 3 bedeuten. Als Kriterium wurde der Nij herangezogen. Bei zwei weiteren in der Studie angegebenen Versuchen wurde bei einem ASI von 1,2 und THIV von 30 km/h bzw. ASI von 0,9 und THIV von 28 km/h ein Risiko einer Nackenverletzung von kleiner 15% festgestellt. Allerdings betreffen diese Versuche Anprallkonfigurationen an ein Fahrzeugrückhaltesystem nach EN 1317-2 mit einem Anprallwinkel von 20°.

#### 5.2.3 Brustkorb

Die Brustkorbbeschleunigung a3ms sind in allen vier Tests deutlich unter dem Limit nach der FMVSS 208 [4] mit 60 g. Im Euro NCAP erfolgt keine separate Bewertung der Brustkorbbeschleunigung, sondern es wird die Brustkorbeindrückung und das Viscous Criterion bewertet. Bei der Brustkorbeindrückung wird zumindest das derzeit noch gültige Limit von 42 mm in allen Tests unterschritten. Das ab 2023 gültige Limit von 34 mm wird hingegen nur beim VW Golf in beiden Testkonfigurationen unterschritten. Das strengere Limit von 18 mm wird in keinem der Tests erreicht. Das strengere Limit des Viscous Criterion des Euro NCAP Frontanpralls [3] wird jedenfalls deutlich unterschritten. Es zeigt sich jedoch ein Einfluss des Gurtes auf die Insassenbelastungen. Beim Opel Corsa liegen die Belastungen (Eindrückung bzw. Beschleunigung) in beiden Anprallvarianten über den Werten des Golf, was auf einen fehlenden Gurtkraftbegrenzer zurückzuführen ist.







 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Diskussion

#### 5.2.4 Untere Extremitäten – Oberschenkelkräfte

In allen vier Tests ist ein Kontakt der Knie mit der Armaturentafel festzustellen. Bei den Versuchen mit dem VW Golf sind die Oberschenkelkräfte im Vergleich zum Opel Corsa niedriger. Insbesondere konnte das für den rechten Oberschenkel festgestellt werden. Die maximale Oberschenkelkraft von 2,72 kN wird beim Opel Corsa und einer vollen Überdeckung festgestellt und die strengere Grenze des Euro NCAP Frontanpralls [3] von 2,7 kN überschritten. In den anderen drei Tests wird die strengere Grenze teilweise sehr deutlich unterschritten.

## 5.2.5 Schultergurtkräfte

Der VW Golf war mit einem Gurtstraffer und einem Gurtkraftbegrenzer ausgestattet. Sowohl bei der vollen Überdeckung als auch bei der Teilüberdeckung waren die Schultergurtkräfte in einem Bereich von ca. 4 kN und deutlich unter der Grenze des Euro NCAP Frontanpralls [3] mit 6 kN. Der Opel Corsa war nur mit einem Gurtstraffer ausgestattet. Beim Anprall mit voller Überdeckung wurde eine Schultergurtkraft von 5,8 kN festgestellt und lag nur knapp unter dem Limit. Bei der Teilüberdeckung wurde jedoch das Limit deutlich überschritten (7,6 kN). Ein Gurtkraftbegrenzer ist somit definitiv vorteilhaft für den Fahrzeuginsassen.

## 5.3 Korrelation der Fahrzeug- zu Insassenkriterien

Die einzelnen Kriterien können auf unterschiedliche Weise miteinander korrelieren. Eine ausschließliche Betrachtung des Korrelationskoeffizienten ist oft nicht ausreichend und es ist auch die grafische Darstellung zu beachten. In diesem Kapitel werden lineare Korrelationen betrachtet. Für die Fälle wo es von dieser abweicht, wird im Text explizit darauf hingewiesen. Signifikante Korrelationen werden angegeben, nicht signifikante Korrelationen können Tabelle 21 entnommen werden.

### 5.3.1 HIC vs. ASI und THIV/OIV bzw. PHD/ORA

In der Literatur gibt es nur sehr wenige Studien zur Korrelation von ASI und THIV mit Insassenkriterien. Die meisten betreffen jedoch den ASI bzw. THIV und den HIC. Shojaati und Schüler [9, 10] stellen einen exponentiellen Zusammenhang zwischen ASI und HIC her (R<sup>2</sup>=0,6792). Die Analysen beruhen auf neun Anpralltests nach EN 1317-2. In der gegenständlichen Untersuchung würde sich bei einem exponentiellen Zusammenhang zwischen ASI und HIC15 ein R<sup>2</sup> von 0,6185 (linear: R<sup>2</sup>=0,8115) ergeben und in ähnlicher Größenordnung liegen wie bei Shojaati und Schüler [9, 10]. Eine manuelle Auswertung der Simulationsergebnisse von Sturt und Fell [13] ergibt ein (exponentielles) R<sup>2</sup> von 0,8735 und ist deutlich





 Bundesministerium Klinaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Diskussion

höher als in der gegenständlichen Studie, allerdings bei nur drei Realversuchen. Bei den anderen Studien [12, 15, 28], welche eine Korrelation zwischen ASI und HIC herstellten, sind die Zusammenhänge deutlich geringer. Selbst von Gabauer und Thomson [11], welche ausschließlich Frontalkollisionen analysiert haben, ist nur ein sehr geringes (exponentielles) R<sup>2</sup> von 0,1282 festzustellen. Ebenso wurden die Werte manuell aus den Abbildungsdaten der Veröffentlichung extrapoliert.

Der THIV und HIC15 korrelieren in der gegenständlichen Studie negativ mit einem R<sup>2</sup> von 0,0764 (exponentiell) und R<sup>2</sup> von 0,1835 (linear). Das steht im deutlichen Gegensatz zu anderen Studien [12, 15, 28], welche zumindest eine leicht positive Korrelation zwischen THIV und HIC feststellen. Dies ist wohl auf die geringe Anzahl an Versuchen und den unterschiedlichen Anprallkonfigurationen zurückzuführen. In Sturt und Fell [13] könnte man einen exponentiellen Zusammenhang zwischen THIV und HIC herstellen, doch Angaben zu den Einzelwerten fehlen und eine Extrapolation aus dem Bildmaterial ist auf Grund der Unschärfe in der Abbildung nicht möglich. Auch in Gabauer und Thomson [11] ist keine Korrelation zwischen dem OIV (wird analog zum THIV berechnet, jedoch die Rotationsbewegung bleibt unberücksichtigt) und dem HIC festzustellen. Der OIV variierte in einem deutlich geringeren Ausmaß als der HIC. Beispielsweise lag der OIV zwischen 15 m/s und 17 m/s bei einem Anpralltest von 35 mph (56 km/h) und der HIC erreichte Werte zwischen 300 und 1.000.

Der ASI korreliert nur leicht positiv mit der PHD (R<sup>2</sup>=0,1849) als auch mit der ORA (R<sup>2</sup>=0,2304). Beides jedoch nicht signifikant. Studien zur Korrelation zwischen dem HIC und PHD liegen nicht vor. Gabauer und Thomson [11] stellen in ihrer Studie fest, dass die ORA mit dem HIC korreliert. Mit zunehmender ORA nimmt auch der HIC zu. Jedoch ist für eine statistische Aussage der Datensatz nicht ausreichend.

### 5.3.2 a3ms Kopfbeschleunigung vs. ASI und THIV/OIV bzw. PHD/ORA

Die a3ms Kopfbeschleunigung korreliert positiv mit dem ASI (R<sup>2</sup>=0,9086). Mit dem THIV (R<sup>2</sup>=0,3927) ist eine negative Korrelation festzustellen. Mit der PHD korreliert die a3ms Kopfbeschleunigung positiv bei einem R<sup>2</sup> von 0,8836 (p=0,064). Auch bei der ORA kann man eine positive Korrelation feststellen (R<sup>2</sup>=0,9025, p=0,054). Ebenso sind zur a3ms Kopfbeschleunigung keine Studien zur Korrelation mit den Fahrzeugkriterien verfügbar.

### 5.3.3 Nackenkriterien vs. ASI und THIV/OIV bzw. PHD/ORA

Zwischen der Scherkraft und Zugkraft konnten nur sehr geringe Korrelationen mit den Fahrzeugkriterien festgestellt werden (R<sup>2</sup> zwischen 0,0632 und 0,0834). THIV und OIV weisen die höchsten Korrelationen mit dem Nackenmoment auf. Der THIV korreliert allerdings stärker positiv (R<sup>2</sup>=0,3969) mit dem







Diskussion

Nackenmoment als der OIV (R<sup>2</sup>=0,1512), was auf die Berücksichtigung der Drehrate beim THIV zurückzuführen sein dürfte.

Beim maximalen Nij ist eine leichte positive Korrelation mit dem ASI festzustellen ( $R^2$ =0,2098). Der THIV korreliert negativ mit dem maximalen Nij ( $R^2$ =0,1911). Die höchste Korrelation wurde mit der OIV festgestellt ( $R^2$ =0,8880). Die PHD ( $R^2$ =0,7578) und die ORA ( $R^2$ =0,7111) korrelieren positiv mit dem maximalen Nij.

Die Zugkräfte zeigen bei Sturt und Fell [13] einen exponentiellen Zusammenhang mit zunehmendem ASI als auch mit dem THIV. Dies jedoch nur auf Grund der Interpretation der veröffentlichten Abbildungen. Beim Nackenmoment steigt tendenziell mit zunehmendem ASI das Nackenmoment. Eindeutigere Aussagen sind jedoch nicht möglich. Ähnliche Zusammenhänge könnten beim THIV und dem Nackenmoment festgestellt werden.

## 5.3.4 Brustkorbeindrückung vs. ASI und THIV/OIV bzw. PHD/ORA

Bei der Brustkorbeindrückung ist eine leicht positive Korrelation (R<sup>2</sup>=0,1456) mit dem ASI festzustellen. In Gabauer und Thomson [11] ist eine große Varianz bei der Brustkorbeindrückung festzustellen. Diese reicht von wenigen Millimetern bis über 50 mm.

Beim THIV ist aus den vier Versuchen eine negative Korrelation (R<sup>2</sup>=0,7802) mit der Brustkorbeindrückung festzustellen. In Gabauer und Thomson [11] ist auch hier eine große Varianz bei der Brustkorbeindrückung in Kombination mit dem OIV festzustellen.

Die PHD korreliert nur leicht positiv mit der Brustkorbeindrückung (R<sup>2</sup>=0,1434), ebenso die ORA (R<sup>2</sup>=0,1278). Gabauer und Thomson [11] stellen eine leicht negative Korrelation zwischen Brustkorbeindrückung und ORA fest.

## 5.3.5 a3ms Brustkorbbeschleunigung vs. ASI und THIV/OIV bzw. PHD/ORA

Die a3ms Brustkorbbeschleunigung korreliert positiv mit dem ASI (R<sup>2</sup>=0,9731). Ein derartiger Zusammenhang wurde auch von Gabauer und Thomson [11] festgestellt, jedoch war die Korrelation deutlich niedriger (R<sup>2</sup>=0,3209). Aus ihrer Sicht hat der ASI mit der Brustkorbbeschleunigung die höchste Korrelation.

Der OIV weist mit einem R<sup>2</sup> von 0,2352 eine niedrigere Korrelation auf. In der gegenständlichen Studie korreliert der THIV mit einem R<sup>2</sup> von 0,4208 allerdings negativ mit der Brustkorbbeschleunigung. Die Brustkorbbeschleunigung verhält sich somit ähnlich wie die Brustkorbeindrückung, welche ebenfalls eine negative Korrelation mit dem THIV aufweist.







TU Graz I COMPARE

Diskussion

Die PHD und ORA korreliert mit der a3ms Brustkorbbeschleunigung (R<sup>2</sup>=0,9537, R<sup>2</sup>=0,9648). Gabauer und Thomson [11] stellen eine leichte Korrelation zwischen der ORA und der a3ms Brustkorbbeschleunigung fest.

## 5.3.6 Viscous Criterion vs. ASI und THIV/OIV bzw. PHD/ORA

Zur Korrelation des Viscous Criterion mit ASI oder THIV/OIV bzw. PHD/ORA liegen keine Studien in der Literatur vor, mit welchen die Ergebnisse verglichen werden können. Das Viscous Criterion korreliert positiv mit dem ASI (R<sup>2</sup>=0,5317). Beim THIV wurde keine Korrelation mit dem Viscous Criterion festgestellt. PHD (R<sup>2</sup>=0,5501) und ORA (R<sup>2</sup>=05591) korrelieren positiv mit dem Viscous Criterion.

## 5.3.7 Untere Extremitäten – Oberschenkelkräfte vs. ASI und THIV/OIV bzw. PHD/ORA

In Gabauer und Thomson [11] wurden maximale Oberschenkelkräfte von bis zu 8 kN festgestellt. Der ASI reichte hier von ca. 1,4 bis 2,4. Selbst bei derselben Testgeschwindigkeit konnte eine sehr hohe Varianz der Oberschenkelkräfte festgestellt werden. Eine eindeutige Korrelation wurde von Gabauer und Thomson nicht festgestellt. In der gegenständlichen Studie korrelieren die Oberschenkelkräfte negativ mit dem ASI (R<sup>2</sup>=0,3917), jedoch positiv mit dem THIV (R<sup>2</sup>=0,5849). Beides jedoch nicht signifikant. Die PHD (R<sup>2</sup>=0,4503) und die ORA (R<sup>2</sup>=0,6645) korreliert positiv mit den Oberschenkelkräften. Gabauer und Thomson [11] stellen eine negative Korrelation zwischen den maximalen Oberschenkelkräften und der ORA fest.









Zusammenfassung und Fazit

# **6 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT**

Der Anprall an eine ungesicherte, starre Wand ist mit tiefen Intrusionen in die Fahrgastzelle verbunden. Die Kennwerte der Prüfnorm EN 1317 werden bei weitem überschritten. Eine Absicherung von derartigen Gefahrenstellen ist auf jeden Fall notwendig. Im Vergleich zur ungesicherten, starren Wand könnten durch den in dieser Studie untersuchten Anpralldämpfer die Kennwerte (ASI, THIV, PHD) um bis zu 65% reduziert werden.

## 6.1 Zusammenfassung

Die Zertifizierung von Fahrzeugrückhaltesystemen erfolgt nach genau festgelegten Anprallkonfigurationen gemäß der EN 1317 Teil 2 bis 4. Diese standardisierten Tests können vom realen Unfallgeschehen jedoch deutlich abweichen. Einerseits werden bei den Zertifizierungsversuchen Fahrzeuge eingesetzt, welche üblicherweise sehr alt sind und nicht dem neuesten Stand der Technik entsprechen. Andererseits wird auf den konkreten Einsatz (z.B. Tunnel-Pannenbucht, Trenninselspitz, etc.) der Fahrzeuge rückhaltesysteme kein Bezug genommen. Daher wurden in dem gegenständlichen Projekt Fahrzeuge mit verbesserter Sicherheitsausstattung (Airbag, Gurtkraftbegrenzer, etc.) mit Fahrzeugen verglichen, welche in den Zertifizierungsversuchen standardmäßig verwendet werden. Ebenfalls sollten in den Versuchen ein Bezug zum Realunfallgeschehen hergestellt werden, in welchen ein zentraler Anprall nicht notwendigerweise den Regelfall darstellt. Daher wurde die Teilüberdeckung mit 50% festgelegt, welche für das verwendete System ALPINA F1-80 bereits eine deutliche Abweichung vom Standardtest nach EN 1317-3 [1] bedeutete. Ebenso ist dieser Anpralldämpfer nicht für eine Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h entwickelt. Daher stellt diese Anprallkonfiguration bewusst eine deutliche Abweichung vom Zertifizierungstest nach EN 1317-3 [1] dar. Der Anpralldämpfer muss in der gewählten Anprallkonfiguration das 1,56-fache an Energie aufnehmen.

Für die Bewertung wurden die in der EN 1317 festgelegten Kennwerte der Anprallheftigkeit ASI und THIV herangezogen bzw. ebenso die Kriterien OIV, ORA und PDH mit den Insassenkriterien der Fahrzeugentwicklung (Kopf, Brust, Becken/Oberschenkel) korreliert.

Durch die deutlich abweichende Anprallkonfiguration von einem Zertifizierungstest nach EN 1317-3 [1] für den untersuchten Anpralldämpfer, liegen der ASI und THIV teilweise recht deutlich über den Werten gemäß eines Zertifizierungstests nach den Testbedingungen der EN 1317. Jedoch werden entsprechende Grenzwerte für die Insassenkriterien nach Vorgaben für den Frontalanprall im Euro NCAP [3] oder der FMVSS 208 [4] weitestgehend unterschritten. Es zeigte sich, dass ein Fahrzeug mit einer





 Bundesministerium Klinaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Zusammenfassung und Fazit

verbesserten Sicherheitsausstattung jedenfalls deutliche Vorteile gegenüber einem herkömmlich für EN 1317 Versuche verwendetem Fahrzeug aufweist. Dies sowohl für die volle Überdeckung als auch für die Teilüberdeckung. Allerdings sind die Kriterien bei der Teilüberdeckung für beide Fahrzeuge deutlich schlechter als bei einer vollen Überdeckung. Neben der verbesserten Sicherheitsausstattung, ist auch eine höhere Fahrzeugmasse für die Insassen vorteilhaft, obwohl dies nicht zweifelsfrei aus den Versuchen abgeleitet werden kann, da das Fahrzeug mit der höheren Masse auch das Fahrzeug mit der verbesserten Sicherheitsausstattung ist. Von Burbridge et al. [29] wurde in einer Studie jedoch ein Zusammenhang zwischen der Fahrzeugmasse und den Kriterien ASI, OIV und ORA hergestellt. Für alle drei Werte wurden mit zunehmender Fahrzeugmasse niedrigere Werte festgestellt, d.h. gemäß den Ergebnissen in Burbridge et al. [29] würden Fahrzeuge mit höherer Masse deutlich besser abschneiden. In Deutschland wurde eine Tendenz zu höheren Fahrzeuggewichten von neu zugelassenen Personenkraftwagen festgestellt [75], was sich bei einem Anprall an ein Fahrzeugrückhaltesystem somit auch positiv auf die Insassenverletzungen auswirken sollte. Das durchschnittliche Fahrzeuggewicht von neu zugelassenen Personenkraftwagen ist in den Jahren 2005 bis 2018 von 1.426 kg auf 1.515 kg angestiegen [75]. Das Mindestgewicht unterschiedlicher Hersteller<sup>6</sup> in Europa war seit 2001 stets über 1.000 kg und betrug 2017 knapp 1.200 kg [76]. Für Spanien kann eine ähnliche Systematik festgestellt werden [77]. Hernandez et al. [77] untersuchten das Fahrzeuggewicht von neu zugelassenen Fahrzeugen und der gesamten Fahrzeugflotte zwischen 2007 und 2016. Der Anteil an Fahrzeugen mit weniger als 1.000 kg ist demnach massiv rückläufig und verringerte sich in dem Zeitraum um 32%. Neu zugelassene Fahrzeuge mit weniger als 1.000 kg haben nur noch einen Anteil von 10%. Das in der EN 1317 verwendete Fahrzeug mit einer Gesamtmasse von 900 kg liegt somit deutlich unter den Fahrzeuggewichten nach Auswertung des Kraftfahrbundesamtes [75] bzw. Hernandez et al. [77]. Daher wäre es sinnvoll die Masse der Pkw in den Tests der EN 1317 an die gegenwärtige Situation anzupassen, zumindest die Fahrzeugmasse des kleinsten Fahrzeugs sollte jedenfalls evaluiert werden.

Viele Fahrzeuge sind bereits mit Airbags, Gurtkraftbegrenzer, etc. ausgestattet, welche die auf die Körperregionen wirkenden Kräfte reduzieren [13]. Die Versuche haben eindeutig belegt, dass für Insassen im Fahrzeug mit verbesserter Sicherheitsausstattung die Werte der Insassenkriterien deutlich unter den Grenzwerten des Frontalanpralls im Euro NCAP [3] oder der FMVSS 208 [4] liegen. Daher wäre es sinnvoll, zumindest ergänzend zu ASI und THIV, auch entsprechende Kennwerte zur Bewertung der

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Folgende Hersteller wurden in der Studie vom [76] berücksichtigt: Audi, BMW, Citroën, Dacia, Fiat, Ford, Hyundai, Kia, Mercedes-Benz, Nissan, Opel, Peugeot, Renault, Seat, Škoda, Suzuki, Toyota, Vauxhall, Volvo, VW, Mini, Chevrolet





 Bundesministerlum Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Zusammenfassung und Fazit

Insassensicherheit aufzunehmen. Die Bewertung von Fahrzeugrückhaltesystemen, welche ausschließlich auf Grundlage des ASI beruht, wird auch von Sturt und Fell [13] als kritisch hinterfragt.

Gemäß der Unfallanalyse, bei einem Pkw Anprall an ein Fahrzeugrückhaltesystem, betreffen die wesentlichen Körperregionen der Kopf, der Brustkorb und die Extremitäten. Mit zunehmender Verletzungsschwere sind mit Abstand der Kopf und der Brustkorb am häufigsten betroffen. Die Extremitäten verlieren hierbei zunehmend an (Verletzungs-)Bedeutung. Demzufolge wäre bei Versuchen nach EN 1317 eine Ergänzung zu ASI und THIV durch Aufzeichnung der Kopfbeschleunigung zur Berechnung des HIC und der a3ms Kopfbeschleunigung als Insassenkennwerte sinnvoll. Von Chell et al. [12] wird ebenso eine Instrumentierung des Dummykopfes mit Beschleunigungssensoren und gegebenenfalls Gyrosensoren vorgeschlagen, um Kopfkriterien wie den HIC auswerten zu können.

Obwohl auch der Brustkorb eine eindeutige Relevanz bei den Verletzungen aufweist, ist für das Fahrzeug mit verbesserter Sicherheitsausstattung (z.B. Gurtkraftbegrenzer) eine deutlich niedrigere Brustkorbeindrückung und auch deutlich geringere Schultergurtkräfte festzustellen. Es ist zu erwarten, dass für andere Fahrzeuge mit Gurtkraftbegrenzer Ähnliches gilt. Durch die strengeren Vorgaben beim Frontalanprall im Euro NCAP [3] ab 2023, wird eine zusätzliche Reduktion des Verletzungsrisikos des Brustkorbs erreicht. Eine Datenaufzeichnung von Brustkennwerten muss daher nicht erfolgen.

Des Weiteren sollte nach Chell et al. [12] bei der Bewertung von Fahrzeugrückhaltesystemen auch Nackenverletzungskriterien wie beispielsweise der Nij berücksichtigt werden. Der Vorschlag geht jedoch auf die Analyse von Testdaten und Bewertung des Nij bei einem Anprall an ein H4b System auf einer Brücke zurück. Hierbei wurde ein Verletzungsrisiko des Nackens von 30% festgestellt, beruht allerdings auf der Analyse eines einzelnen Versuchs. In der Unfallanalyse der gegenständlichen Studie konnte keine überproportional höhere Häufigkeit an Nackenverletzungen festgestellt werden.

Verletzungskriterien wie der HIC, Brustkorbkriterien, etc. sind sehr stark vom Insassenrückhaltesystem abhängig [11]. Dennoch wurde auch beim Fahrzeug ohne Airbag und Gurtkraftbegrenzer ein relativ niedriger HIC festgestellt, welcher bei der Teilüberdeckung deutlich höher war als bei der vollen Überdeckung, aber trotzdem nur knapp mehr als 50% des Grenzwertes beim Euro NCAP Frontalanprall entsprach. Beim Fahrzeug mit Airbag und Gurtkraftbegrenzer wurde der Airbag, beim Anprall mit der Teilüberdeckung, erst unmittelbar vor dem Auftreffen des Kopfes auf das Lenkrad ausgelöst. Hierzu zeigen die Beschleunigungssignale deutliche Unterschiede zum Anprall mit voller Überdeckung. Es wäre sinnvoll die Auslösestrategie für Airbags auch auf diesen Lastfall entsprechend anzupassen.





 Bundesministerium Elimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Introvation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Zusammenfassung und Fazit

## 6.2 Fazit

Durch die Absicherung von Gefahrenstellen mit dem untersuchten Anpralldämpfer ALPINA F1-80 werden Insassen relativ gut geschützt, selbst wenn die Anprallbedingungen von jenen im Zertifizierungsversuch abweichen. Jedenfalls wird durch eine derartige Absicherung eine deutliche Reduktion der Werte der Bewertungskriterien ASI, THIV und PHD erreicht, im Vergleich zu einem Anprall an eine ungesicherte, starre Wand. In wie weit die Ergebnisse auf andere Anpralldämpfer übertragbar sind, lässt sich aus den Ergebnissen nicht ableiten.

Aus den Anprallversuchen konnte jedenfalls festgestellt werden, dass Insassenkriterien teilweise recht deutlich unter den Grenzwerten des Euro NCAP liegen, obwohl der ASI und THIV höhere Werte aufweisen, als dies bei einem Zertifizierungstest gemäß der Anprallbedingungen nach EN 1317 der Fall wäre. Selbst für das Fahrzeug, welches üblicherweise bei Versuchen nach der EN 1317 eingesetzt wird, wurden Insassenkriterien festgestellt, die nur bei den Schulterkräften die definierten Grenzwerte überschreiten. Lediglich für die Brustkorbeindrückung, in allen vier Versuchen, und die Oberschenkelkräfte beim Opel Corsa bei voller Überdeckung, konnte ein Überschreiten der strengeren Grenzwerte festgestellt werden. Die sogenannten Capping Limits wurden nicht überschritten, außer beim Opel Corsa und dem teilüberdeckten Anprall. Hierbei würde ein Gurtkraftbegrenzer die Kräfte soweit reduzieren, dass auch für diesen Lastfall ein Überschreiten der Grenzwerte eher unwahrscheinlich ist.

Folgende zusammenfassende Erkenntnisse können abgeleitet werden:

- Bezogen auf die Bewertungskriterien hinsichtlich Insassenschutz geht eindeutig hervor, dass das Fahrzeug mit verbesserter Sicherheitsausstattung (neueres Fahrzeug) besser abschneidet, als das herkömmlich in den EN 1317 Versuchen verwendete Fahrzeug (älteres Fahrzeug).
- Tendenziell weist das Fahrzeug mit höherer Masse niedrigere Fahrzeug- als auch Insassenwerte auf, allerdings war das Fahrzeug mit höherer Masse auch mit der verbesserten Sicherheitsausstattung ausgestattet, sodass kein eindeutiger Zusammenhang hergestellt werden kann.
- Bei der Teilüberdeckung schneiden beide Fahrzeuge deutlich schlechter ab, als bei einer vollen Überdeckung, dennoch bleibt der Großteil der Bewertungskriterien unter den strengeren Grenzwerten des Euro NCAP bzw. der FMVSS 208.
- Der ASI und THIV sind teilweise deutlich höher als im Zertifizierungstest, insbesondere bei der Teilüberdeckung. Da die Anprallgeschwindigkeit mit 100 km/h (1,56-fach höherer Energieeintrag) jedoch bewusst höher gewählt wurde und daher vom Zertifizierungstest für den Anpralldämpfer ALPINA F1-80 abweicht, ist nachvollziehbar, dass ASI und THIV über den Werten des Zertifizierungstests liegen.





TU Graz I COMPARE

Zusammenfassung und Fazit

- Es zeigt sich eine deutliche Verbesserung f
  ür den Insassenschutz durch einen Anpralld
  ämpfer im Vergleich zu einem Anprall gegen eine ungesicherte, starre Wand. Die Absicherung durch eine Absicherungsma
  ßnahme, welche zumindest die hier festgestellte Leistungsf
  ähigkeit erf
  üllt, ist zu empfehlen.
- Die Werte der Insassenkriterien liegen fast durchwegs unter den Grenzwerten des für die Bewertung herangezogenen Euro NCAP Frontanpralls [3] bzw. der FMVSS 208 [4]:
  - Kopf: Der HIC15 und die a3ms Beschleunigung sind in allen vier Versuchen deutlich unter der definierten strengeren Grenze des Euro NCAP Frontalanpralltests.
  - Nacken: Scherkraft, Zugkraft und Extensionsmoment sind deutlich unter der strengeren Grenze im Euro NCAP Frontalanprall. Der maximale Nij ist deutlich unter der Grenze der FMVSS 208.
  - Brustkorb: Die a3ms Brustkorbbeschleunigung ist deutlich unter der Grenze der FMVSS 208 und das Viscous Criterion deutlich unter der strengeren Grenze im Euro NCAP Frontalanprall. Bei der Brustkorbeindrückung wird die strengere Grenze im Euro NCAP Frontalanprall überschritten, doch liegen die Werte unter dem Capping Limit. Das ab 2023 gültige Capping Limit wird vom herkömmlich in EN1317 Tests verwendete Fahrzeug (Opel Corsa) überschritten.
  - Untere Extremitäten Oberschenkelkräfte: Die Grenze für die Oberschenkelkräfte im Euro NCAP Frontalanprall werden, bis auf den Anprall mit dem Opel Corsa und voller Überdeckung, deutlich unterschritten.
  - Schultergurtkraft: Der Gurtkraftbegrenzer hat einen deutlichen Einfluss auf die Schultergurtkräfte. Die im Euro NCAP Frontalanprall festgelegten Grenzen werden deutlich unterschritten. Für den Opel Corsa (keine Gurtkraftbegrenzung) wurde zumindest bei der Teilüberdeckung eine deutliche Überschreitung der Grenzkräfte festgestellt.
- Die Auswertung der Korrelation zwischen Fahrzeugkriterien (ASI, THIV) und Insassenkriterien zeigt teilweise deutliche Zusammenhänge, beruht jedoch auf nur vier Versuchen. Es werden hier nur jene Korrelationen angeben, die ein R von größer als 0,9 aufweisen.
  - ASI mit a3ms Kopfbeschleunigung: R=0,95 bei einem p=0,047
  - ASI mit HIC15: R=0,9 bei einem p=0,099
  - ASI mit a3ms Brustkorbbeschleunigung: R=0,99 bei einem p=0,014
  - Maximale Fahrzeugbeschleunigung mit a3ms Brustkorbbeschleunigung: R=0,91 bei einem p=0,093





 Bundesministerium Klinaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Zusammenfassung und Fazit

Daher werden folgende Punkte vorgeschlagen:

- Der in der EN 1317-3 definierte Anprallversuch mit einem ¼ Versatz des Fahrzeugs entspricht nicht in vollem Umfang den Realunfallbedingungen. Der Anprall an den Anpralldämpfer sollte so definiert sein, dass der als Prüfung 2 festgelegte Versuch eine Teilüberdeckung aufweist, die einem Überdeckungsgrad von 50% entspricht. Des Weiteren wird in der gegenwärtigen Version der EN 1317 nur das leichteste Fahrzeug mit 900 kg getestet.
- Die Evaluierung von Rückhaltesystemen muss das Fahrzeug nicht notwendigerweise dem neuesten Stand der Technik entsprechen, jedoch für den aktuellen Verkehr in Europa gängige Modelle sein. Daher sollten für Evaluierung von Rückhaltesystemen neuere und dem Stand der Technik entsprechende Fahrzeuge eingesetzt werden. Jedenfalls sollte das Fahrzeugalter auf das Durchschnittsalter von 10 Jahren beschränkt werden.
- Wie in anderen Untersuchungen wird als weiteres ergänzendes Bewertungskriterium für die Insassensicherheit der HIC vorgeschlagen. Dieser wird im Euro NCAP sowohl beim Frontal- als auch beim Seitenanprall als Kriterium verwendet. Ebenso kann die a3ms Kopfbeschleunigung aus den Beschleunigungssensoren im Kopf der anthropomorphen Prüfpuppe ermittelt werden und sollte ergänzend berechnet werden.







 Bundesministerium Elimaschutz, Unwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Ausblick

# 7 AUSBLICK

Mit den Versuchen konnte für Insassen in einem Fahrzeug mit verbesserter Sicherheitsausstattung ein deutlich höherer Schutz festgestellt werden, als für Insassen in einem Fahrzeug, welches typischerweise bei den Versuchen eingesetzt wird. Allerdings wurde bei der Teilüberdeckung der Frontairbag nicht optimal ausgelöst und der Dummy wurde kurz vor Auftreffen auf das Lenkrad vom Airbag angeschossen. Die Auswertung der Beschleunigungssignale bei der Teilüberdeckung im Vergleich zur vollen Überdeckung zeigen sehr deutliche Unterschiede im zeitlichen Verlauf. Um die Insassen optimal zu schützen sollte die Auslösestrategie evaluiert werden und an diesen Lastfall angepasst werden.

Der Anprall an ein Fahrzeugrückhaltesystem unter einem Winkel von bis zu 20° stellt eine seitliche Kollision dar. In wie weit hier die Seitenairbags (Curtainairbag, Sitzairbag, etc.) bei einem Anprall auslösen und somit den Insassen optimal schützen, ist nicht bekannt. Bei den Versuchen der EN 1317-2 werden ebenfalls Fahrzeuge eingesetzt, welche nicht den aktuellen Sicherheitsstandards entsprechen und, falls vorhanden, Airbags, Gurtkraftbegrenzer, etc. für den Test deaktiviert. Auch hier wäre es jedenfalls sinnvoll zu evaluieren, ob Fahrzeuge mit verbesserter Sicherheitsausstattung Insassen besser schützen können. Insbesondere, ob in diesen Versuchen der Airbag auch auslöst.





Literaturquellen

# 8 LITERATURQUELLEN

- [1] Comité Européen De Normalisation, "EN 1317-3: Road restraint systems Part 3: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for crash cushions," Rev. Mar. 2011.
- [2] Dudenhöffer, F., "Stetige Verbesserung macht müde: das Auto," Wirtschaftsdienst 97(8):600–602, 2017, doi:<u>10.1007/s10273-017-2183-5</u>.
- [3] Euro NCAP, "Assessment Protocol Adult Occupant Protection," Version 9.1.2, 2020.
- [4] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Department of Transportation, "49 CFR
   571.208 Standard No. 208; Occupant crash protection: 49CFR Part 571.208,"
- [5] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Department of Transportation, "49
   CFR 571.214 Standard No. 214; Side impact protection: 49CFR Part 571.214,"
- [6] Michie, J.D., "Collision risk assessment based on occupant flail-space model," *Transport. Res. Record* 796:1–9, 1981.
- [7] Comité Européen De Normalisation, "EN 1317-1: Road restraint systems Part 1: Terminology and general criteria for test methods," EN 1317, Rev. Jan. 2010.
- [8] Comité Européen De Normalisation, "EN 12767: Passive safety of support structures for road equipment — Requirements and test methods," Rev. Jan. 2008.
- [9] Shojaati, M., "Correlation between injury risk and impact severity index ASI," in: Swiss Transport Research Conference (ed.), 3rd Swiss Transport Research Conference, 3rd Swiss Transport Research Conference, Monte Veritá / Ascona, 19-21 March, 2003.
- [10] Shojaati, M. and Schüler, W., "ASI-Measuringmethode," 2000, doi: 10.3929/ethz-b-000341071.
- [11] Gabauer, D. and Thompson, R., "Correlation of Vehicle and Roadside Crash Test Injury Criteria," in: NHTSA (ed.), *The 19th ESV Conference Proceedings*, ESV Conference Proceedings, International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Washington, D.C., USA, 6.-9.6.2005, National Highway Traffic Safety Administration, 2005.
- [12] Chell, J., Brandani, C.E., Fraschetti, S., Chakraverty, J. et al., "Limitations of the European barrier crash testing regulation relating to occupant safety," *Accident Analysis & Prevention* 133:105239, 2019, doi:<u>10.1016/j.aap.2019.07.015</u>.
- [13] Sturt, R. and Fell, C., "The relationship of injury risk to accident severity in impacts with roadside barriers," *INT J CRASHWORTHINES* 14(2):165–172, 2009, doi:<u>10.1080/13588260802614365</u>.
- [14] Klootwijk, C. and Hoogvelt, R.H., "Sensitivity of car with guardrail impacts with a multibody simulation tool," in: ESAR (ed.), 2nd International Conference on ESAR "Expert Symposium on Accident Research", 2nd International Conference on ESAR, Hanover, Germany, 1.-2.9.2006, ESAR:194– 196, 2006.







Literaturquellen

- [15] Anghileri, M., Luminari, M., and Williams, G., "Analysis of test data from European laboratories," ROBUST Deliverable D.2.1, 2005.
- [16] Loftis, K.L., Price, J., and Gillich, P.J., "Evolution of the Abbreviated Injury Scale: 1990-2015," Traffic Inj Prev 19(sup2):S109-S113, 2018, doi:10.1080/15389588.2018.1512747.
- [17] Association for the Advancement of Automotive Medicine, "Abbreviated Injury Scale 2005 Update 2008," 2008.
- [18] Kunc, R., Omerović, S., Ambrož, M., and Prebil, I., "Comparative study of European tunnel emergency-stop-area-wall protection measures," *Accident Analysis & Prevention* 63:9–21, 2014, doi:<u>10.1016/j.aap.2013.10.020</u>.
- [19] Tomasch, E. and Steffan, H., "ZEDATU Zentrale Datenbank tödlicher Unfälle in Österreich A Central Database of Fatalities in Austria," in: ESAR (ed.), 2nd International Conference on ESAR "Expert Symposium on Accident Research", 2nd International Conference on ESAR, Hanover, Germany, 1.-2.9.2006, ESAR, 2006.
- [20] Tomasch, E., Steffan, H., and Darok, M., "Retrospective accident investigation using information from court," in: TRA (ed.), *Transport Research Arena Europe 2008 (TRA)*, Ljubljana, Slovenia, April 21-24, ISBN 978-92-79-10039-0, 2008.
- [21] Bakker, J., "iGLAD Ein pragmatischer Ansatz für eine internationale Unfalldatenbank," in: VDA Verband der Automobilindustrie e. V. (ed.), 14th VDA Technical Congress, VDA, Sindelfingen, Germany, 2012.
- [22] Bakker, J., Jeppson, H., Hannawald, L., Spitzhüttl, F. et al., "IGLAD International Harmonized In-Depth Accident Data," in: NHTSA (ed.), *The 25th ESV Conference Proceedings*, ESV Conference Proceedings, International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Michigan, USA, 5.-8.6.2017, NHTSA, 2017.
- [23] Comité Européen De Normalisation, "EN 1317-2: Road restraint systems Part 2: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers including vehicle parapets," Rev. Jul. 2011.
- [24] Roque, C. and Cardoso, J.L., "Observations on the relationship between European standards for safety barrier impact severity and the degree of injury sustained," *IATSS Research* 37(1):21–29, 2013, doi:10.1016/j.iatssr.2013.04.002.
- [25] RISER, "Roadside Infrastructure for Safer European Roads," Final Report, EC FP5 Project RISER Final Report, 2006.
- [26] Thomson, R., Naing, C., Hill, J., Klootwijk, C. et al., "Critical Vehcile and Infrastructure Interactions," EC FP5 Project RISER Deliverable D03, 2006.
- [27] Kuppa, S., "Injury Criteria for Side Impact Dummies," 2004.





 Bundesministerium Klinaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Literaturquellen

- [28] Tomasch, E. and Gstrein, G. (eds.), "Analysis of the correlation between ASI and HIC for steel and concrete road restraint systems on different types of basements," Zenodo, 2020.
- [29] Burbridge, A., Naish, D., and Troutbeck, R., "Predicting occupant risk indicators for frontal impacts with redirective crash cushions," in: Australasian Road Safety Conference (ed.), Proceedings of the 2015 Australasian Road Safety Conference, Gold Coast, Australia, October 14-16:1– 10, 2015.
- [30] Gabauer, D.J. and Gabler, H.C., "Comparison of roadside crash injury metrics using event data recorders," *Accident Analysis & Prevention* 40(2):548–558, 2008, doi:10.1016/j.aap.2007.08.011.
- [31] Tomasch, E., Heindl, S., Hinterkircher, A., Gstrein, G. et al., "Beurteilung der Effizienz derzeit eingesetzter Absicherungsmaßnahmen von Tunnelnischen und -portalen beim PKW Anprall," 2019.
- [32] Hoschopf, H. and Tomasch, E., "Single Vehicle Accidents, Incidence and Avoidance," in: ESAR (ed.), 3rd International Conference on ESAR "Expert Symposium on Accident Research", 3rd International Conference ESAR, Hanover, Germany, September 5-6, 2008.
- [33] Burgett, A. and Gunderson, K., "Crash Prevention Boundary for Road Departure Crashes Derivation," 2001.
- [34] Martin, P., Burgett, A., and Srinivasan, G., "Characterization of a Single-Vehicle Road Departure Avoidance Maneuver," in: NHTSA (ed.), *The 18th ESV Conference Proceedings*, ESV Conference Proceedings, International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Nagoya, Japan, 19.-22.5.2003, 2003.
- [35] Tomasch, E., Hoschopf, H., Gobald, M., Nadler, B. et al., "SANFTLEBEN Sicherheitsbeurteilung der Anfangselemente von Leitschienen und Betonleitwänden - Endbericht," Forschungsarbeiten aus dem Verkehrswesen, vol. 203, 2010.
- [36] Tomasch, E., Sinz, W., Hoschopf, H., Gobald, M. et al., "Required length of guardrails before hazards," *Accident Analysis & Prevention* 43(6):2112–2120, 2011, doi:10.1016/j.aap.2011.05.034.
- [37] Tomasch, E., Hoschopf, H., Gobald, M., Steffan, H. et al., "Single vehicle run-off-road accidents colliding turned down terminals of guardrails," in: *International Conference "ESAR Expert Symposium on Accident Research*":n-n, 2010.
- [38] Tomasch, E., Hoschopf, H., Sinz, W., and Strnad, B., "Method to Optimise the Position of Rumble Strips on the Hard Shoulder to Avoid Run-off-road Accidents and Unnecessary Noise Pollution," *Transportation Research Procedia* 14:3849–3858, 2016, doi:10.1016/j.trpro.2016.05.470.
- [39] Tomasch, E., Hoschopf, H., Stefan Ch., and Stütz, R., "Requirements of a safety zone width for run-off-road accidents to prevent severe injuries when impacting hazardous objects," in: ERF (ed.), 1st European Road Infrastructure Congress (ERIC), European Road Infrastructure Congress, Leeds, UK, 18.10.-20.10.2016, 2016.




ASFINAG



TU Graz I COMPARE

Literaturquellen

- [40] Offical Journal of the European Union, "UN Regulation No 94 Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a frontal collision: UN Regulation No 94,"
- [41] Euro NCAP, "MPDB Frontal Impact Testing Protocol," Version 1.1.1, 2019.
- [42] Weaver, G.D. and Marquis, E.L., "Safety aspects of roadside slope combinations," *Transp. Res. Rec.*, 1974.
- [43] Weaver, G.D. and Marquis, E.L., "The Relation of Side Slope Design to Highway Safety (Combinations of Slopes)," NCHRP Project 20-7 (Final Report) RF626C, 1973.
- [44] Weaver, G.D., Marquis, E.L., and Luedecke A.R., "The Relation of Side Slope Design to Highway Safety," Final Report Project RF-626A, 1972.
- [45] Chi, M., "Assessment of Injury Criteria in Roadside Barrier Tests," FHWA-RD-75-74, 1976.
- [46] US Military Specification, "General Specification for Seat System: Upward Ejection, Aircraft," MIL-S-9479A, 1967.
- [47] Hyde, A.S., "Biodynamics and Crashworthiness of Vehicle Structures.," Wyle Laboratories Report WR68-3, Volume III, 1968.
- [48] American Association of State Highway and Transportation Officials, "Manual for Assessing Safety Hardware," Second Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Rev. 2016.
- [49] Ross, H.E., Sicking, D.L., Zimmer, R., and Michie, J.D., "NCHRP Report 350: Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features," NCHRP Report 350, 1993.
- [50] Park, C. and Kan, C.D., "Objective Evaluation Method Of Vehicle Crash Pulse Severity In Frontal New Car Assessment Program (NCAP) Tests," in: NHTSA (ed.), *The 24th ESV Conference Proceedings*, ESV Conference Proceedings, International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Gothenburg, Sweden, 8.-11.6.2015, NHTSA, 2015.
- [51] Burg, H., Hans-Jörg, M., and Zeidler, F., "EES –Ein Hilfsmittel zur Unfallrekonstruktion und dessen Auswirkungen auf die Unfallforschung," in: *Der Verkehrsunfall 1980*:133–138, 1980.
- [52] Kleinberger, M., Sun, E., Eppinger, R., Kuppa, S. et al., "Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems," 1998.
- [53] Lissner H. R., LEBOW, M., and Evans, F.G., "Experimental studies on the relation between acceleration and intracranial pressure changes in man," *Surgery, gynecology & obstetrics* 111:329– 338, 1960.
- [54] Gurdjian, E.S., Lissner H. R., and Patrick, L.M., "Concussion: mechanism and pathology," in: The Stapp Association (ed.), 7th Stapp Car Crash and Field Demonstration Conference, Springfield, IL, 1963.





TU Graz I COMPARE

Literaturquellen

- [55] Gadd, C.W., "Use of a Weighted-Impulse Criterion for Estimating Injury Hazard," in: The Stapp Association (ed.), 10th Stapp Car Crash Conference Proceedings, SAE Technical Paper Series, Stapp Car Crash Conference, Hollomon Air Force Base, NM, 8.11., SAE International, 1966.
- [56] Versace, J., "A Review of the Severity Index," in: The Stapp Association (ed.), 15th Stapp Car Crash Conference Proceedings, SAE Technical Paper Series, Stapp Car Crash Conference, Coronado, CA, 17.11.1971, SAE International, 1971.
- [57] Hodgson, V.R. and Thomas, L.M., "Effect of Long-Duration Impact on Head," SAE Technical Paper Series, SAE Technical Paper Series, 16th Stapp Car Crash Conference (1972), NOV. 08, 1972, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1972.
- [58] Hertz, E., "A note on the head injury criterion (HIC) as a predictor of the risk of skull fracture," 37th Annual Conference: American Association for Automotive Medicine (AAAM), AAAM, American Association for Automotive Medicine Annual Conference, San Antonio, Texas, 1993:303– 312, 1993.
- [59] NHTSA, Prasad, P., and Mertz, H.J., "Injury Risk Curves and Protection Reference Values," https://one.nhtsa.gov/cars/rules/rulings/80g/80gii.html, September 2, 2022.
- [60] Got, C., Patel, A., Fayon, A., Tarrière, C. et al., "Results of Experimental Head Impacts on Cadavers: The Various Data Obtained and Their Relations to Some Measured Physical Parameters," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, 22nd Stapp Car Crash Conference, OCT. 24, 1978, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1978.
- [61] Seiffert, U. and Wech, L., "Automotive safety handbook," SAE-R SAE-R-325, 2003.
- [62] Nyquist, G.W., Begman, P.C., King, A.I., and Mertz, H.J., "Correlation of field injuries and GM hybrid III dummy responses for lap-shoulder belt restraint," J Biomech Eng 102(2):103–109, 1980, doi:<u>10.1115/1.3138204</u>.
- [63] Mertz, H.J. and Patrick, L.M., "Strength and Response of the Human Neck," SAE Technical Paper Series, SAE Technical Paper Series, 15th Stapp Car Crash Conference (1971), NOV. 17, 1971, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1971.
- [64] Prasad, P. and Daniel, R.P., "A Biomechanical Analysis of Head, Neck, and Torso Injuries to Child Surrogates Due to Sudden Torso Acceleration," SAE Technical Paper Series, SAE Technical Paper Series, 28th Stapp Car Crash Conference (1984), NOV. 06, 1984, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1984.
- [65] Mertz, H.J., Driscoll, G.D., Lenox, J.B., Nyqust, G.W. et al., "Responses of Animals Exposed to Deployment of Various Passenger Inflatable Restraint System Concepts for a Variety of Collision Se-





ASFINAG

 Bundesministerium Klinaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

TU Graz I COMPARE

Literaturquellen

verities and Animal Positions.," in: NHTSA (ed.), *Ninth International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles*, ESV Conference Proceedings, Ninth International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Kyoto, Japan, 1-4 November, 1982:352–368, 1982.

- [66] Stapp, J., "Voluntary Human Tolerance Levels," Impact Injury and Crash Protection, 1970.
- [67] Mertz, H.J. and Gadd, C.W., "Thoracic Tolerance to Whole-Body Deceleration," SAE Technical Paper Series, SAE Technical Paper Series, 15th Stapp Car Crash Conference (1971), NOV. 17, 1971, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1971.
- [68] Neathery, R.F., Kroell, C.K., and Mertz, H.J., "Prediction of Thoracic Injury from Dummy Responses," SAE Technical Paper Series, SAE Technical Paper Series, 19th Stapp Car Crash Conference (1975), NOV. 17, 1975, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1975.
- [69] Lau, I.V. and Viano, D.C., "How and When Blunt Injury Occurs Implications to Frontal and Side Impact Protection," SAE Technical Paper Series, SAE Technical Paper Series, 32nd Stapp Car Crash Conference, OCT. 17, 1988, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1988.
- [70] Horsch, J.D. and Schneider, D., "Biofidelity of the Hybrid III Thorax in High-Velocity Frontal Impact," SAE Technical Paper Series, SAE Technical Paper Series, SAE International Congress and Exposition, FEB. 29, 1988, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1988.
- [71] Lau, I.V. and Viano, D.C., "The Viscous Criterion Bases and Applications of an Injury Severity Index for Soft Tissues," SAE Technical Paper Series, SAE Technical Paper Series, 30th Stapp Car Crash Conference (1986), OCT. 27, 1986, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1986.
- [72] Euro NCAP, "Offset Deformable Barrier Frontal Impact Testing Protocol," Version 7.1.3, 2018.
- [73] Augenstein, J., Bahouth, G., Digges, K., Stratton, J. et al., "Characteristics of crashes that increase the risk of serious injuries," 2003.
- [74] Wallis, L.A. and Greaves, I., "Injuries associated with airbag deployment," *Emergency medicine journal : EMJ* 19(6):490–493, 2002, doi:10.1136/emj.19.6.490.
- [75] Kraftfahrt-Bundesamt, "Durchschnittliches Leergewicht von neu zugelassenen Personenkraftwagen in Deutschland in den Jahren 2005 bis 2018," 2019.
- [76] International Council on Clean Transportation Europe, "Europen Vehicle Market Statistics: Pocketbook 2019/20," 2019.









Literaturquellen

[77] Hernández, Z.A., Álvarez, F., Alonso, M., and Sañudo, L., "Analysis of the test criteria for vehicle containment systems in the Standard EN 1317 regarding the number of vehicles in use," *Transportation Research Procedia* 33:315–322, 2018, doi:<u>10.1016/j.trpro.2018.10.108</u>.

# A APPENDIX

Abbildung Anhang A.1-1: Zeitliche Versuchsabfolge Versuch 1 bezogen auf spezifische Ereignisse	A-3
Abbildung Anhang A.1-2: Verlauf ASI Versuch 1	A-4
Abbildung Anhang A.1-3: Fahrzeugbeschleunigung Versuch 1	A-4
Abbildung Anhang A.1-4: Kopfbeschleunigung Versuch 1	A-5
Abbildung Anhang A.1-5: Brustbeschleunigung Versuch 1	A-5
Abbildung Anhang A.1-6: Resultierende Fahrzeug-, Brust- und Kopfbeschleunigung Versuch 1	A-6
Abbildung Anhang A.1-7: Brusteindrückung Versuch 1	A-6
Abbildung Anhang A.1-8: Gurtkräfte Versuch 1	A-7
Abbildung Anhang A.1-9: Oberschenkelkräfte Versuch 1	A-7
Abbildung Anhang A.2-1: Zeitliche Versuchsabfolge Versuch 2 bezogen auf spezifische Ereignisse	A-8
Abbildung Anhang A.2-2: Verlauf ASI Versuch 2	A-9
Abbildung Anhang A.2-3: Fahrzeugbeschleunigung Versuch 2	A-9
Abbildung Anhang A.2-4: Kopfbeschleunigung Versuch 2	A-10
Abbildung Anhang A.2-5: Brustbeschleunigung Versuch 2	A-10
Abbildung Anhang A.2-6: Resultierende Fahrzeug-, Brust- und Kopfbeschleunigung Versuch 2	A-11
Abbildung Anhang A.2-7: Brusteindrückung Versuch 2	A-11
Abbildung Anhang A.2-8: Gurtkräfte Versuch 2	A-12
Abbildung Anhang A.2-9: Oberschenkelkräfte Versuch 2	A-12
Abbildung Anhang A.3-1: Zeitliche Versuchsabfolge Versuch 3 bezogen auf spezifische Ereignisse	A-13
Abbildung Anhang A.3-2: Verlauf ASI Versuch 3	A-14
Abbildung Anhang A.3-3: Fahrzeugbeschleunigung Versuch 3	A-14
Abbildung Anhang A.3-4: Kopfbeschleunigung Versuch 3	A-15
Abbildung Anhang A.3-5: Brustbeschleunigung Versuch 3	A-15
Abbildung Anhang A.3-6: Resultierende Fahrzeug-, Brust- und Kopfbeschleunigung Versuch 3	A-16
Abbildung Anhang A.3-7: Brusteindrückung Versuch 3	A-16
Abbildung Anhang A.3-8: Gurtkräfte Versuch 3	A-17
Abbildung Anhang A.3-9: Oberschenkelkräfte Versuch 3	A-17
Abbildung Anhang A.4-1: Zeitliche Versuchsabfolge Versuch 4 bezogen auf spezifische Ereignisse	A-18
Abbildung Anhang A.4-2: Verlauf ASI Versuch 4	A-19
Abbildung Anhang A.4-3: Fahrzeugbeschleunigung Versuch 4	A-19
Abbildung Anhang A.4-4: Kopfbeschleunigung Versuch 4	A-20
Abbildung Anhang A.4-5: Brustbeschleunigung Versuch 4	A-20
Abbildung Anhang A.4-6: Resultierende Fahrzeug-, Brust- und Kopfbeschleunigung Versuch 4	A-21
Abbildung Anhang A.4-7: Brusteindrückung Versuch 4	A-21
Abbildung Anhang A.4-8: Gurtkräfte Versuch 4	A-22

Oberschenkelkraft

Abbildung Anhang A.4-9: Oberschenkelkräfte Versuch 4	A-22
Abbildung Anhang B.1-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien mit dem HIC15	B-23
Abbildung Anhang B.2-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien mit der a3ms Kopfbeschleur	nigung
	B-24
Abbildung Anhang B.3-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien mit dem Nij	B-25
Abbildung Anhang B.4-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien mit der Nackenscherkraft	B-26
Abbildung Anhang B.5-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien mit der Nackenzugkraft	B-27
Abbildung Anhang B.6-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien mit dem Nackenmon	nent -
Extension	B-28
Abbildung Anhang B.7-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien mit der	a3ms
Brustkorbbeschleunigung	B-29
Abbildung Anhang B.8-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien mit der Brustkorbeindrücku	ing B-
30	
Abbildung Anhang B.9-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien mit dem Viskosekriterium	B-31
Abbildung Anhang B.10-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien mit der maxi	malen

B-32

# A.1 Versuch 1



Abbildung Anhang A.1-1: Zeitliche Versuchsabfolge Versuch 1 bezogen auf spezifische Ereignisse





Abbildung Anhang A.1-2: Verlauf ASI Versuch 1



Abbildung Anhang A.1-3: Fahrzeugbeschleunigung Versuch 1





Abbildung Anhang A.1-4: Kopfbeschleunigung Versuch 1



Abbildung Anhang A.1-5: Brustbeschleunigung Versuch 1

TU Graz I COMPARE









Abbildung Anhang A.1-7: Brustkorbeindrückung Versuch 1





Abbildung Anhang A.1-8: Gurtkräfte Versuch 1



Abbildung Anhang A.1-9: Oberschenkelkräfte Versuch 1

# A.2 Versuch 2



Abbildung Anhang A.2-1: Zeitliche Versuchsabfolge Versuch 2 bezogen auf spezifische Ereignisse



Abbildung Anhang A.2-2: Verlauf ASI Versuch 2



Abbildung Anhang A.2-3: Fahrzeugbeschleunigung Versuch 2





Abbildung Anhang A.2-4: Kopfbeschleunigung Versuch 2



Abbildung Anhang A.2-5: Brustbeschleunigung Versuch 2









Abbildung Anhang A.2-7: Brustkorbeindrückung Versuch 2





Abbildung Anhang A.2-8: Gurtkräfte Versuch 2



Abbildung Anhang A.2-9: Oberschenkelkräfte Versuch 2

# A.3 Versuch 3



Abbildung Anhang A.3-1: Zeitliche Versuchsabfolge Versuch 3 bezogen auf spezifische Ereignisse



Abbildung Anhang A.3-2: Verlauf ASI Versuch 3



Abbildung Anhang A.3-3: Fahrzeugbeschleunigung Versuch 3





Abbildung Anhang A.3-4: Kopfbeschleunigung Versuch 3



Abbildung Anhang A.3-5: Brustbeschleunigung Versuch 3





Abbildung Anhang A.3-6: Resultierende Fahrzeug-, Brust- und Kopfbeschleunigung Versuch 3



Abbildung Anhang A.3-7: Brustkorbeindrückung Versuch 3





Abbildung Anhang A.3-8: Gurtkräfte Versuch 3



Abbildung Anhang A.3-9: Oberschenkelkräfte Versuch 3

### A.4 Versuch 4



Abbildung Anhang A.4-1: Zeitliche Versuchsabfolge Versuch 4 bezogen auf spezifische Ereignisse



Abbildung Anhang A.4-2: Verlauf ASI Versuch 4



Abbildung Anhang A.4-3: Fahrzeugbeschleunigung Versuch 4





Abbildung Anhang A.4-4: Kopfbeschleunigung Versuch 4



Abbildung Anhang A.4-5: Brustbeschleunigung Versuch 4





Abbildung Anhang A.4-6: Resultierende Fahrzeug-, Brust- und Kopfbeschleunigung Versuch 4



Abbildung Anhang A.4-7: Brustkorbeindrückung Versuch 4





Abbildung Anhang A.4-8: Gurtkräfte Versuch 4



Abbildung Anhang A.4-9: Oberschenkelkräfte Versuch 4

# **B** APPENDIX



## B.1 HIC15 vs. Fahrzeugkriterien

Abbildung Anhang B.1-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien mit dem HIC15



#### B.2 a3ms Kopfbeschleunigung vs. Fahrzeugkriterien

Abbildung Anhang B.2-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien

mit der a3ms Kopfbeschleunigung



#### B.3 Nij vs. Fahrzeugkriterien

Abbildung Anhang B.3-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien mit dem Nij



# B.4 Nackenscherkraft vs. Fahrzeugkriterien

Abbildung Anhang B.4-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien mit der Nackenscherkraft



#### B.5 Nackenzugkraft vs. Fahrzeugkriterien

Abbildung Anhang B.5-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien mit der Nackenzugkraft



#### B.6 Nackenmoment Extension vs. Fahrzeugkriterien

Abbildung Anhang B.6-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien

mit dem Nackenmoment - Extension



#### B.7 a3ms Brustkorbbeschleunigung vs. Fahrzeugkriterien

Abbildung Anhang B.7-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien

mit der a3ms Brustkorbbeschleunigung



#### B.8 Brustkorbeindrückung vs. Fahrzeugkriterien

Abbildung Anhang B.8-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien

mit der Brustkorbeindrückung



#### **B.9** Viscous Criterion vs. Fahrzeugkriterien

Abbildung Anhang B.9-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien mit dem Viskosekriterium



### B.10 Oberschenkelkraft vs. Fahrzeugkriterien

Abbildung Anhang B.10-1: Korrelation der unterschiedlichen Fahrzeugkriterien

mit der maximalen Oberschenkelkraft
## **C** APPENDIX

## C.1 Korrelation R und Signifikanz zwischen den einzelnen Insassenkriterien und der Fahrzeugbeschleunigung aXms

Korrelation R und Signifikanz zwischen den einzelnen Insassenkriterien und der Fahrzeugbeschleunigung aXms

		a3ms	a5ms	a10ms	a15ms	a20ms	a25ms	a30ms
Kopf	HIC36	0,34	0,29	0,32	0,37	0,42	0,44	0,45
		(p=0,664)	(p=0,711)	(p=0,681)	(p=0,633)	(p=0,578)	(p=0,558)	(p=0,547)
		0,79	0,77	0,8	0,84	0,86	0,84	0,31
	HICIS	(p=0,21)	(p=0,229)	(p=0,195)	(p=0,163)	(p=0,136)	(p=0,16)	(p=0,689)
	Kopf a3ms	0,79	0,85	0,89	0,91	0,93	0,87	0,15
		(p=0,21)	(p=0,153)	(p=0,112)	(p=0,085)	(p=0,075)	(p=0,128)	(p=0,853)
Nacken	Shear	0,12	0,07	0,11	0,16	0,22	0,23	0,38
		(p=0,879)	(p=0,927)	(p=0,892)	(p=0,839)	(p=0,783)	(p=0,767)	(p=0,624)
	Tension	-0,32	-0,34	-0,27	-0,21	-0,18	-0,23	-0,08
		(p=0,685)	(p=0,659)	(p=0,726)	(p=0,785)	(p=0,822)	(p=0,774)	(p=0,918)
	Extension	-0,04	-0,07	-0,18	-0,23	-0,21	-0,04	0,66
		(p=0,96)	(p=0,927)	(p=0,821)	(p=0,775)	(p=0,792)	(p=0,964)	(p=0,338)
		0,65	0,23	0,32	0,37	0,39	0,27	-0,26
	INIJ IIIAX	(p=0,355)	(p=0,774)	(p=0,683)	(p=0,627)	(p=0,614)	(p=0,73)	(p=0,74)
Brust- korb	Chest a3ms	0,92	0,91	0,94	0,96	0,97	0,93	0,19
		(p=0,085)	(p=0,085)	(p=0,055)	(p=0,037)	(p=0,03)	(p=0,073)	(p=0,814)
	Chest compression	0,22	0,27	0,37	0,39	0,35	0,17	-0,77
		(p=0,782)	(p=0,728)	(p=0,632)	(p=0,607)	(p=0,648)	(p=0,834)	(p=0,228)
	Viscous Criterion	0,85	0,82	0,76	0,74	0,76	0,87	0,76
		(p=0,149)	(p=0,179)	(p=0,241)	(p=0,262)	(p=0,238)	(p=0,131)	(p=0,238)
Ober-	Oberschenkelkraft	0,76	0,76	0,72	0,68	0,63	-0,14	-0,66
schenkel		(p=0,235)	(p=0,244)	(p=0,278)	(p=0,322)	(p=0,368)	(p=0,856)	(p=0,341)
Schulter	Schultergurtkraft	0,59	0,85	0,7	0,73	0,71	0,57	-0,36
		(p=0,412)	(p=0,148)	(p=0,303)	(p=0,271)	(p=0,287)	(p=0,426)	(p=0,635)

(grün: Signifikanzniveau 5%, orange: Signifikanzniveau 10%)