

# DIPLOMARBEIT

## Tiefenanalyse von Straßenverkehrsunfällen mit ortsfesten Hindernissen

von  
Bernd Schübel

Zum Erlangen des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs

Studienrichtung  
Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau – Mechatronik

Technische Universität Graz – Fakultät für Maschinenbau  
Institut für Fahrzeugsicherheit

Institutsvorstand:  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Steffan

Betreuer:  
Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Tomasch

Graz, März 2013

---

## KURZFASSUNG/ABSTRACT

In einem Betrachtungszeitraum von 2002 bis 2011 verunglückten auf Autobahnen und Schnellstraßen insgesamt 974 Personen tödlich. Obwohl in diesem Zeitraum die Anzahl der tödlich Verunglückten beinahe halbiert werden konnte, sollte eine weitere Reduktion als ambitioniertes Ziel verfolgt werden. Diese Arbeit befasst sich in Anlehnung an das Verkehrssicherheitsprogramm 2020 des Kuratoriums für Verkehrssicherheit mit Verkehrsunfällen am hochrangigen Straßennetz (Autobahnen und Schnellstraßen). Dabei sollen Kollisionen mit ortsfesten Objekten in Folge eines Abkommens von der Fahrbahn näher untersucht und der Fragestellung nachgegangen werden um welche Objekte es sich handelt und in wie weit eine Gefährdung für Fahrzeuginsassen besteht. Mit Hilfe eines Simulationsmodells auf Basis von Realversuchen wurden ausgewählte Anprallobjekte hinsichtlich einer möglichen Verletzungsschwere bewertet und mögliche Maßnahmen zur Minderung des Verletzungsrisikos erarbeitet.

Between 2002 and 2011 a total of 974 people have been killed on austrian motorways. Although the number of fatalities could be reduced about 50%, a further reduction should be the ambitious main target. In this thesis traffic accidents on motorways were investigated in accordance to the Austrian Road Safety Program 2020 of the Ministry for Transportation and Technology. One of the targets in this program should be to identify objects on the roadside and to investigate how far is the risk of an injury as a result of running off the road and impact to a fixed object. With a simulation model on basis of real world tests, selected objects are evaluated to predict a possible injury. Furthermore possible measures are presented which could reduce the injury risk.

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am.....

.....

(Unterschrift)

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

## DANKSAGUNG

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen Personen bedanken, die mich bei der Durchführung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Besonders möchte ich mich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr. tech. Ernst Tomasch für seine Unterstützung während meiner Diplomarbeit bedanken. Weiters danke ich Heinz Hoschopf, der zur Lösung des einen oder anderen Problems beigetragen hat.

Mein größter Dank gebührt meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht haben und mir stets zur Seite standen.

Bernd Schübel, Graz 2013

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>KURZFASSUNG/ABSTRACT .....</b>	<b>I</b>
<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG .....</b>	<b>II</b>
<b>DANKSAGUNG .....</b>	<b>III</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>IV</b>
<b>1. EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2. STRAßENVERKEHRSUNFÄLLE IN ÖSTERREICH .....</b>	<b>3</b>
2.1 UNFÄLLE AUF AUTOBAHNEN UND SCHNELLSTRASSEN .....	4
2.1.1 <i>Einteilung von Verkehrsunfällen nach Typen .....</i>	<i>5</i>
2.1.2 <i>Risiko und Frequenz tödlicher Verkehrsunfälle .....</i>	<i>7</i>
2.2 DEFINITION VON ORTSFESTEN HINDERNISSEN .....	9
2.2.1 <i>Hindernisse auf internationalen Straßen .....</i>	<i>10</i>
2.2.2 <i>Hindernisse auf österreichischen Straßen .....</i>	<i>14</i>
<b>3. TIEFENANALYSE VON REALUNFÄLLEN .....</b>	<b>15</b>
<b>4. NORMEN, RICHTLINIEN UND BEWERTUNGSMÖGLICHKEITEN .....</b>	<b>26</b>
4.1 FAHRZEUGSEITIGE NORMEN UND RICHTLINIEN .....	26
4.1.1 <i>Frontalkollisionen .....</i>	<i>27</i>
4.1.2 <i>Seitliche Kollisionen .....</i>	<i>30</i>
4.2 INFRASTRUKTURSEITIGE NORMEN UND RICHTLINIEN .....	32
4.2.1 <i>Fahrzeugrückhaltesysteme.....</i>	<i>32</i>
4.2.2 <i>Tragkonstruktionen für die Straßenausstattung nach DIN EN 12767[11].....</i>	<i>36</i>
4.3 BELASTUNGEN AUF DEN MENSCHLICHEN KÖRPER .....	39
4.3.1 <i>Verletzungskriterien und Grenzwerte .....</i>	<i>40</i>
4.3.2 <i>Bewertungsmöglichkeiten von Verletzungen.....</i>	<i>40</i>
4.3.3 <i>Analysekriterien und Zusammenhänge mit Verletzungsschweren .....</i>	<i>42</i>
<b>5. VORGEHENSWEISE EINER REALUNFALLREKONSTRUKTION .....</b>	<b>47</b>
5.1 GRUNDLAGEN ZUR SIMULATION MITTELS PC CRASH .....	47
5.2 REKONSTRUKTION EINES REALUNFALLS.....	51

---

<b>6.</b>	<b>METHODIK .....</b>	<b>56</b>
6.1	FAHRZEUGBEWEGUNGEN .....	56
6.2	INSASSENMODELL .....	58
6.3	GENERIERUNG VON UNFALLSZENARIEN .....	60
<b>7.</b>	<b>VALIDIERUNG DES SIMULATIONSMODELLS .....</b>	<b>61</b>
<b>8.</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>63</b>
8.1	VERLETZUNGSRISIKO UND KOLLISIONSGESCHWINDIGKEIT .....	63
8.2	ABSTAND DER OBJEKTE ZUM FAHRBAHNRAND .....	65
8.3	REDUKTION DER VERLETZUNGSSCHWERE DURCH FAHRZEUGRÜCKHALTESYSTEME.....	68
<b>9.</b>	<b>EINSCHRÄNKUNGEN .....</b>	<b>70</b>
<b>10.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>71</b>
<b>11.</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK .....</b>	<b>73</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>75</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>77</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>78</b>
	<b>ANHANG A .....</b>	<b>80</b>
	<b>ANHANG B.....</b>	<b>83</b>
	<b>ANHANG C.....</b>	<b>86</b>

## 1. EINLEITUNG

Mehr als 7.000 Verkehrstote mussten in den letzten 10 Jahren auf österreichischen Straßen beklagt werden. Insbesondere Verkehrsunfälle mit ortsfesten Hindernissen am hochrangigen Straßennetz zeichnen sich durch eine besonders hohe Verletzungsschwere aus. In den meisten Fällen geht ein Abkommen von der Fahrbahn voraus, welche knapp 40% aller Unfälle auf Autobahnen und Schnellstraßen darstellen und bei denen fast 50% der Toten zu beklagen sind [18, 2008]. Daher hat sich die heimische Verkehrspolitik in ihrem Verkehrssicherheitsprogramm 2011 – 2020 zum Ziel gesetzt, die Anzahl der Getöteten auf österreichischen Straßen um 50% und die Zahl der Schwerverletzten um zumindest 40% zu reduzieren. Dabei sollen auch Unfälle mit ortsfesten Hindernissen am hochrangigen Straßennetz analysiert und Maßnahmen zur Reduktion der Verletzungsschwere erarbeitet werden [6, 2013].

Im Rahmen dieser Arbeit soll durch eine detaillierte Analyse von Realunfällen auf Autobahnen und Schnellstraßen gezeigt werden, um welche Anprallobjekte es sich dabei handelt, und durch Variation relevanter Unfallparameter (Abkommenswinkel, Anprallgeschwindigkeit, seitlicher Abstand, Anprallsituation, etc.) Kriterien für die Bewertung der Gefährlichkeit bzw. der möglichen Verletzungsschwere erarbeitet werden.

Ausgehend von den Daten der Statistik Austria der letzten 10 Jahre und den Daten der ZEDATU (Zentrale Datenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen) [23] soll das Problemfeld immer weiter eingegrenzt werden um die Relevanz von Unfällen mit ortsfesten Hindernissen aufzuzeigen. Es soll vor allem gezeigt werden, um welche Anprallobjekte es sich handelt und welche als ortsfeste Hindernisse angesehen werden können.

Für das weitere Vorgehen ist eine detaillierte Analyse der Unfallsituation notwendig. Die durchgeführte Tiefenanalyse soll Einflussfaktoren und wichtige Parameter zur jeweiligen Unfallsituation aufzeigen.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Thematik des Insassenschutzes. Dabei wird auf unabhängige Verbraucherschutztests sowie auf aktuelle gesetzliche Bestimmungen und Normen in den Bereichen Crashtests, Fahrzeugrückhaltesysteme und Tragkonstruktionen

der Straßenausstattung eingegangen. Auch Belastungen, die der menschliche Körper bei einem Verkehrsunfall erfährt sollen hier aufgezeigt werden. Insbesondere wird dabei auf die Verletzungskriterien und deren Grenzwerte eingegangen, da diese ein wichtiges Maß zur Beurteilung für die Schwere von Belastungen und dem möglichen Verletzungsrisiko sind.

Nachfolgend soll anhand eines Rekonstruktionsbeispiels von einem Realunfall gezeigt werden, welche für eine Unfallanalyse relevanten Parameter erhoben werden können.

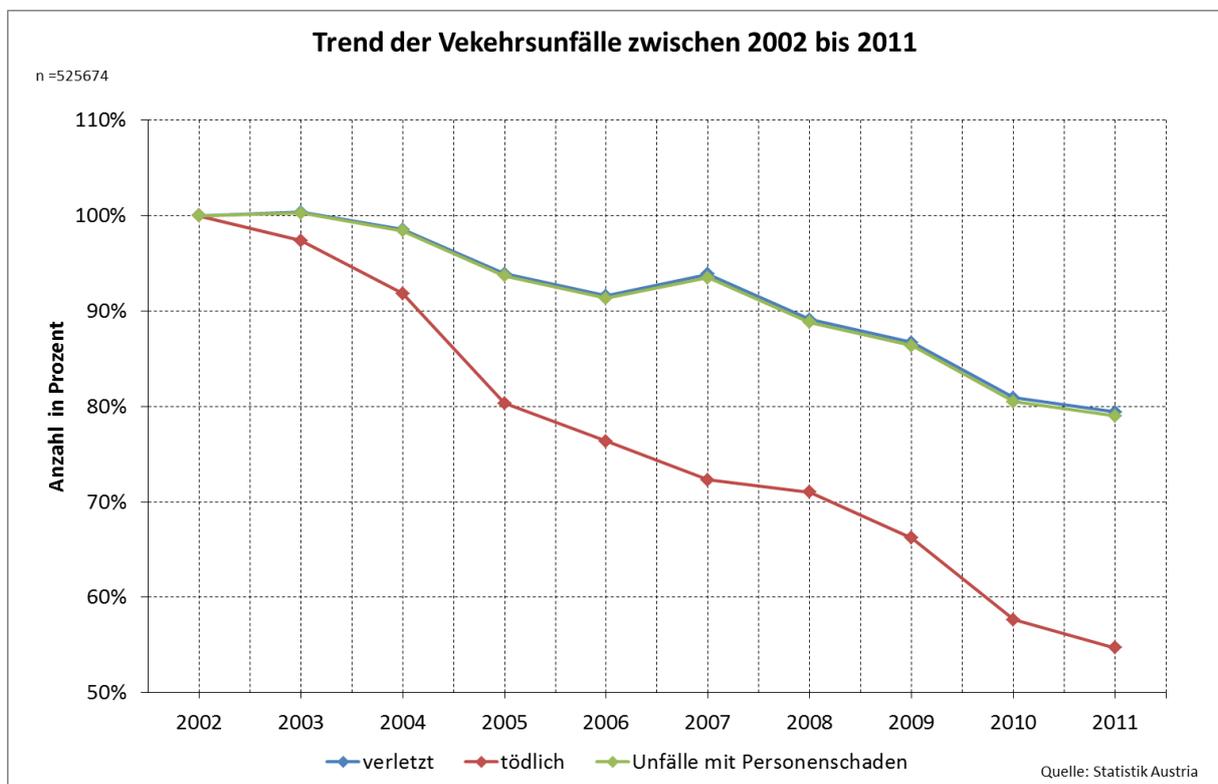
Die notwendigen Schritte zur Erstellung und Validierung eines Simulationsmodells unter Berücksichtigung von zuvor erläuterten Grundlagen werden in Kapitel 7 und 8 detailliert betrachtet.

Im Anschluss werden die aus der Simulation gewonnen Ergebnisse näher dargestellt und ausgewählte Maßnahmen für eine Reduzierung des Verletzungsrisikos durch Veränderungen relevanter Unfallparameter behandelt.

Die letzten Kapitel beschäftigen sich zum einem mit den Einschränkungen des Simulationsmodells und zum anderen soll in einem Ausblick auf die noch zu behandelnde Punkte, die nicht Teil dieser Arbeit waren, eingegangen werden. Dennoch sind diese aber dem Themengebiet zuzuordnen und für die Reduktion der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen mit Hindernissen von größter Bedeutung.

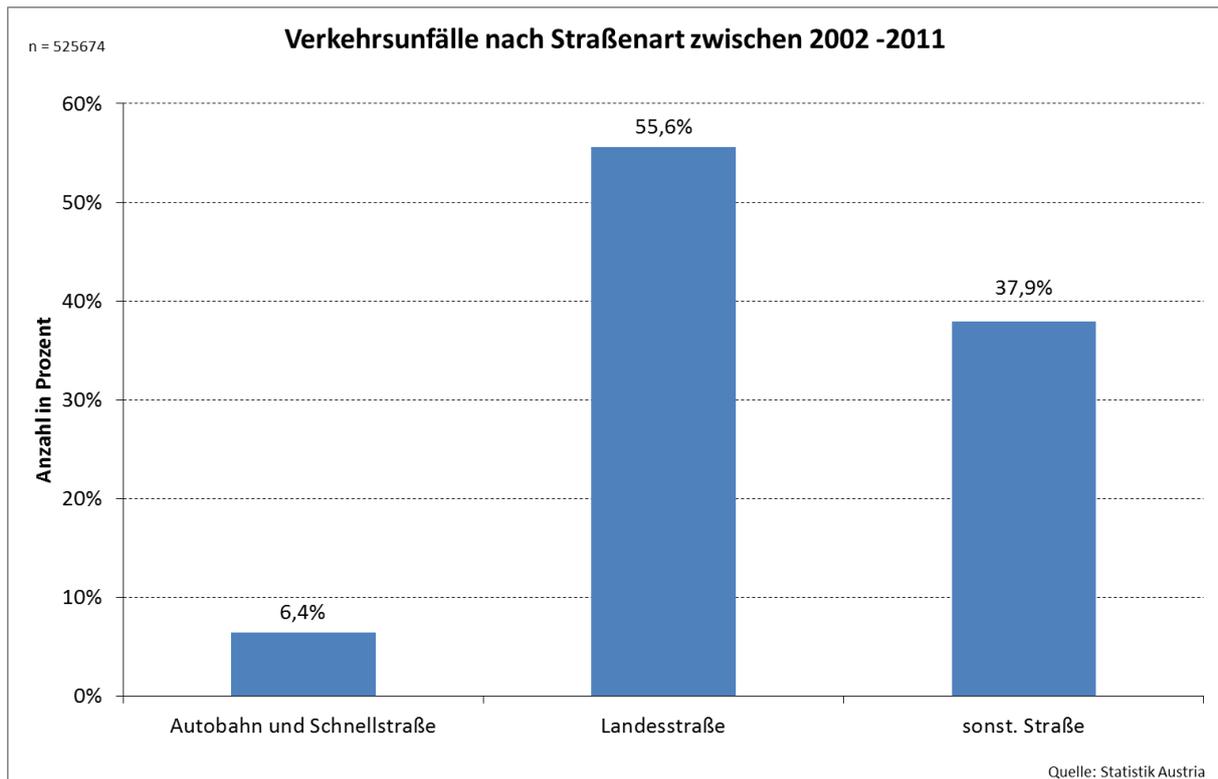
## 2. STRAßENVERKEHRSUNFÄLLE IN ÖSTERREICH

Betrachtet man das Verkehrsunfallgeschehen der letzten zehn Jahre, so ist ein positiver Trend der Unfallzahlen ersichtlich. Im Zeitraum von 2002 und 2011 zeigt sich ein Rückgang der Verkehrsunfälle und Verletzten von rund einem Fünftel (-19% bzw. -21%). Die Zahl der Verkehrstoten konnte beinahe halbiert (-45%) werden (Abbildung 1) [22]. Die ambitionierten Ziele des VSP 2010 (Verkehrssicherheitsprogramm) konnten somit fast erreicht werden. In diesem wurde als Ziel, die Reduktion von Verkehrstoten um mindestens 50% bis 2010, auf Basis der Unfalldaten von 2000-2002 definiert [19, 2004]. Der positive Trend konnte auch 2011 fortgesetzt werden, doch waren nach wie vor 523 Todesopfer im österreichischen Straßenverkehr zu beklagen.



**Abbildung 1: Verkehrsunfälle zwischen 2002-2011**

Eine Aufteilung dieser Unfälle zeigt, dass sich der größte Teil mit 55,6% auf Landstraßen ereigneten, gefolgt von 37,9% auf sonstigen Straßen. 6,4% sind dabei dem hochrangigen Straßennetz (Autobahnen und Schnellstraßen) zu zuordnen (Abbildung 2).

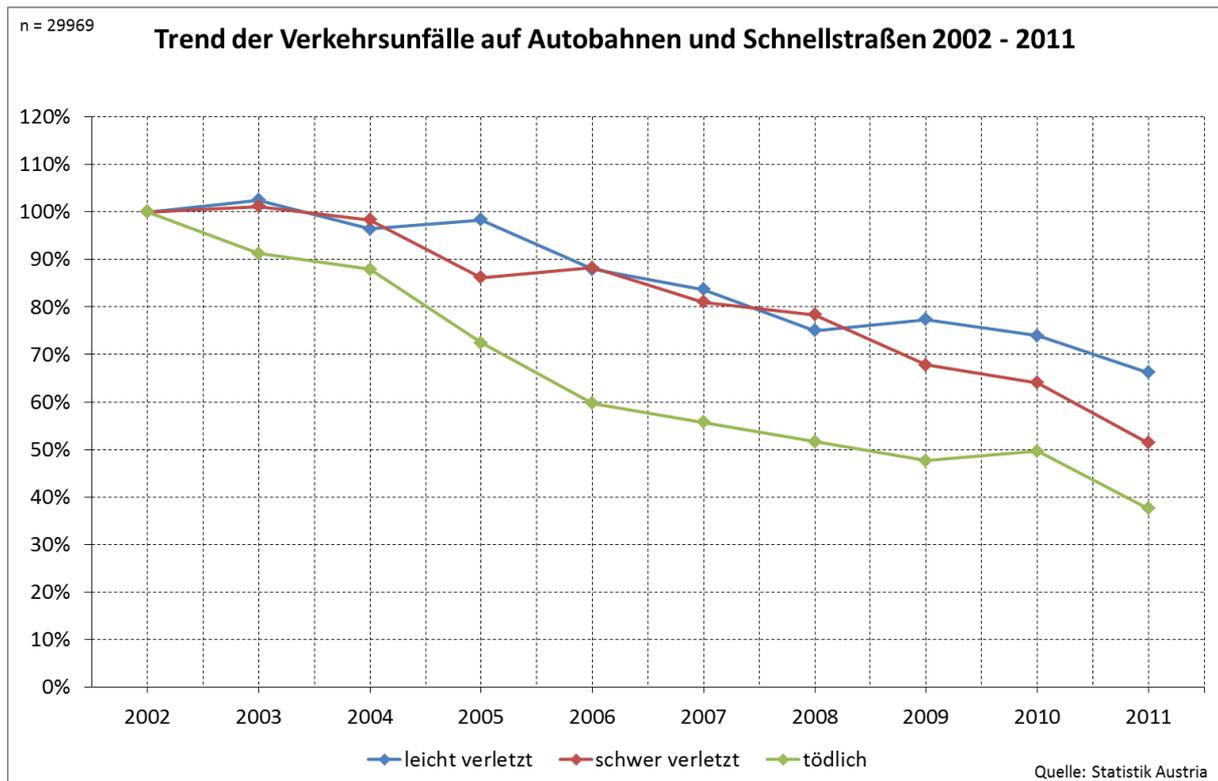


**Abbildung 2: Verkehrsunfälle nach Straßenart von 2002 bis 2011**

Da sich diese Arbeit mit der Analyse des Unfallgeschehens am hochrangigen Straßennetz beschäftigt, werden in weiterer Folge auch nur Unfälle auf Autobahnen und Schnellstraßen näher betrachtet.

## 2.1 Unfälle auf Autobahnen und Schnellstraßen

Am hochrangigen Straßennetz (Autobahnen und Schnellstraßen) mussten in diesem Betrachtungszeitraum 974 tödliche Verunglückte beklagt werden. Die Zahl der Verkehrstoten konnte jedoch von 149 im Jahr 2002 auf 56 reduziert werden. Das ergibt ein Minus von 37,58%. Auch bei der Zahl der Leicht- und Schwerverletzten ist ein enormer Rückgang zu bemerken. Die Zahl der Schwerverletzten reduzierte sich um 51%, die der Leichtverletzten sogar um 66,1%. Das bedeutet einer Gesamtreduzierung von Unfällen mit Personenschaden von 61,1% (Abbildung 3) im Vergleich mit 2002.



**Abbildung 3: Trend der Verkehrsunfälle von 2002 bis 2011**

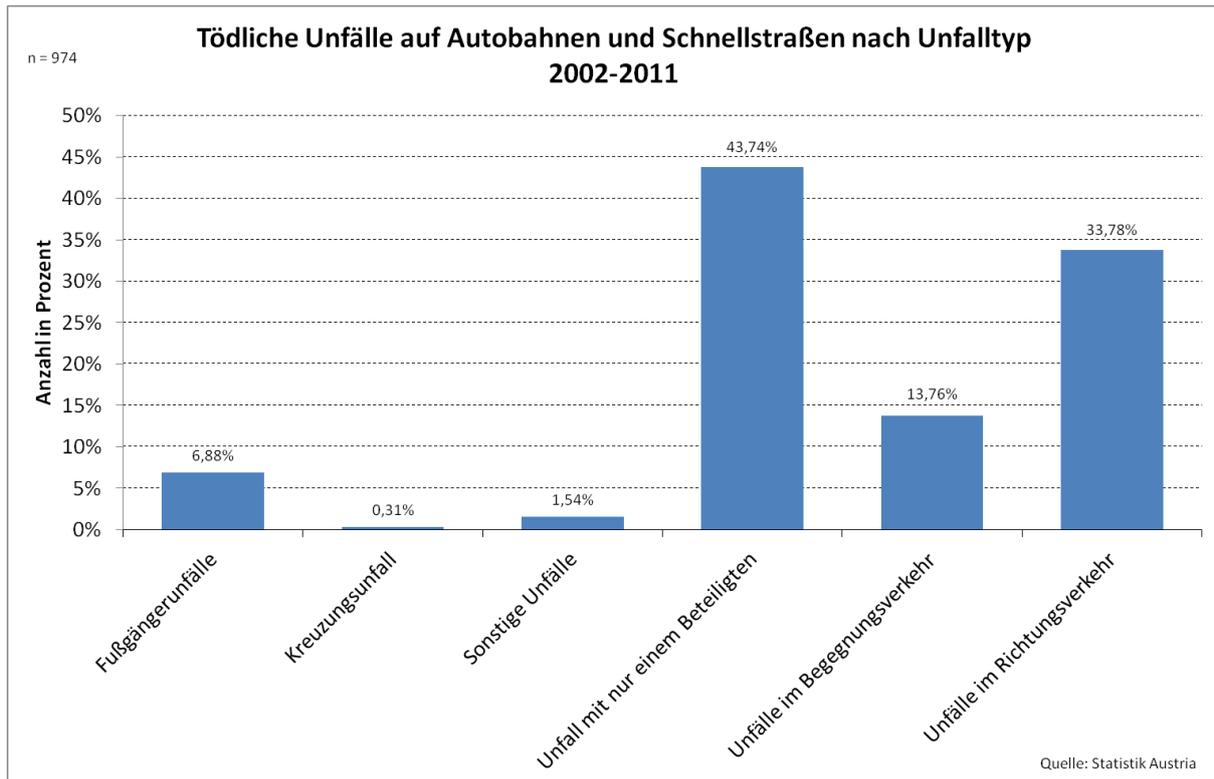
### 2.1.1 Einteilung von Verkehrsunfällen nach Typen

Eine Aufschlüsselung der tödlichen Verkehrsunfälle nach Unfalltypen liefert für die weitere Untersuchung eine detailliertere Betrachtung. In der österreichischen Statistik werden zehn Unfallhauptgruppen unterschieden, die wiederum in Untergruppen unterteilt sind. Daraus ergeben sich insgesamt 105 mögliche Unfalltypen. Einen Überblick über diese Hauptgruppen soll Tabelle 1 geben.

**Tabelle 1: Unfalltypen nach Hauptgruppen [22]**

Obergruppe	Beschreibung
0	Unfälle mit nur einem Beteiligten
1	Unfälle im Richtungsverkehr
2	Unfälle im Begegnungsverkehr
3	Unfälle beim Abbiegen oder Umkehren - richtungsgleich
4	Unfälle beim Abbiegen oder Umkehren - entgegengesetzt
5	Rechtwinkelige Kollisionen auf Kreuzungen beim Queren
6	Rechtwinkelige Kollisionen auf Kreuzungen beim Einbiegen
7	Unfälle mit haltenden oder parkenden Fahrzeugen
8	Fussgängerunfälle
9	sonstige Unfälle mit zwei oder mehr Beteiligten

Unterteilt man die Verkehrsunfälle nach diesen Hauptgruppen, so ist zu erkennen, dass es sich bei rund 44% der Unfälle mit tödlichem Ausgang um Unfälle mit nur einem Beteiligten handelt (Abbildung 4). 33,78% der Unfälle ereigneten sich dabei im Richtungsverkehr. Die 13,76% der Begegnungsverkehrsunfälle sind dabei vermutlich größtenteils auf Baustellenbereiche, Leitschienendurchbrüche und Strecken, bei denen keine bauliche Trennung der Fahrbahnen vorhanden ist (z.B. Tunnelstrecken), zuzuordnen. Der 6,88% geringe Anteil der Unfälle mit Fußgänger ist im Wesentlichen auf Pannensituationen, Baustellenbereiche oder Rastplätze zurückzuführen.



**Abbildung 4: Tödliche Verkehrsunfälle nach Art der Beteiligung**

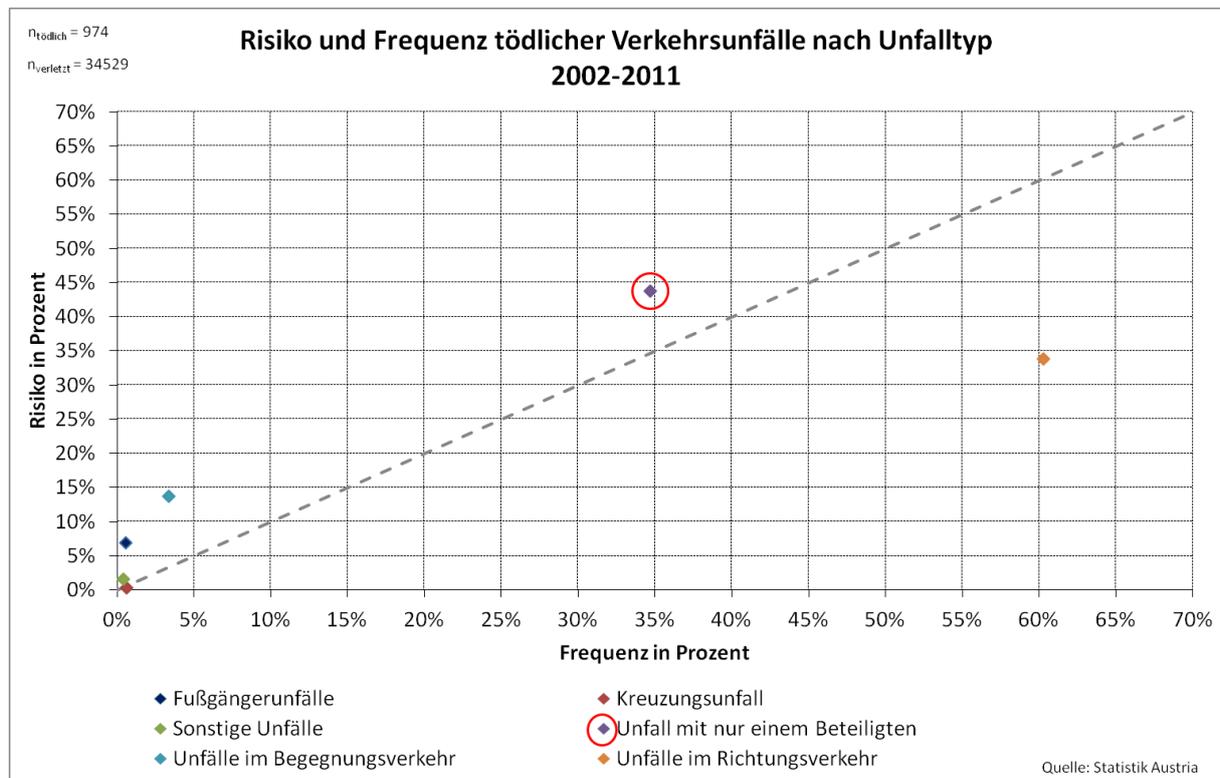
### 2.1.2 Risiko und Frequenz tödlicher Verkehrsunfälle

Eine Betrachtung des Risikos tödlich zu verunglücken der unterschiedlichen Hauptgruppen verdeutlicht, dass Unfälle mit nur einem Beteiligten detaillierter zu untersuchen sind. In Abbildung 5 ist ersichtlich, dass bei Alleinunfällen ein überhöhtes Risiko für einen tödlichen Ausgang besteht. Als Risiko versteht man dabei den Anteil der tödlichen Alleinunfälle an der Gesamtanzahl aller tödlichen Unfälle. Die Frequenz stellt dabei den Zusammenhang zwischen dem Anteil der Verletzten bezogen auf die Anzahl der einzelnen Hauptgruppe dar. Das relative Risiko kann somit als Verhältnis von Risiko zu Frequenz berechnet werden.

**Tabelle 2: Risiko und Frequenz**

	Anzahl verletzt	Anzahl tödlich
Unfälle mit nur einem Beteiligten	11980	426
Gesamt	34529	974
Anteile an Gesamtanzahl	0,34695 Frequenz	0,4373 Risiko

Für die Kategorie der Alleinunfälle ergibt sich somit auf Autobahnen und Schnellstraßen ein relatives Risiko von 1,26. Die abgebildete Gerade stellt dabei ein relatives Risiko von 1 dar und trennt damit die Bereiche von unkritisch (unterhalb der Geraden) und kritisch (oberhalb der Geraden) ab.



**Abbildung 5: Risiko und Frequenz nach Unfalltypen**

Betrachtet man die Gesamtanzahl der in der Statistik Austria aufgezeichneten Unfälle mit nur einem Beteiligten am hochrangigen Straßennetz, so folgt in 93% der Fälle ein Abkommen von der Fahrbahn. Diese 93% der Abkommensunfälle konnten dabei den in Tabelle 3 aufgelisteten Untergruppen des Unfalltypenkatalogs der Statistik Austria zugeordnet werden.

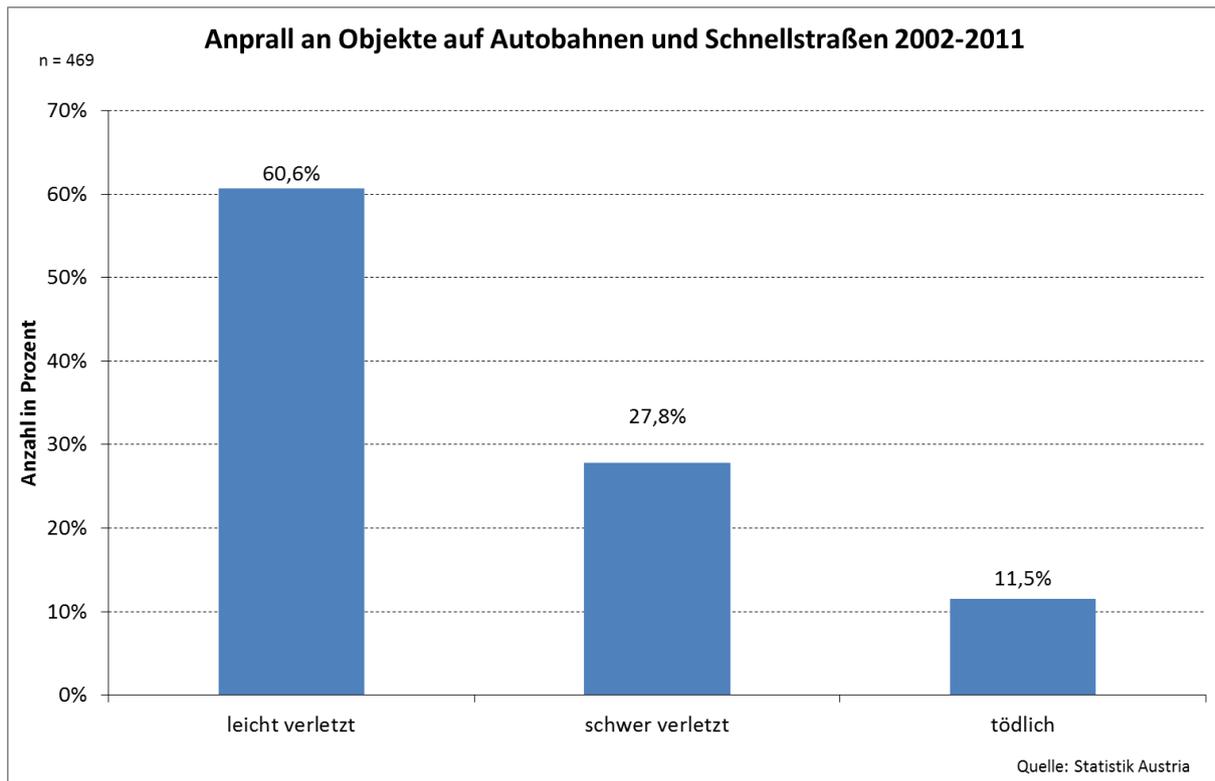
**Tabelle 3: Unfälle mit nur einem Beteiligten [22]**

Obergruppe 0 :Unfälle mit nur einem Beteiligten		
Untergruppe 01 Abkommen rechts		011 auf Geraden
		012 in Rechtskurve
		013 in Linkskurve
Untergruppe 02 Abkommen links		021 auf Geraden
		022 in Rechtskurve
		023 in Linkskurve
Untergruppe 03 Abkommen bei Kreuzung, Fahrbahnverzweigung oder Ausfahrt		031 jede Kreuzung möglich

Folgt nach dem Abkommen ein Anprall an ein Objekt, erhöht sich das relative Risiko um den 3 fachen Wert (3,9) im Vergleich zu den gesamten Alleinunfällen (1,2). Dabei errechnet sich das relative Risiko analog der zuvor beschriebenen Berechnung (Risiko zu Frequenz). Das Risiko beschreibt für diesen Fall den Anteil der tödlichen Alleinunfälle mit einem Anprall an ein Objekt, gemessen an der Gesamtzahl aller tödlichen Unfälle. Die Frequenz entsprechend der Anteile der Verletzten durch einen Anprall an ein Objekt gemessen an der Gesamtzahl der Verletzten.

## 2.2 Definition von ortsfesten Hindernissen

Eine Auswertung der Statistik Austria ergab, dass 11,5% der Unfälle auf Autobahnen und Schnellstraßen tödlich verlaufen, denen ein Anprall an ein Objekt folgte. 27,8% Schwerverletzte und 60,6% Leichtverletzte waren dabei in diesem Betrachtungszeitraum zu beklagen (Abbildung 6).



**Abbildung 6: Unfälle mit Hindernissen auf Autobahnen und Schnellstraßen**

Eine genaue Aufschlüsselung um welche Objekte es sich dabei handelt wird jedoch von der Statistik Austria nicht erfasst.

### 2.2.1 Hindernisse auf internationalen Straßen

#### ▪ Australien

Per Definition wurde in einer Veröffentlichung der NHMRC (National Health and Medical Research Council) Road Accident Research Unit festgehalten, welche Objekte neben der Fahrbahn als potentiell gefährlich eingestuft werden können:

*„The term “roadside hazard” refers to any fixed object by the side of the road that, by virtue of its structure and placement, results in, or is likely to result in, an increased probability of vehicle damage, occupant injury or fatality in the event of a motor vehicle leaving the roadway. Such hazardous fixed objects include trees, utility poles, luminaire supports, sign posts, bridge rails and end treatments, fences, embankments and cuttings, ditches, guard*

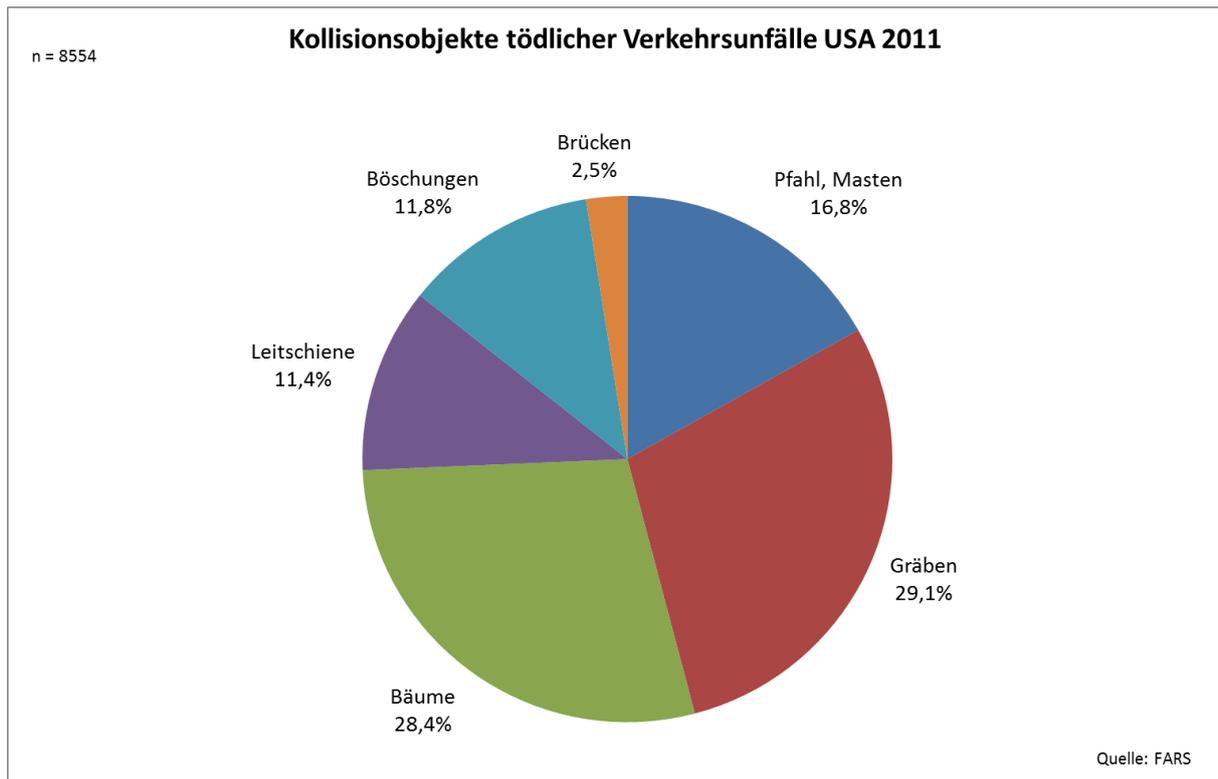
*rails (and guard rail end treatments), mail boxes and drainage structures (culverts, for example)“ [9, 1999]*

Dabei wurden folgende Objekte definiert:

- Bäume
- Strommasten
- Befestigungen für Beleuchtungen
- Wegweiser
- Brückengeländer
- Zäune
- Böschungen
- Gräben
- Leitplanken
- Briefkästen
- Wassergräben

#### ▪ USA

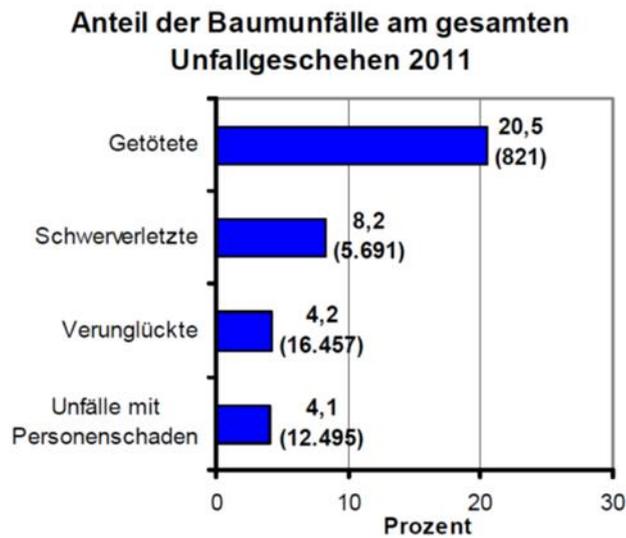
Eine statistische Auswertung des Fatality Analysis Reporting System (FARS) der USA von 2011 zeigte eine Übereinstimmung der zuvor definierten Objekte. Dabei stellten pfahlähnliche Objekte (Masten und Bäume) mit rund 45% den größten Anteil an tödlichen Unfällen dar, gefolgt von Gräben mit 29,1% (Abbildung 7). 11,4% der tödlichen Unfälle ereigneten sich durch einen Anprall an eine Leiteinrichtung und 11,8% durch Böschungen. In 2,5% der Fälle war eine Brücke das Kollisionsobjekt.



**Abbildung 7: Kollisionsobjekte USA 2011**

▪ **Deutschland**

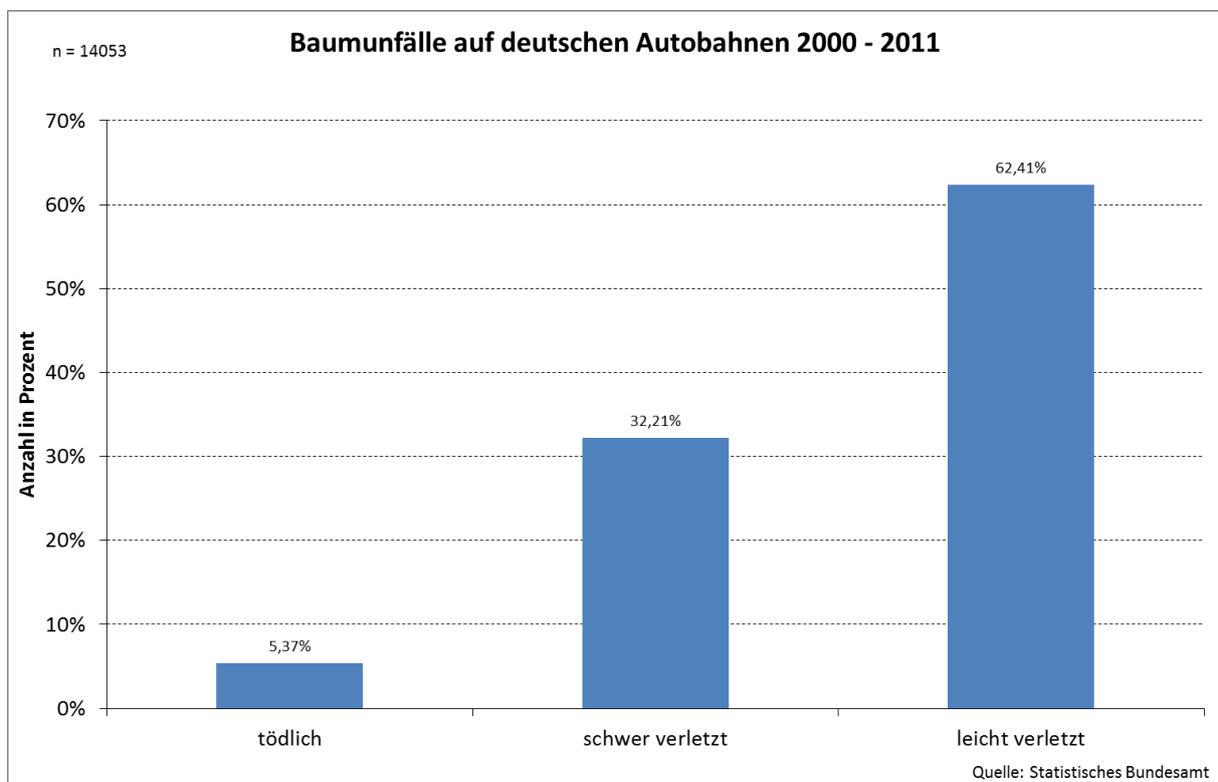
Auf deutschen Straßen gibt es zwar keine genaue Aufschlüsselung nach Kollisionsobjekten, doch in Sonderauswertungen wird darauf hingewiesen, dass Bäume zu den gefährlichsten Objekten zählen. So zeigt sich in einer Auswertung des statistischen Bundesamtes, dass 2011 20,5% der Personen durch einen Baumanprall tödlich verunglückten ( Abbildung 8).



Quelle: DESTATIS

**Abbildung 8: Baumunfälle in Deutschland**

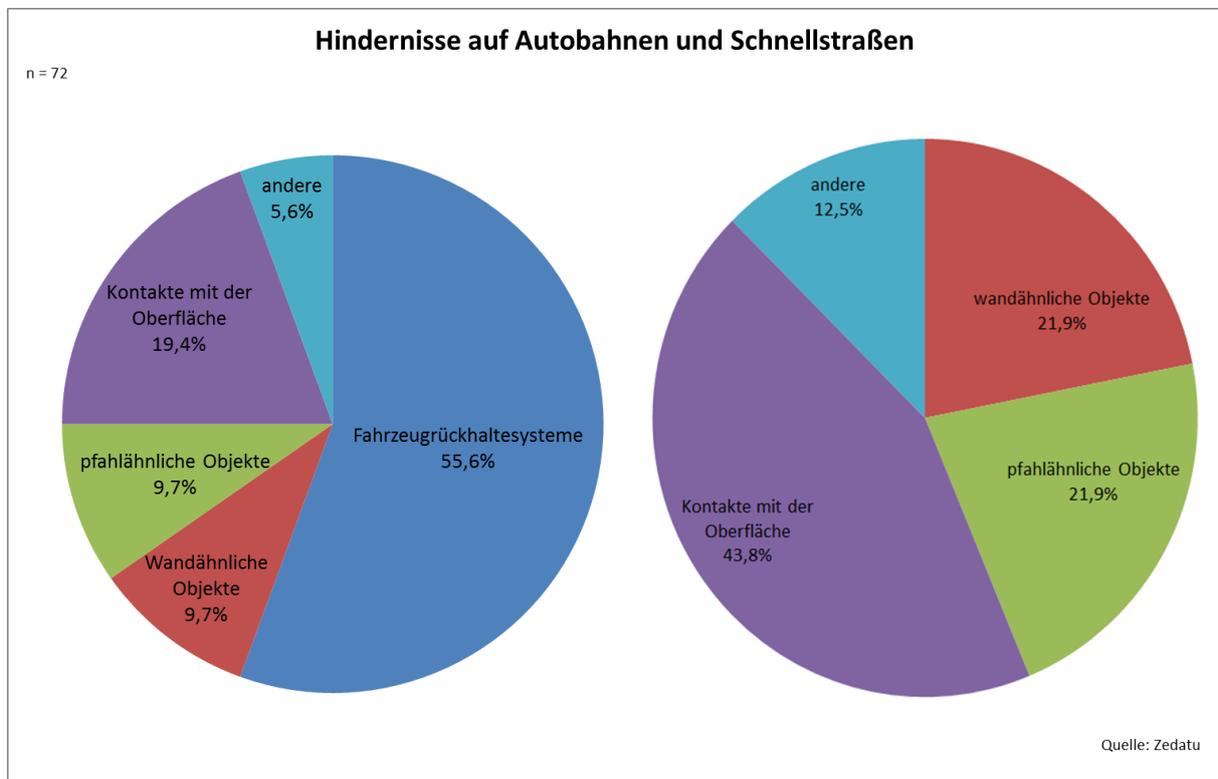
Auf deutschen Autobahnen starben 2011 21 Personen durch einen Baumanprall. 32,21% der Verunglückten erlitten dabei schwere Verletzungen. 62,41% wurden dabei nur leicht verletzt (Abbildung 9).



**Abbildung 9: Baumunfälle auf deutschen Autobahnen**

### 2.2.2 Hindernisse auf österreichischen Straßen

In Abbildung 10 ist ersichtlich, dass mehr als die Hälfte aller Unfälle am hochrangigen Straßennetz mit Fahrzeugrückhaltesystemen stattfand. Berücksichtigt man bei dieser Auswertung Fahrzeugrückhaltesysteme nicht als Hindernis, da diese eigentlich zur Absicherung solcher vorgesehen sind, ändern sich die relativen Anteile. Daraus geht hervor, dass Kontakte mit der Oberfläche (Böschungen, Boden) knapp 44% der tödlichen Unfälle zu verbuchen haben. Die Anteile von pfahlähnlichen Objekten (Bäume, Masten, Pfeiler) und wandähnlichen Objekten (Tunnelportale, Lärmschutzwände), konnten dabei mit gleichen Anteilen (21,9%) bestimmt werden.



**Abbildung 10: Ortsfeste Hindernisse**

Aus den Auswertungen geht hervor, dass eigentlich Böschungen den größten Anteil aller tödlich Verunglückten zu verbuchen haben. Es wird aber auch gezeigt, dass pfahlähnliche Objekte, insbesondere Bäume zu den gefährlichsten Objekten zählen. Für diese Arbeit wurde trotz der großen Anteile an Böschungsunfällen der Untersuchungsbereich auf pfahlähnliche und wandähnliche Objekte festgelegt.

### 3. TIEFENANALYSE VON REALUNFÄLLEN

Unter Tiefenanalyse versteht man in diesem Zusammenhang eine Auswertung aller verfügbaren Daten zur Analyse von Unfallursachen. Die Basis bilden dabei Rekonstruktionen von Realunfällen welche in der ZEDATU dokumentiert sind. Diese Datenbank bietet die Möglichkeit Daten der Ebene Mensch, Fahrzeug und Infrastruktur auszuwerten. Es soll untersucht werden, wie einzelne Parameter zusammenhängen, und welche Faktoren wesentlichen Einfluss auf den Ablauf und die zu erwartende Verletzungsschwere bei einem Anprall an ein Hindernis haben.

#### ▪ Abkommensgeschwindigkeit

Abbildung 11 zeigt die prozentuelle Auswertung der Abkommensgeschwindigkeit. Rund 87% aller Abkommensunfälle finden in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 80 und 140 km/h statt bei denen ein nachfolgender Anprall an ein Objekt identifiziert werden konnte. Dabei konnte eine mittlere Abkommensgeschwindigkeit von 110 km/h festgestellt werden

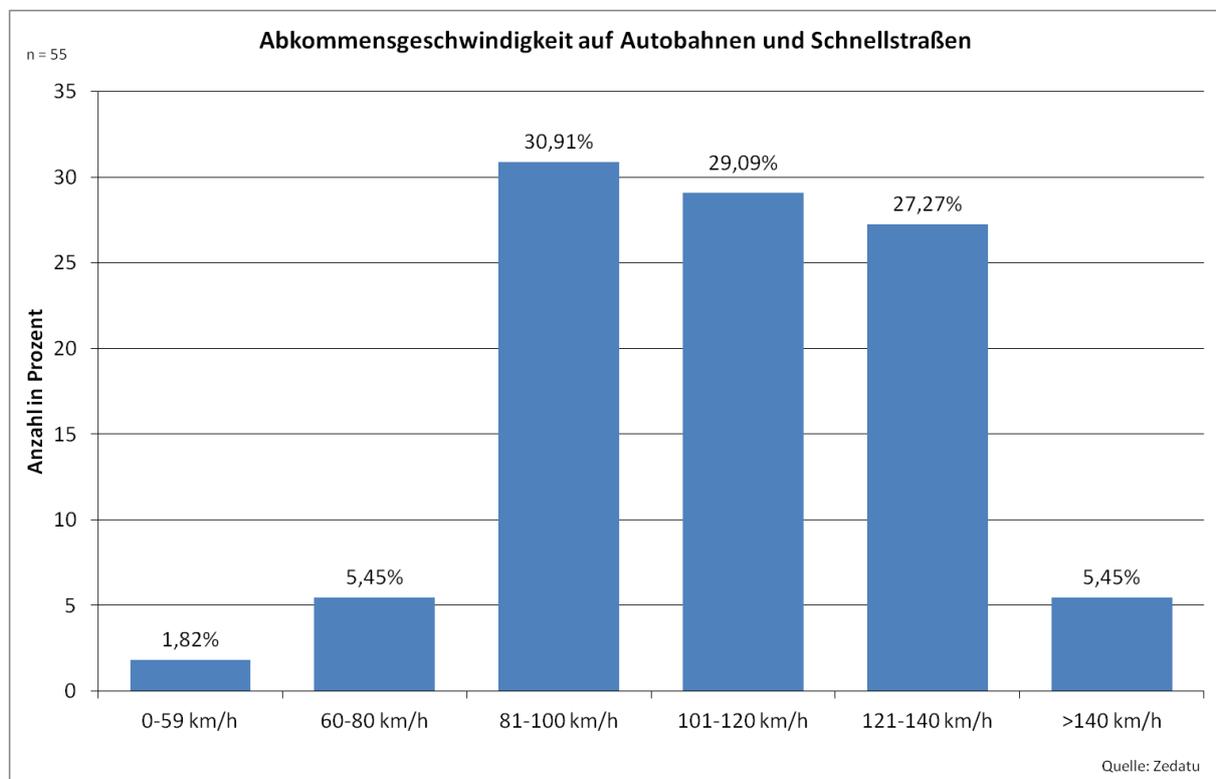


Abbildung 11: Abkommensgeschwindigkeit auf Autobahnen Schnellstraßen

### ▪ Anprallgeschwindigkeit an Hindernisse

Vergleicht man nun die Abkommengeschwindigkeit mit der Kollisionsgeschwindigkeit kann man feststellen, dass sich der Geschwindigkeitsbereich kaum unterscheidet. Rund 74% der Anprallgeschwindigkeiten liegen in demselben Bereich wie die der Abkommengeschwindigkeit. Die mittlere Anprallgeschwindigkeit liegt dabei bei 93,9km/h. Die Anteile, sowie die kumulierte Verteilung der Anprallgeschwindigkeit zeigt Abbildung 12.

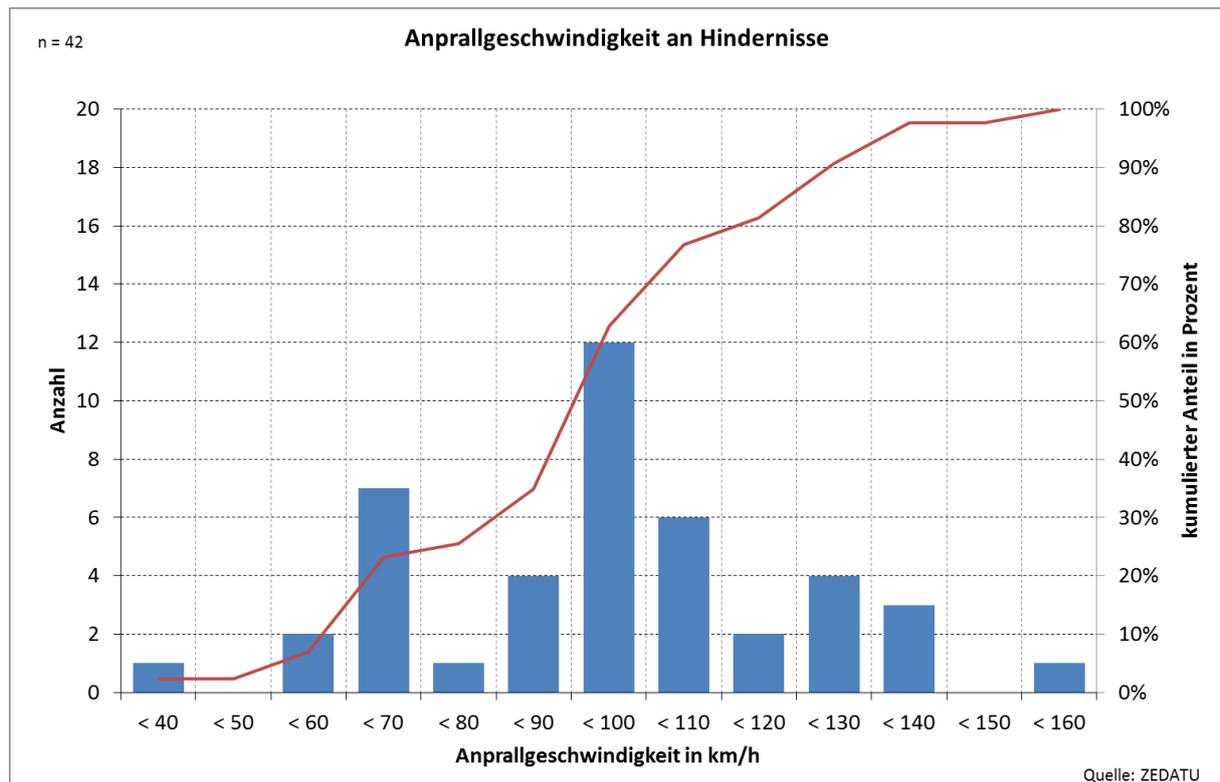
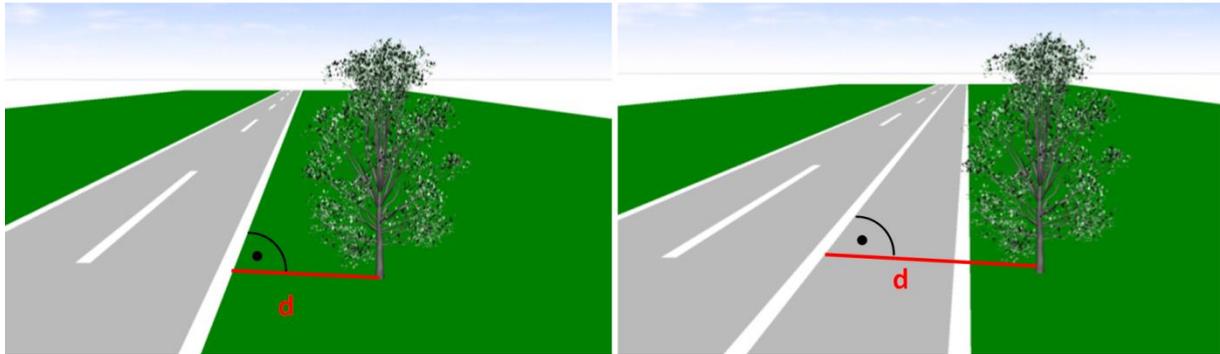


Abbildung 12: Anprallgeschwindigkeit an Hindernisse und kumulierte Anteile

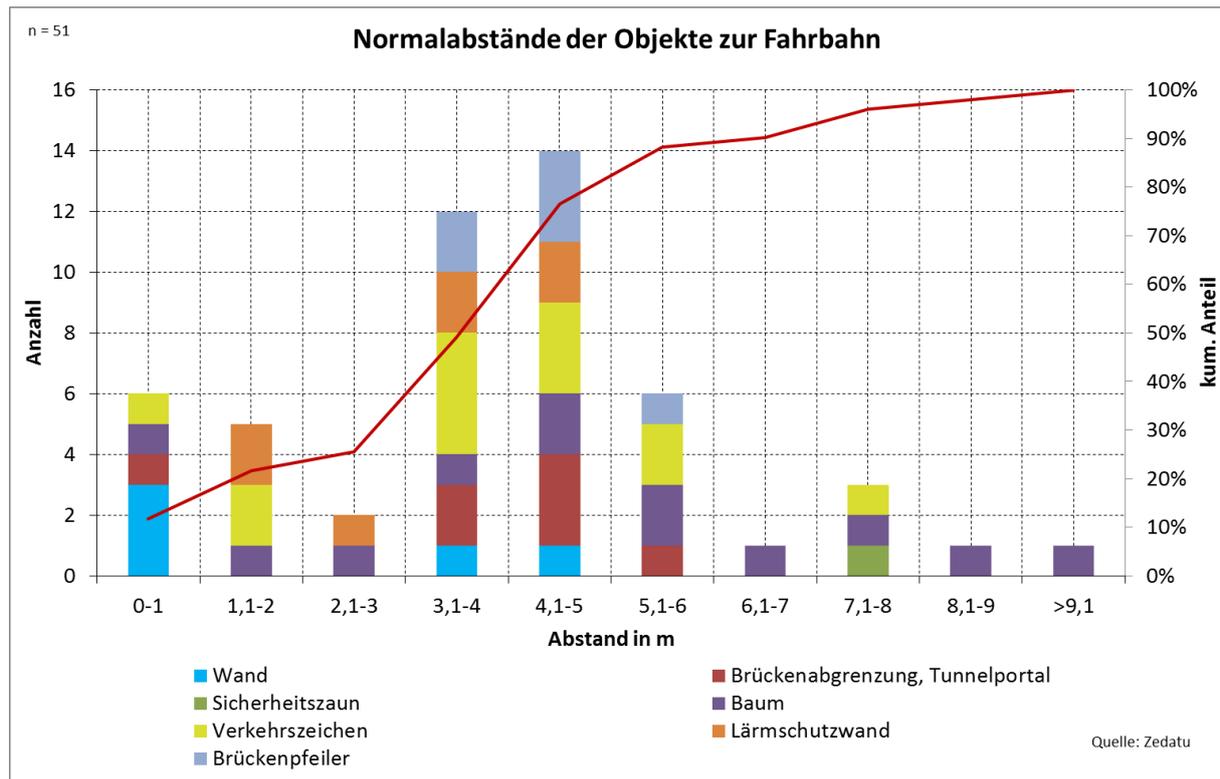
### ▪ Normalabstände der Objekte zur Fahrbahn

Unter Normalabstand versteht man in diesem Zusammenhang den Abstand bis zur weißen Leitlinie, und falls diese nicht vorhanden ist, bis zum Ende des befestigten Fahrbahnrandes (Abbildung 13). Auch bei Vorhandensein eines Pannenstreifens wird dieser nicht zur Fahrbahn gezählt, sondern schon als "neben der Fahrbahn" angesehen.



**Abbildung 13: Definition Normalabstand von Objekten zur Fahrbahn**

Rund 76% aller Objekte sind dabei in einem Abstand von unter fünf Meter neben der Fahrbahn anzufinden. Für diese Betrachtung wurden Fahrzeugrückhaltesysteme ausgenommen, da diese sehr nahe am Fahrbahnrand angebracht sind und wie schon in Abbildung 10 festgestellt, konnten Kollisionen mit Fahrzeugrückhaltesystemen in der Hälfte aller aufgezeichneten Fälle identifiziert werden. Eine Berücksichtigung von Fahrzeugrückhaltesystemen würde das Ergebnis der Abstände verfälschen. Auch die Berücksichtigung von Kontakten mit der Oberfläche (Böschung, Boden) wurde für die Auswertung nicht herangezogen. Dennoch konnte ein großer Anteil von gefährlichen Objekten in unmittelbarer Nähe zur Fahrbahn identifiziert werden. Abbildung 14 zeigt, welche Objekte wie weit von der Fahrbahn entfernt sind.

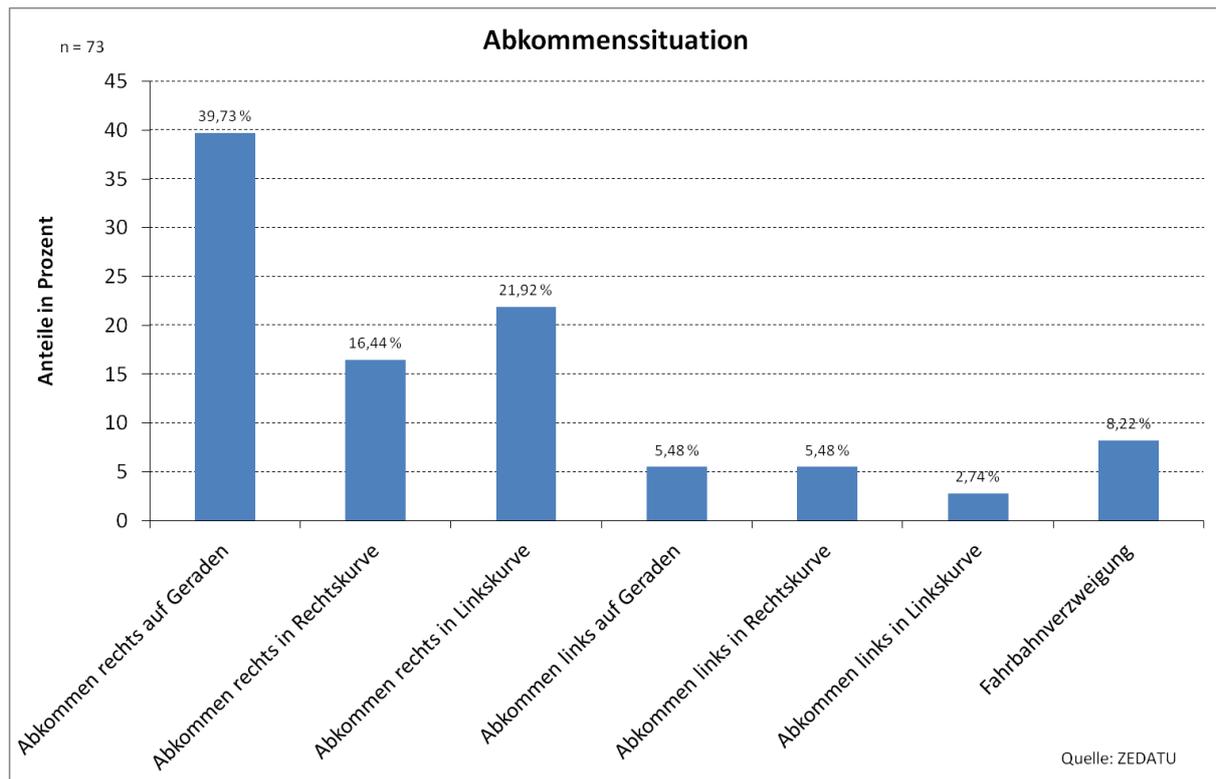


**Abbildung 14: Normalabstände der Objekte und kumulierte Anteile**

Betrachtet man nun den Zusammenhang zwischen Abkommensgeschwindigkeit und Abstände der Objekte zur Fahrbahn detaillierter, wird man feststellen, dass der Abkommenswinkel dabei einen wichtigen Parameter darstellt, der einen wesentlichen Einfluss auf die Unfall- bzw. Verletzungsschwere hat. Abhängig von Geschwindigkeit und Winkel ändert sich dabei der zurückgelegte Weg bis zu einer möglichen Kollision und dadurch auch die Anprallgeschwindigkeit an Hindernisse. Somit stellt dieser Zusammenhang einen wichtigen Punkt für die Auslegung von Auslaufzonen neben der Fahrbahn dar.

#### ▪ **Abkommenssituation**

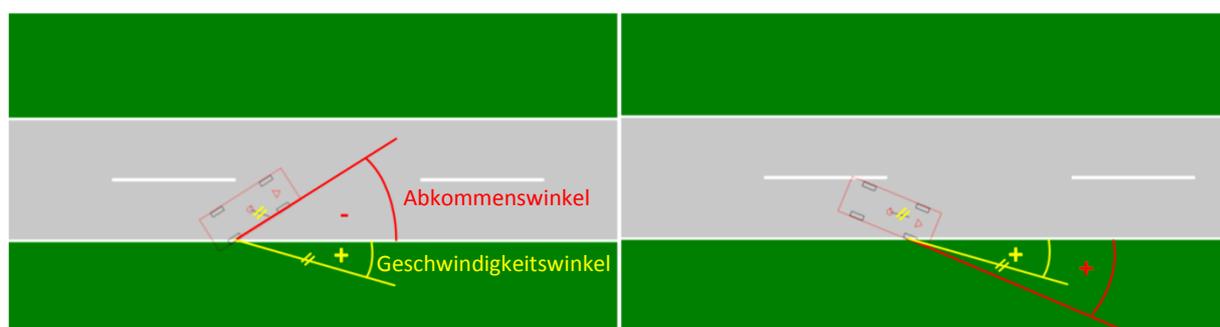
Um die Abkommenssituation beschreiben zu können wurden Auswertungen bezüglich des Straßenverlaufs durchgeführt. Hier zeigte sich, dass generell ein Abkommen rechts von der Fahrbahn überwiegt (Abbildung 15). Dabei überwiegt das Abkommen rechts auf gerader Straße mit 39,73%, gefolgt von einem Abkommen rechts in einer Linkskurve mit 21,92 %.



**Abbildung 15: Abkommenssituation bezogen auf die Straßenführung**

▪ **Abkommenswinkel, Geschwindigkeitswinkel und Schwimmwinkel**

Der Abkommenswinkel (Abbildung 16) beschreibt den Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und Fahrbahnrand. Als Fahrbahnrand gilt dabei die Definition nach Abbildung 13. Der Winkel zwischen Geschwindigkeitsvektor des Fahrzeuges und der Fahrbahnbegrenzung zum Zeitpunkt des Abkommens wird dabei als Geschwindigkeitswinkel bezeichnet. Um die Position des Fahrzeuges zuordnen zu können, werden die Winkel vorzeichenrichtig eingezeichnet.



**Abbildung 16: Abkommenswinkel und Geschwindigkeitswinkel**

Die Differenz zwischen Abkommenswinkel und Geschwindigkeitswinkel wird als Schwimmwinkel bezeichnet. Ist der Abkommenswinkel größer als der Geschwindigkeitswinkel ergibt sich ein positiver Schwimmwinkel und deutet darauf hin, dass das Fahrzeug zum Fahrbahnrand gedreht ist. Dementsprechend ist das Fahrzeug bei negativem Schwimmwinkel vom Fahrbahnrand weggedreht. Bei einem Schwimmwinkel kleiner als 5 Grad (der Betrag der Differenz zwischen Abkommenswinkel und Geschwindigkeitswinkel) geht man noch von einem stabilen Fahrzustand aus [26, 2009]. Dabei wird in einer Anforderungsliste an ESP die Bedingung formuliert, dass eine Regelung bei einem Schwimmwinkel über diesen Wert erfolgen sollte. Mit Hilfe dieser Formulierung lässt sich somit eine Aussage über die Stabilität des Fahrzeuges zum Zeitpunkt des Abkommens treffen. Bis zu einem Schwimmwinkel von 5 Grad kann man daher von einem stabilen Fahrzustand ausgehen.

Eine Auswertung des Abkommenswinkel von Realunfällen zeigte, dass mehr als zwei Drittel aller PKWs am hochrangigen Straßennetz mit einem Winkel unter 10 Grad von der Fahrbahn abkommen, 9 Prozent in einem Bereich von 11 bis 20 Grad und 25 Prozent der Fälle weisen Abkommenswinkel größer als 20 Grad auf (Abbildung 17).

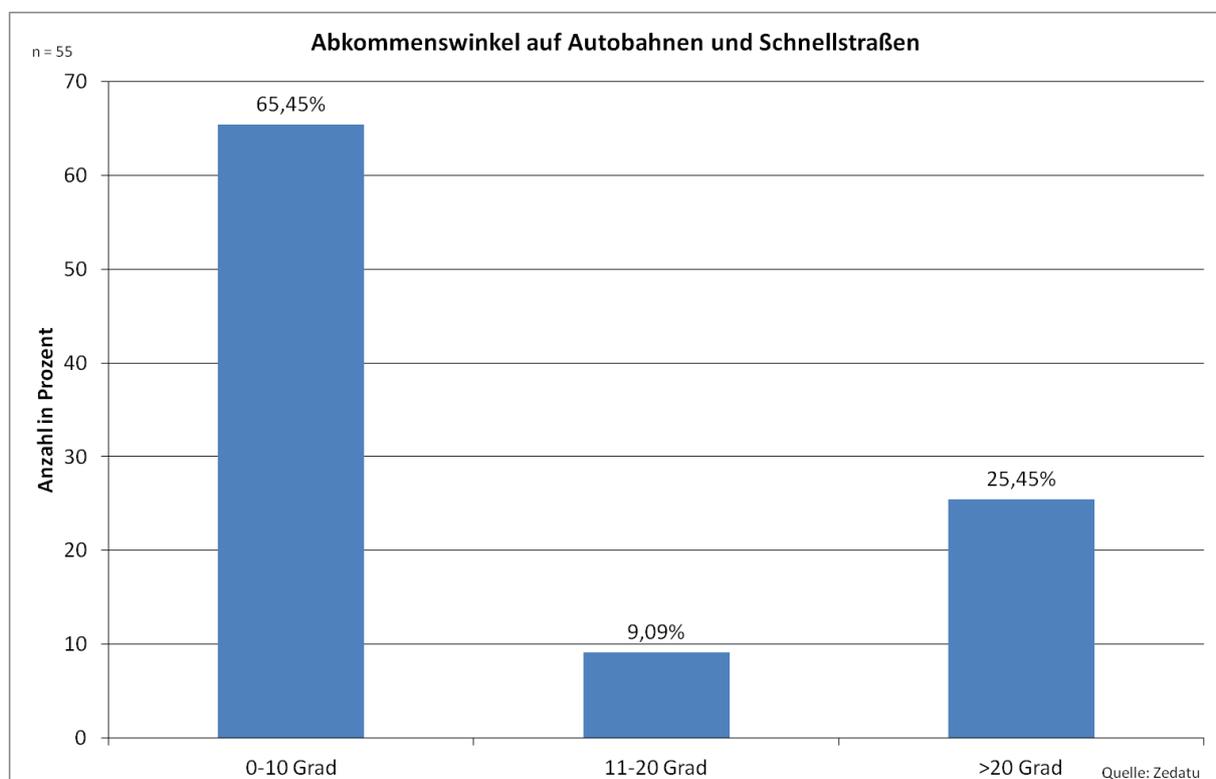
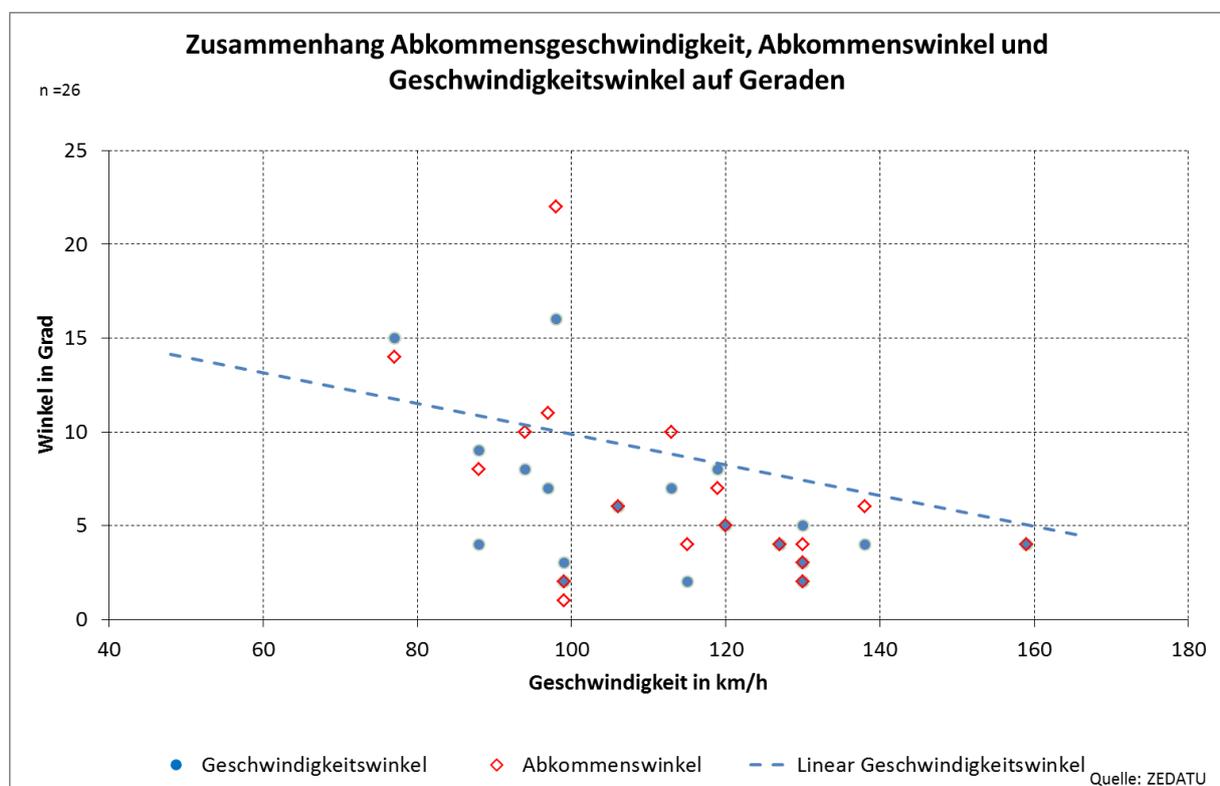


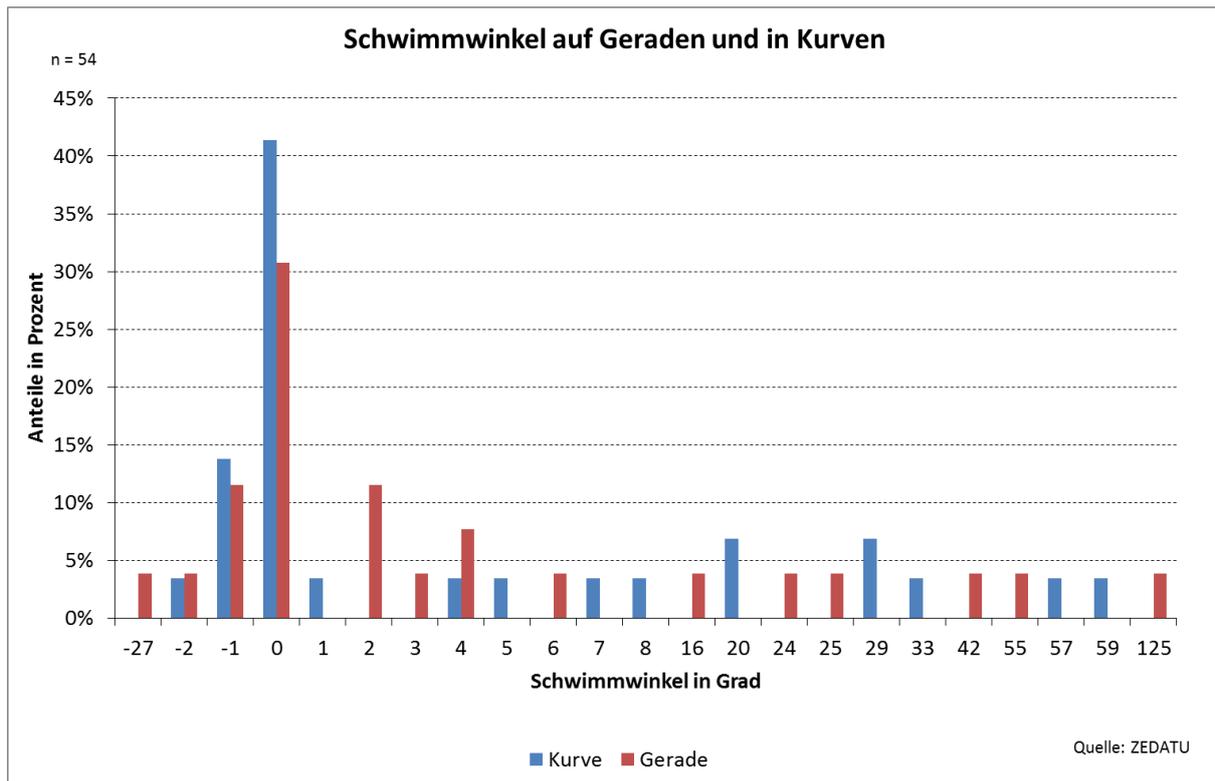
Abbildung 17: Abkommenswinkel auf Autobahnen und Schnellstraßen

Auf Grund der geringen Abkommenswinkel kann davon ausgegangen werden, dass vom Fahrer keine Reaktion erfolgte. Als Ursachen können dafür Sekundenschlaf, Unaufmerksamkeit, Alkohol oder Ablenkung angeführt werden. Untersuchungen dahingehend wurden auch bereits 2006 von Hoschopf et. al [15, 2006a] durchgeführt, die diese Aussage bestätigen. Der Zusammenhang zwischen Abkommenswinkel und Geschwindigkeitswinkel wurde dabei für die Situation auf gerader Strecke ausgewertet, da diese Abkommenssituation nach Abbildung 15 am häufigsten vorkommt. Dabei kann auf gerader Strecke eine abnehmende Tendenz des Geschwindigkeitswinkels mit zunehmender Abkommensgeschwindigkeit festgestellt werden und dieser ist in allen Fällen unter 20 Grad (Abbildung 18).



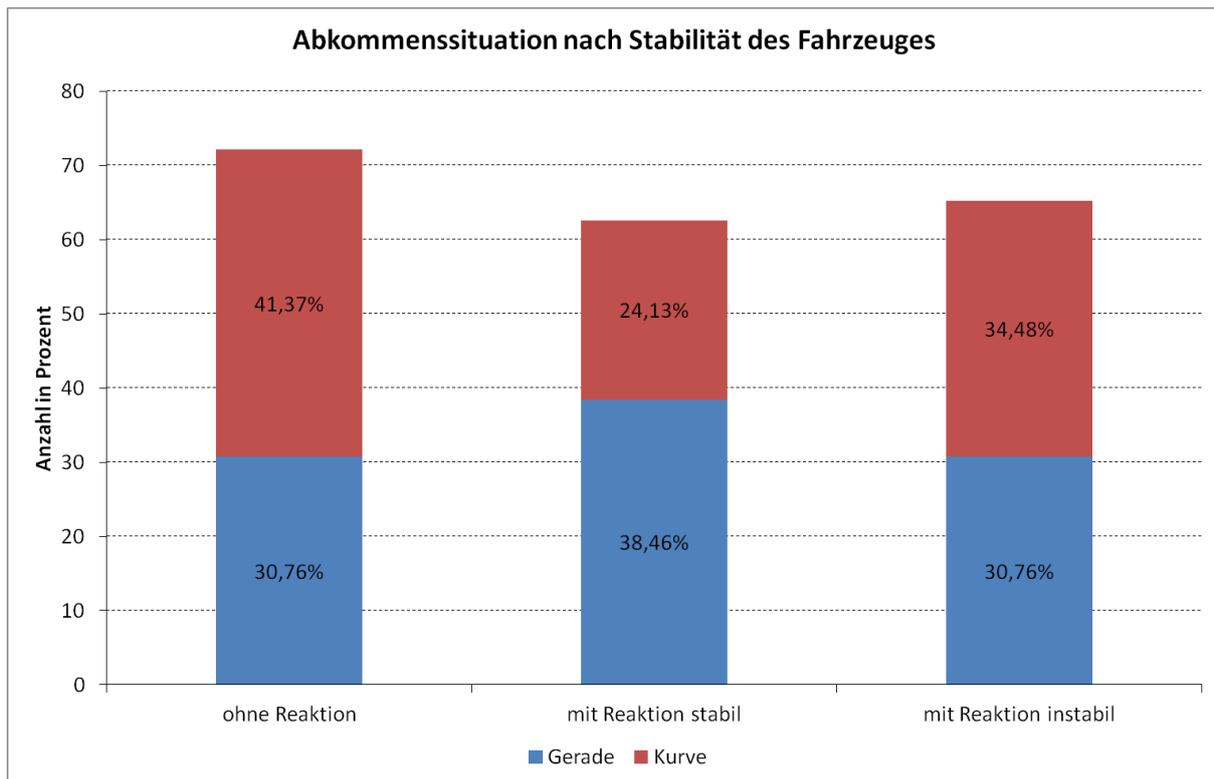
**Abbildung 18: Geschwindigkeitswinkel und Abkommenswinkel auf Geraden**

Einen Aufschluss über die genaue Lage des Fahrzeuges gibt dabei die Auswertung des Schwimmwinkels zum Zeitpunkt des Abkommens. Besitzen Abkommenswinkel und Geschwindigkeitswinkel den gleichen Wert ergibt sich für den Schwimmwinkel 0 Grad und es ist davon auszugehen, dass ein Abkommen ohne Reaktion erfolgte. Das ist auf gerader Strecke bei 30,7 % und in Kurven bei 41,3% der Fall (Abbildung 19).



**Abbildung 19: Schwimmwinkel in Kurven und auf Geraden**

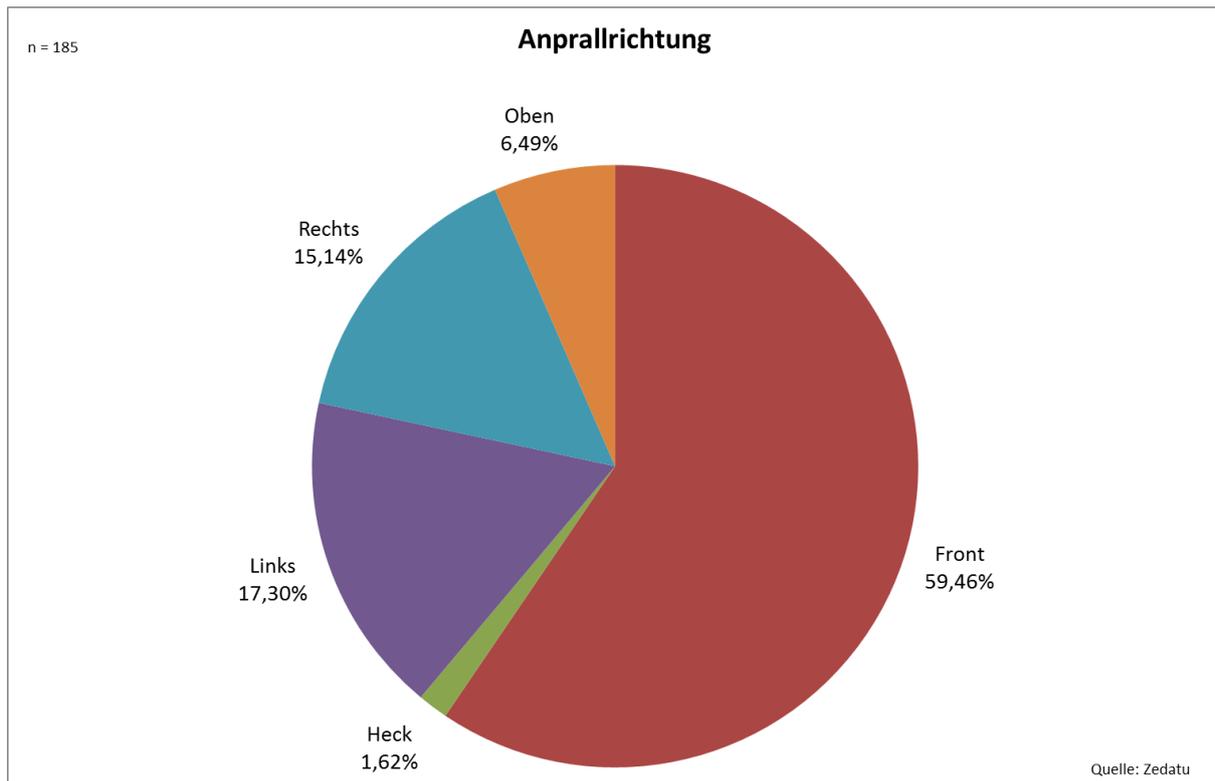
Durch die Anwendung der zuvor festgehaltenen Grenzen, kann nun festgestellt werden, ob das Fahrzeug zum Zeitpunkt des Abkommens beherrschbar gewesen wäre, und ob eine Reaktion vom Fahrer erfolgte. Unter diesen Voraussetzungen ist anzunehmen, dass in 41,3% auf gerader Strecke und 30,7% in Kurven keine Reaktion erfolgte. In 38,46% der Fälle auf geraden Strecken bzw. in Kurven bei 24,13 % erfolgte eine Reaktion bei der das Fahrzeug in einer stabilen Fahrlage gewesen ist. In allen anderen Fällen (Gerade 30,76 %, Kurve 34,48%) erreichte das Fahrzeug die Abkommensstelle bereits schleudernd (Abbildung 20).



**Abbildung 20: Reaktionen des Fahrers auf Geraden und in Kurven**

▪ **Anprallrichtung des Fahrzeugs**

Um eine Aussage über die genaue Anprallsituation treffen zu können wurden im nächsten Schritt Fahrzeugbeschädigungen nach Anprallrichtung ausgewertet (Abbildung 21). Es konnte dabei festgestellt werden, dass Beschädigungen am Fahrzeug mit 59,46% an der Front aufgetreten sind. Beschädigungen an der Seite traten mit ungefähr gleiche Anteilen (links 17,3%, rechts 15,14%) auf. Heckbeschädigungen wurden mit dem geringsten Anteil identifiziert (1,62%) und auch Beschädigungen auf der Fahrzeugoberseite, welche auf Überschläge hindeuten würden, waren mit 6,49% vorhanden.



**Abbildung 21: Beschädigungen am Fahrzeug**

#### ▪ Verletzungen nach Körperregionen

Eine Aufschlüsselung der Verletzungen nach Körperregionen (Abbildung 22) zeigt, dass Verletzungen am Kopf mit knapp 30% am häufigsten auftreten. Verletzungen am Brustraum und der Wirbelsäule treten ungefähr in gleichen Anteilen (17,67% und 16,87%) auf. Fast man obere und untere Extremitäten zusammen kann man erkennen, dass die Anteile ungefähr denen von Kopfverletzungen entsprechen. Zu den oberen Extremitäten zählen dabei Oberarm, Unterarm und Hand und sind in 13,6% der Fälle betroffen. Die unteren Extremitäten mit 15,2% teilen sich dabei in Oberschenkel, Unterschenkel und Fuß auf. Grund für den ebenfalls großen Anteil sind meist Intrusionen am Fahrzeug, die bei einem Anprall an ein Objekt entstehen.

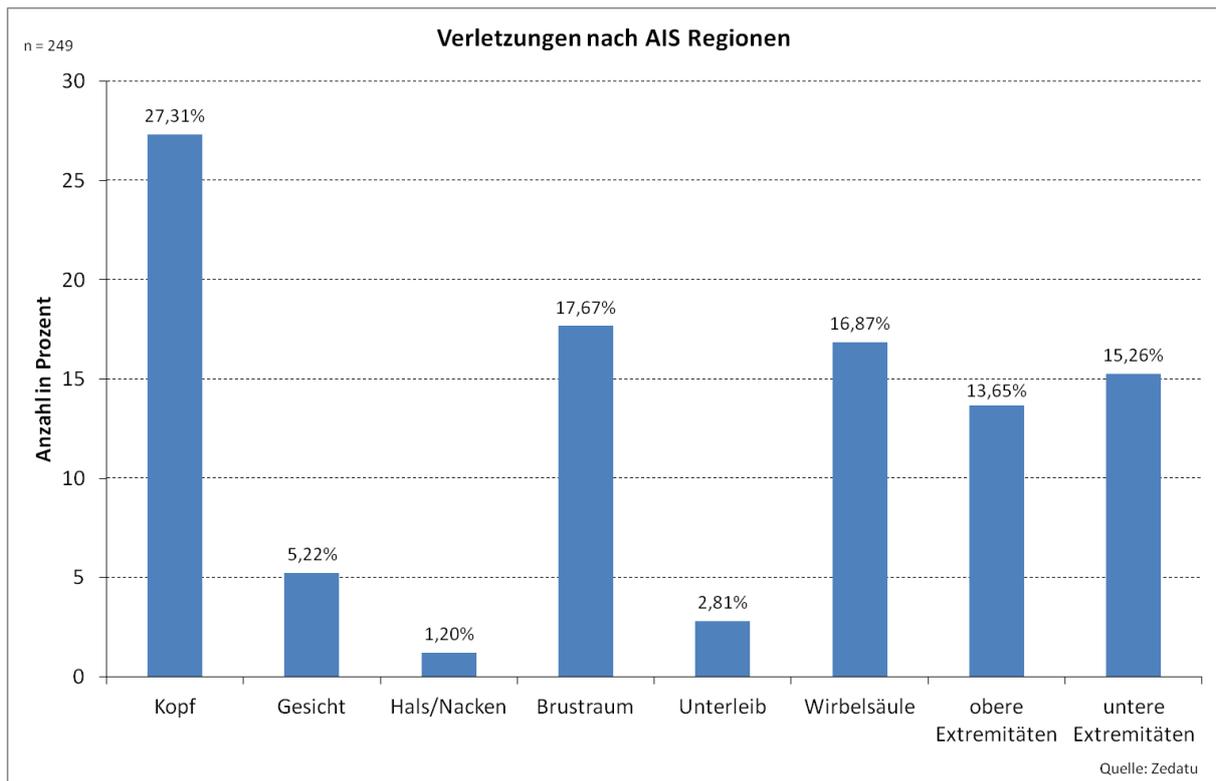


Abbildung 22: Verletzungen nach Körperregionen

## 4. NORMEN, RICHTLINIEN UND BEWERTUNGSMÖGLICHKEITEN

Im Bereich des passiven Insassenschutzes wurden gewisse Standards festgelegt um die Sicherheit von Fahrzeuginsassen zu gewährleisten. Diese kann man in fahrzeugseitige und infrastrukturelle Sicherheitsstandards einteilen. Zu den Fahrzeugseitigen zählen dabei Crashtests, welche vom Gesetzgeber vorgeschrieben sind, aber auch unabhängige Verbraucherschutztests. Die Infrastrukturellen Standards behandeln dabei die Aufstellung und Testbedingungen von Fahrzeugrückhaltesystemen, sowie Bedingungen für Tragkonstruktionen der Straßenausstattung. Für die Beurteilung der Sicherheit von Insassen gibt es dabei Grenzwerte für die menschliche Belastung sowie Bewertungsmöglichkeiten von möglichen Verletzungen, die hier ebenfalls behandelt werden.

### 4.1 Fahrzeugseitige Normen und Richtlinien

Für die Sicherheit von Fahrzeuginsassen müssen Fahrzeuge, bevor diese für einen Markt zugelassen werden können bestimmte gesetzliche Bestimmungen erfüllen. Diese Bestimmungen schreiben meist nur sehr minimale Sicherheitsstandards vor. Die vorgeschriebenen Prüfverfahren können sich regional erheblich unterscheiden. Zu den wichtigsten Standards zählen die Regelungen der Vereinigten Staaten und der Europäischen Union. In Europa werden diese Testvorschriften für Fahrzeuge durch die ECE (Economic Commission for Europe), in den Vereinigten Staaten durch die FMVSS (Federal Motor Vehicle Standard) geregelt. Auch in anderen Ländern gibt es diesbezüglich Standards, wie zum Beispiel Japan, China, Australien, Indien, Korea. Diese sind an dieser Stelle nur erwähnt und werden in weiterer Folge nicht weiter behandelt.

Neben den gesetzlich vorgeschriebenen Bestimmungen führen auch unabhängige Organisationen Tests durch, um den Automobilkäufer mit einer realitätsnahen und unabhängigen Beurteilung der Sicherheitsmerkmale von Fahrzeugen zu versorgen [1]. Zu den bedeutendsten zählen dabei die Tests des NCAP (New Car Assessment Programm). Diese Organisation führt unabhängig von den gesetzlich vorgeschriebenen Bestimmungen Crashtests durch mit dem Ziel Automobilhersteller strengere Richtlinien im Sicherheitsbereich zu empfehlen [1]. Dabei wird im Speziellen auf die Testkonfigurationen

nach EuroNCAP und UsNCAP eingegangen. Weitere Verbraucherschutztests sind im Anhang C dokumentiert.

#### 4.1.1 Frontalkollisionen

- **gesetzlich vorgeschriebene Tests**

Die frontalen Crashkonfigurationen regeln dabei für Europa die ECE-R94 und für die US amerikanischen Bereich die FMVSS 208.

##### ECE-R94

Dabei wird das Fahrzeug mit 56 km/h, mit einer 40%igen Überdeckung auf eine deformierbare Barriere gefahren. Als Insassen (Fahrer und Beifahrer) werden 2 Hybrid III 50% Mann Crashtestdummys eingesetzt. Bewertungskriterien für diesen Test sind die Insassenbelastung, Dichtheit der Kraftstoffanlage, Fahrzeugstruktur, Intrusionen in den Innenraum und Bergungsverhalten. Diese Richtlinie wird zurzeit überarbeitet und soll künftig mit 60 km/h durchgeführt werden [5, 2011a]. Die Crashkonfiguration sowie Grenzwerte der einzelnen Körperbereiche sind in Abbildung 23 dargestellt.

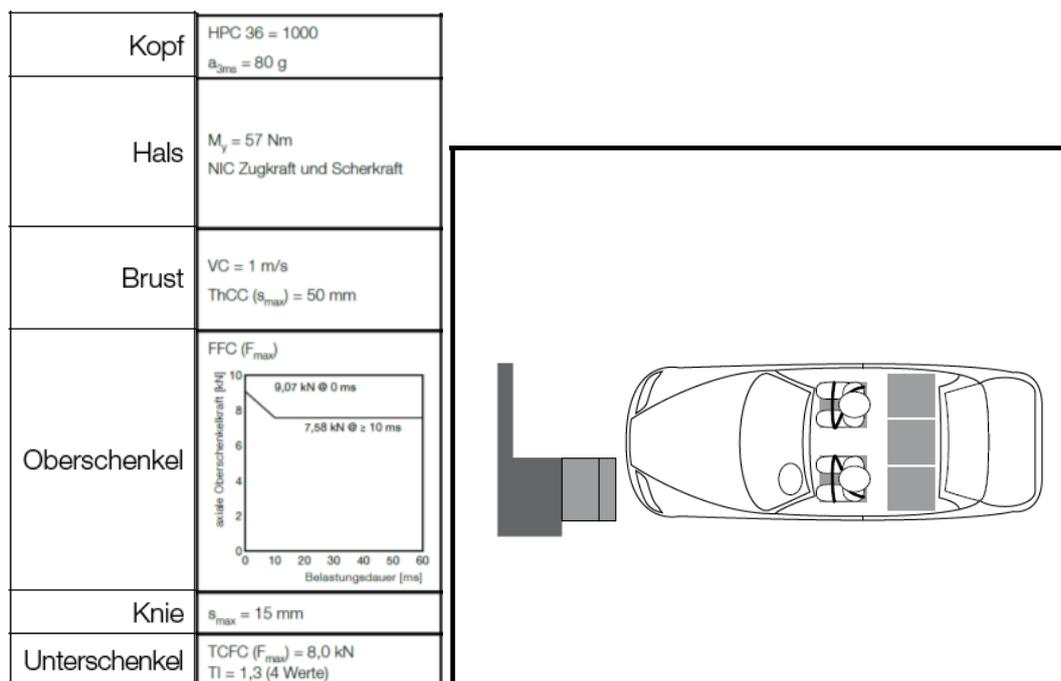
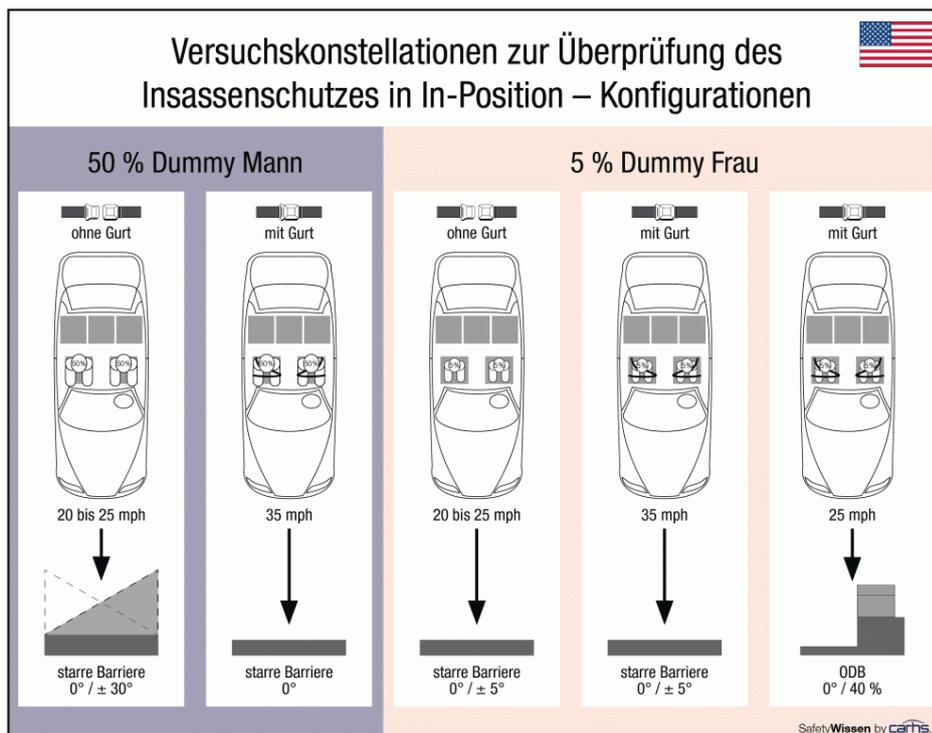


Abbildung 23: Crashtestkonfiguration und Grenzwerte nach ECE-R94 [8, 2012]

**FMVSS 208**

Diese Richtlinie umfasst 4 Crashkonfigurationen gegen eine starre undeformierbare Barriere, die jeweils in einem Geschwindigkeitsbereich von 32 km/h bis 56 km/h durchgeführt werden. Dabei werden jeweils 2 Hybrid III 50% male bzw. 2 Hybrid III 5 %Female mit und ohne Gurt auf die auftretenden Belastungen überprüft. Die genauen Konfigurationen zeigt Abbildung 24. Dabei werden neben der Insassenbelastung ebenfalls die Dichtheit der Kraftstoffanlage sowie die Fahrzeugstruktur überprüft.

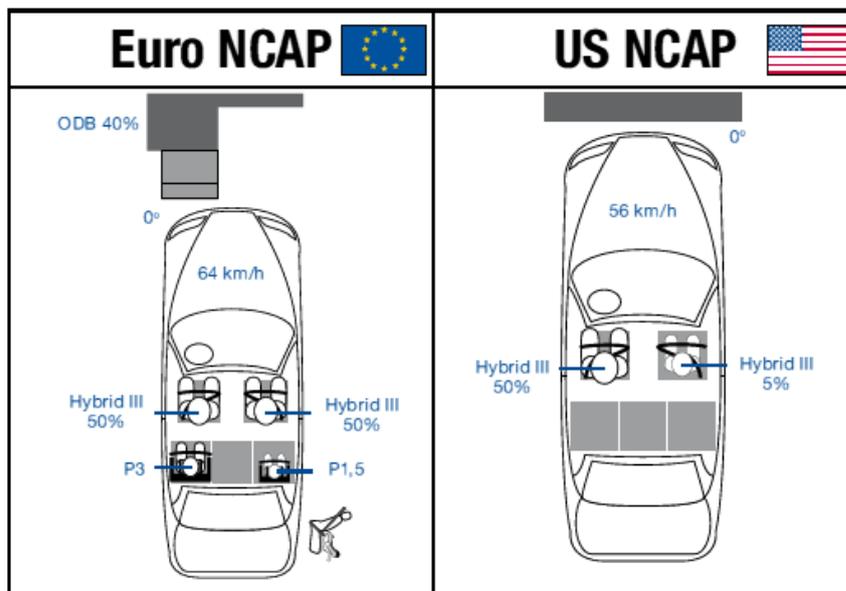


Dummy	50 % H III	5 % female
Kopf	HIC 15 = 700	HIC 15 = 700
Hals	$N_{ij} = 1,0$ (4 Werte) Zug: $F_{zmax} = 4,17$ kN Druck: $F_{zmax} = 4,0$ kN	$N_{ij} = 1,0$ (4 Werte) Zug: $F_{zmax} = 2,62$ kN Druck: $F_{zmax} = 2,52$ kN
Brust	$a_{3ms} = 60$ g $s_{max} = 63$ mm	$a_{3ms} = 60$ g $s_{max} = 52$ mm
Oberschenkel	$F_{max} = 10$ kN	$F_{max} = 6,805$ kN

Abbildung 24: Crashtestkonfiguration und Grenzwerte nach FMVSS 208 [8, 2012]

### ▪ Verbraucherschutztests

Abbildung 25 zeigt die aktuellen frontalen Crashkonfigurationen der USA im Vergleich zu Europa. Der Grafik kann die entsprechende Anprallsituation, Geschwindigkeit, Überdeckung und Insassenplatzierung entnommen werden. Die Bewertungskriterien setzen sich dabei aus Insassenbelastung, Fahrzeugstruktur und Intrusionen in den Innenraum zusammen.



**Abbildung 25: NCAP frontaler Crashtests im Vergleich [8, 2012]**

Für die einzelnen Körperbereiche (Kopf, Hals, Brust, Oberschenkel, Knie, Unterschenkel, Fuß) sind dabei Grenzwerte der Belastung definiert, nachdem eine Punktwertung erfolgt. Als Beispiel soll an dieser Stelle das Kriterium für den Kopf nach EuroNCAP Wertung genügen. Im Vergleich zu den gesetzlich vorgeschriebenen Crashtests, bei denen der Grenzwert für den Kopf von HIC 36 bei 1000 liegt, setzt diese Bewertung einen Wert von 650 voraus um volle Punktzahl für diese Kriterium zu erreichen. Ein HIC 36 von 1000 würde bei der NCAP Bewertung 0 Punkte ergeben. Für die anderen Körperbereiche werden ebenfalls Punkte anhand der definierten Grenzwerte vergeben. Eine Bewertung der Sicherheit erfolgt dabei gemessen an der maximal erreichbaren Punkteanzahl.

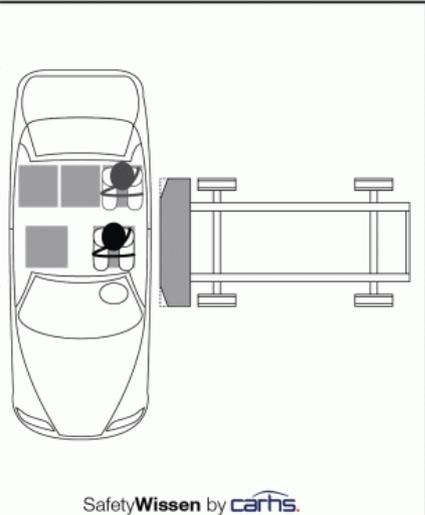
#### 4.1.2 Seitliche Kollisionen

- **gesetzlich vorgeschriebene Tests**

Für die seitlichen Crashkonfigurationen gelten die Richtlinien der ECE-R95 für den europäischen Raum und die FMVSS 214 für die USA. Während in den USA bereits ein gesetzlich vorgeschriebener Pfahltest durchgeführt werden muss, gibt es hinsichtlich der in Europa geltenden Richtlinien noch keine Vorschreibung einer solchen Konfiguration.

#### ECE-R95

Bei diesem Test wird ein seitlicher Anprall unter 90 Grad mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h durchgeführt (Abbildung 26). Das Gewicht der mobilen deformierbaren Barriere beträgt dabei 950 kg. Das Fahrzeug wird mit einem Insassen (EuroSID II Dummy) dabei nach denselben Kriterien wie in der ECE R94 bewertet.

Anforderung	ECE-R95, 96/27/EG, Euro NCAP	
Aufprallrichtung	seitlich 90°	
Geschwindigkeit	50 km/h	
Barriere (MDB)	EEVC (2000 Advanced Barriere), Masse 950 kg, 300 mm Bodenfreiheit, 800 mm Höhe, 1500 mm Breite	
Dummys	1 ES-2 vorne auf Stoßseite, zusätzlich bei Euro NCAP hinten P3 stoßabgewandt und P1,5 stoßseitig	
Schutzkriterien	Kopf HPC < 1000 Brust VC < 1,0 m/s Rippeneindrückung D < 42 mm Abdomen Summe APF < 2,5 kN Pelvis PSPF < 6,0 kN	

**Abbildung 26: Crashtestkonfiguration und Grenzwerte nach ECE-R95 [8, 2012]**

#### FMVSS 214

Die gesetzlichen Bestimmungen der USA schreiben bezüglich eines Seitenanpralls zwei Testsituationen vor (Abbildung 27). Für die erste Konfiguration wird eine mobile deformierbare Barriere mit einem Gewicht von 1368 kg unter 27 Grad zur Längsachse und 54 km/h gegen die Seite des Fahrzeugs gefahren. Dabei werden jeweils die Belastungen der beiden Insassen auf Stoßseite (Fahrer ES-2 Dummy, im Fond SID IIs) gemessen, sowie

weitere Kriterien wie Fahrzeugstruktur und Bergungsverhalten (öffnen der Tür) zur Bewertung herangezogen.

Die zweite Konfiguration stellt einen seitlichen Pfahlanprall dar. Dabei wird das Fahrzeug mit bis zu 32 km/h unter 75 Grad auf einen Pfahl mit dem Durchmesser von 294,7mm gezogen. Insassen und Bewertungskriterien entsprechen der FMVSS 208.

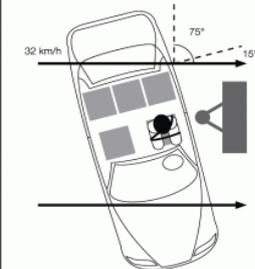
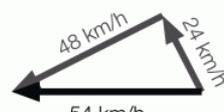
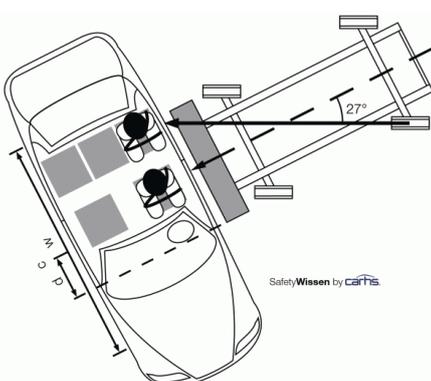
FMVSS 214 neu („Oblique Pole Test“)	
bis 32 km/h	
seitlich unter 75° (schräg von vorne) auf feststehenden Pfahl	
254 mm	
Test mit ES-2 re oder SID IIs (Build Level D) jeweils auf Stoßseite	FMVSS 214 neu
SID IIs: HIC 36 < 1000 Lower Spine Beschl. < 82 g Beckenkraft < 5,525 kN	seitlich 90° mit 27° Krebsgang
ES-2 re: HIC 36 < 1000 Brusteindrückung < 44 mm Abdomenkraft < 2,5 kN PSPF < 6 kN	54 km/h (48 km/h in 90° Richtung)
	MDB, 1368 kg Masse, 279 mm Bodenfreiheit, 1676 mm Breite
	ES-2 re vorne / SID-IIs Build Level D hinten (jeweils auf Stoßseite)
	SID IIs: HIC 36 < 1000 Lower Spine Beschl. < 82 g Beckenkraft < 5,525 kN
	ES-2 re: HIC 36 < 1000 Brusteindrückung < 44 mm Abdomenkraft < 2,5 kN PSPF < 6 kN
	
	

Abbildung 27: Crashtestkonfiguration und Grenzwerte nach FMVSS214 [8, 2012]

#### ▪ Verbraucherschutztests

Die seitlichen Crashkonfigurationen nach EuroNCAP und UsNCAP sind in Abbildung 28 dargestellt. Dabei sind die Bewertungskriterien denen der frontalen Konfigurationen der beiden NCAP Test ident. Den Testaufbau sowie Anprallgeschwindigkeiten, Winkel und Insassen sind ebenfalls in Abbildung 28 ersichtlich.

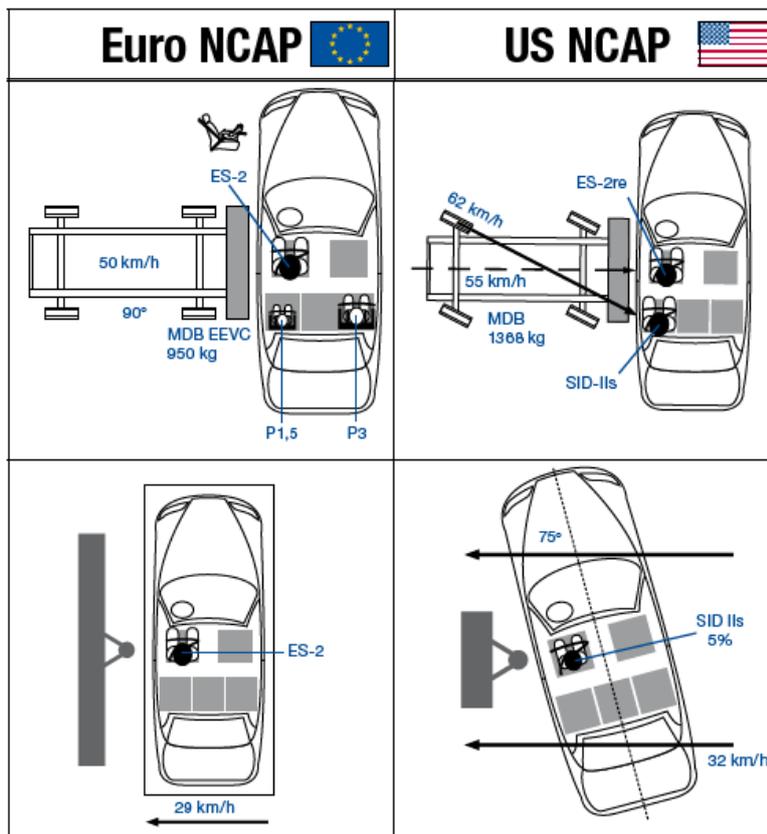
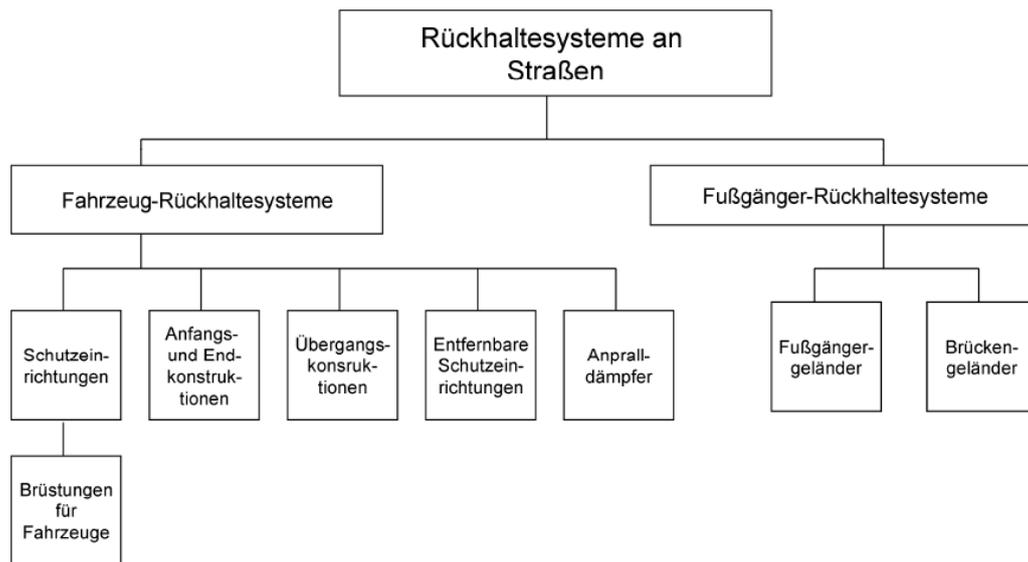


Abbildung 28: NCAP seitlicher Crashtests im Vergleich [8, 2012]

## 4.2 Infrastrukturseitige Normen und Richtlinien

### 4.2.1 Fahrzeugrückhaltesysteme

Fahrzeugrückhaltesysteme zählen zu den passiven Sicherheitssystemen an Straßen. Sie werden dafür eingesetzt, um ein Abkommen von Fahrzeugen von der Fahrbahn und deren Insassen zu schützen. Eine Einteilung dieser Rückhaltesysteme ist in Abbildung 29 ersichtlich. Bevor diese jedoch zum Einsatz kommen, müssen Fahrzeugrückhaltesysteme auf die Anforderungen gemäß europäischer Norm geprüft werden und für die Aufstellung an österreichischen Straßen die Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen erfüllen.



**Abbildung 29: Einteilung von Rückhaltesystemen an Straßen nach DIN EN1317 [12]**

### DIN EN 1317[12]

Die Anforderungen für Fahrzeugrückhaltesysteme sind in der EN 1317 Teil 1 bis 6 beschrieben, wobei diese bei einer Aufstellung an europäischen Straßen eine Prüfung nach EN1317 Teil 1 bis 4 zu durchlaufen haben. In dieser Norm werden die drei wesentlichen Punkte des Rückhaltesystems überprüft:

- Aufhaltestufe
- Anprallheftigkeit
- Wirkungsbereich

Die Prüfung erfolgt dabei nach dem in Abbildung 30 dargestellten Aufbau. Dabei darf der Anprallwinkel nicht weiter als 6m vom Anprallpunkt mit einem geeigneten Verfahren gemessen werden. Der Anprallpunkt muss dabei so gewählt werden, dass etwaige Schwachpunkte der Konstruktion beinhaltet sind und somit die schlechtesten Prüfbedingungen für die Schutzeinrichtung darstellen.

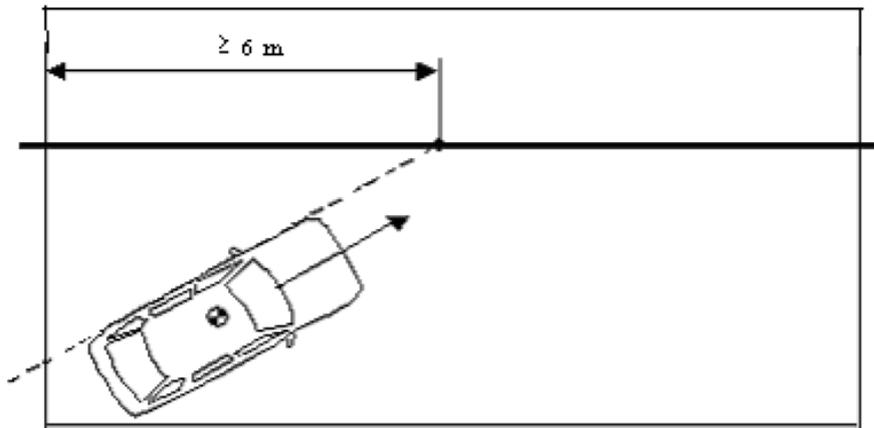


Abbildung 30: Testkonfiguration nach DIN EN 1317

Für die Prüfung von Fahrzeurückhaltesystemen gelten die in Tabelle 4 dargestellten Kriterien. Dabei sind entsprechend der Prüfung Anprallwinkel, Anprallgeschwindigkeit und die entsprechende Masse des Prüffahrzeuges vorgeschrieben.

Tabelle 4: Anprallprüfungen gemäß DIN EN 1317

Prüfung	Anprallgeschwindigkeit km/h	Anprallwinkel Grad	Gesamtprüfmasse kg	Fahrzeugart
TB 11	100	20	900	Personenkraftwagen
TB 21	80	8	1 300	Personenkraftwagen
TB 22	80	15	1 300	Personenkraftwagen
TB 31	80	20	1 500	Personenkraftwagen
TB 32	110	20	1 500	Personenkraftwagen
TB 41	70	8	10 000	Lastkraftwagen
TB 42	70	15	10 000	Lastkraftwagen
TB 51	70	20	13 000	Bus
TB 61	80	20	16 000	Lastkraftwagen
TB 71	65	20	30 000	Lastkraftwagen
TB 81	65	20	38 000	Sattelzug

Die Aufhaltestufen von Fahrzeurückhaltesystemen (Tabelle 5) werden dabei in 4 Bereiche eingeteilt. Rückhaltevermögen bei geringem Anprallwinkel, normales, höheres und sehr hohes Rückhaltevermögen. Dabei müssen für die jeweiligen Aufhaltestufen die Kriterien von Tabelle 4 erfüllt sein.

**Tabelle 5: Aufhaltestufen gemäß DIN EN 1317**

Aufhaltestufen			Abnahmeprüfung
Rückhaltevermögen bei geringem Anprallwinkel	T1		TB 21
	T2		TB 22
	T3		TB 41 und TB 21
Normales Rückhaltevermögen	N1		TB 31
	N2		TB 32 und TB 11
Höheres Rückhaltevermögen	H1		TB 42 und TB 11
	L1		TB 42 und TB32 und TB 11
	H2		TB 51 und TB 11
	L2		TB 51 und TB32 und TB 11
	H3		TB 61 und TB 11
	L3		TB 61 und TB32 und TB 11
Sehr hohes Rückhaltevermögen	H4a H4b		TB 71 und TB 11 TB 81 und TB 11
	L4a L4b		TB 71 und TB32 und TB 11 TB 81 und TB32 und TB 11

Für die Bewertung der Insassensicherheit bzw. für die Anprallheftigkeit der Fahrzeuginsassen dürfen die Kennwerte ASI (Acceleration Severity Index) und THIV (Theoretical Head Impact Velocity) nicht überschritten werden. In Tabelle 6 sind drei Stufen A, B und C und die jeweiligen Grenzwerte aufgelistet. Dabei bedeutet A die höchste Sicherheitsstufe.

**Tabelle 6: Anprallheftigkeit gemäß DIN EN 1317**

Anprallheftigkeitsstufe	Indexwerte		
A	ASI ≤ 1,0	Und	THIV ≤ 33 km/h
B	ASI ≤ 1,4		
C	ASI ≤ 1,9		

Der Wirkungsbereich von Fahrzeugrückhaltesystemen wird dabei durch die Verformung bzw. durch das durchbiegende Systems bei einem Anprall angegeben (Tabelle 7). Je nach Klassifizierung werden dadurch Aufstellbedingungen bestimmt sowie der Abstand zu dem abzusichernden Objekt.

**Tabelle 7: Wirkungsbereich gemäß DIN EN 1317**

Klassen der normalisierten Stufen des Wirkungsbereichs	Stufen des normalisierten Wirkungsbereichs m
W1	$W_N \leq 0,6$
W2	$W_N \leq 0,8$
W3	$W_N \leq 1,0$
W4	$W_N \leq 1,3$
W5	$W_N \leq 1,7$
W6	$W_N \leq 2,1$
W7	$W_N \leq 2,5$
W8	$W_N \leq 3,5$

**RVS 05.02.31[13]**

Diese Richtlinie regelt die Ausführung und Aufstellung von dauerhaft angebrachten Fahrzeugrückhaltesystemen auf österreichischen Straßen. Dabei stellt die europäische Norm EN 1317 das Grundregelwerk zur Überprüfung derartiger Rückhaltesysteme dar, die zuvor bereits behandelt wurde. Das Regelwerk legt dabei Bereiche (Böschungen unter bestimmten Neigungswinkeln, Kunstbauten, etc.) fest, bei denen ein Abkommen von der Fahrbahn nachteilige Folgen für den Insassen bedeuten würden. Für jeden dieser Bereiche werden Anforderungen gestellt. Als Beispiel sei hier eine Böschung genannt, die eine Steigung steiler als 1:2 oder eine Höhe von mehr als 4m aufweist. An anderen Bereichen wie zum Beispiel Mittelstreifen, angrenzende Gewässer, Kunstbauten, Lärmschutzbauten etc. sind ebenfalls Anforderungen gestellt, bei denen eine Anbringung eines Fahrzeugrückhaltesystems erforderlich ist. Des Weiteren werden hier auch Aufstellungslängen definiert wie weit das Gefahrenobjekt vor und danach abzusichern ist.

**4.2.2 Tragkonstruktionen für die Straßenausstattung nach DIN EN 12767[11]**

Diese Europäische Norm hat das Ziel, den Grad der Verletzungen bei einem Anprall an eine dauerhafte Tragkonstruktion für die Straßenausstattung zu vermindern. Die Norm gilt ebenfalls für vorübergehende Konstruktionen, wie sie zum Beispiel an Baustellen eingesetzt werden. Unter einer Tragkonstruktion im Sinne der Norm versteht man alle Vorrichtungen

(zum Beispiel: Pfosten, Maste, Bodenverankerungen) die der Befestigung von Lichtsignalanlagen, Notrufsäulen, Verkehrsschilder, Leuchten oder ähnlichem dienen.

Ziel bei der Konstruktion von Tragkonstruktionen ist es, das bei einem möglichen Anprall eines Fahrzeuges, diese sich lösen oder nachgeben und das Fahrzeug derart verlangsamen, das die Gefahr einer möglichen Sekundärkollisionen dadurch vermindert werden kann. Unter Sekundärkollision im Sinne der Norm werden dabei mögliche Kollisionen mit Bauwerken, Bäumen, Fußgänger und andere Verkehrsteilnehmer verstanden. Dabei werden 3 Kategorien unterschieden:

- hoch energieabsorbierend (HE)
- niedrig energieabsorbierend (LE)
- nicht energieabsorbierend (NE)

Die Insassensicherheit wird dabei in vier Stufen gegliedert. Das Sicherheitsniveau nimmt dabei mit zunehmender Zahl zu. Die Grenzwerte für die Belastung des Insassen werden durch den ASI (AccelerationSeverity Index) und THIV (Theoretical Head Impact Velocity) beschrieben. Die Grenzwerte dürfen für die jeweiligen Anprallgeschwindigkeiten, Absorptionsklassen und Insassensicherheitsstufen nicht überschritten werden (siehe Tabelle 8).

**Tabelle 8: Klassen, Sicherheitsstufe und Grenzwerte gemäß DIN EN 12767**

Energieabsorptionskategorie	Insassensicherheitsstufe	Geschwindigkeiten			
		Obligatorische Anprallprüfung bei niedriger Geschwindigkeit 35 km/h		Anprallprüfungen für verschiedene Geschwindigkeitsklassen 50 km/h, 70 km/h und 100 km/h	
		Höchstwerte		Höchstwerte	
		ASI	THIV km/h	ASI	THIV km/h
HE	1	1,0	27	1,4	44
HE	2	1,0	27	1,2	33
HE	3	1,0	27	1,0	27
LE	1	1,0	27	1,4	44
LE	2	1,0	27	1,2	33
LE	3	1,0	27	1,0	27
NE	1	1,0	27	1,2	33
NE	2	1,0	27	1,0	27
NE	3	0,6	11	0,6	11
NE	4	Keine Anforderung	Keine Anforderung	Siehe 5.6	

Die Prüfung erfolgt dabei nach Geschwindigkeitsklassen, für die die Tragkonstruktion zugelassen werden soll (siehe Tabelle 9). Dabei besteht der Test für die zuvor erwähnten Insassensicherheitsstufen 1, 2 und 3 aus 2 Teilen. Ein Test mit 35 km/h, um zu überprüfen ob sich die Tragkonstruktion bei niedrigen Geschwindigkeiten planmäßig verhält, und ein weiterer Test bei der Anprallgeschwindigkeit (50 km/h, 70 km/h, 100km/h) entsprechend der Geschwindigkeitsklasse nach Tabelle 9. Für die Sicherheitsstufe 4 besteht ein vereinfachter Test der nur mit den Anprallgeschwindigkeiten durchgeführt wird.

**Tabelle 9: Geschwindigkeitsklassen**

<b>Geschwindigkeitsklasse km/h</b>	<b>Anprallgeschwindigkeiten km/h</b>
50	35 und 50
70	35 und 70
100	35 und 100

Den genauen Prüfaufbau zeigt Abbildung 31. Dabei wird das Fahrzeug entsprechend der Geschwindigkeitsklasse unter einem Winkel von 20 Grad auf die Tragkonstruktion gefahren. Ebenfalls ersichtlich sind die Grenzbereiche zur Messung der Anprall- und Abprallgeschwindigkeit. Die Anprallgeschwindigkeit darf dabei maximal 6m vor dem Anprallpunkt gemessen werden. Die Abprallgeschwindigkeit des Versuchsfahrzeuges ist dabei senkrecht zum verlängerten Anfahrweg 12m hinter dem Anprallpunkt zu messen.

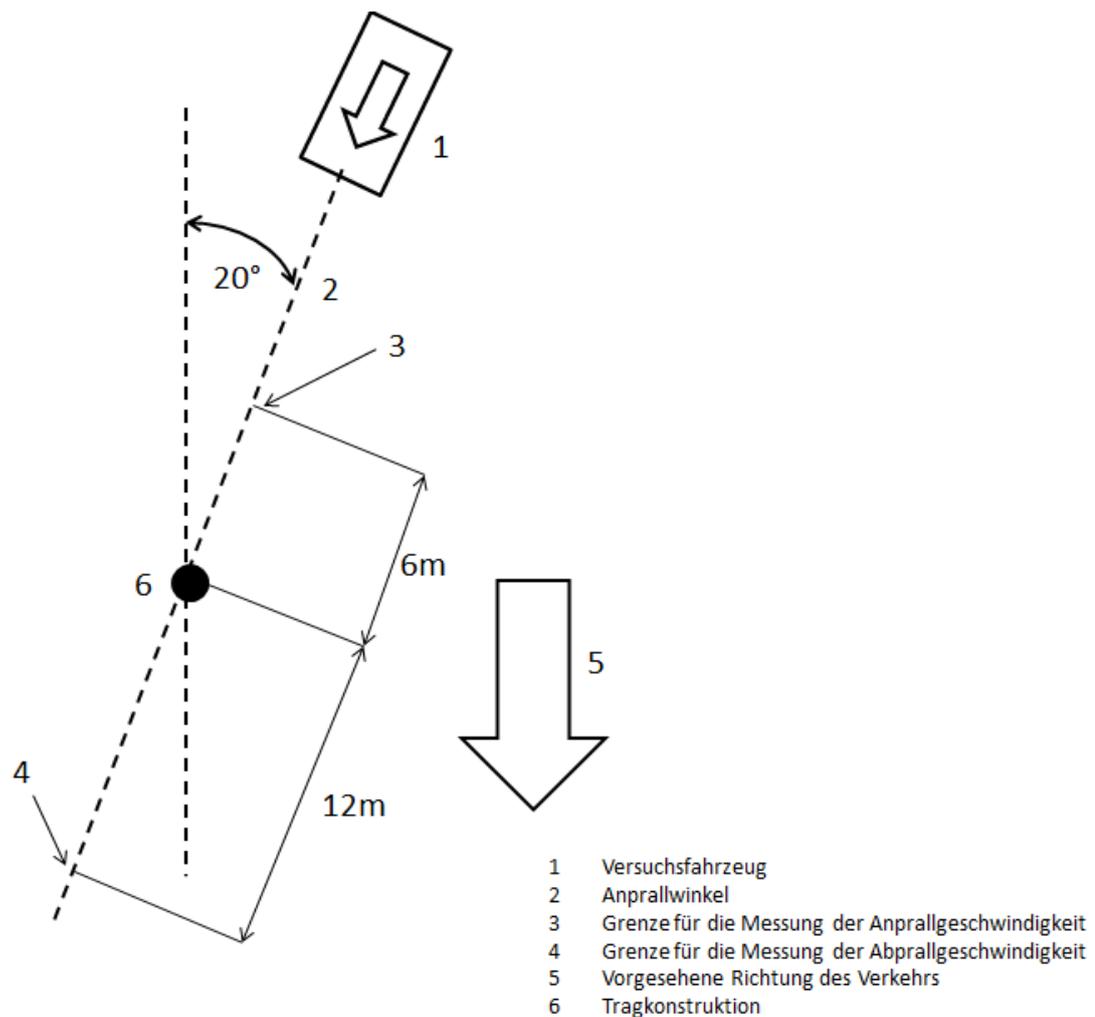


Abbildung 31: Prüfaufbau gemäß DIN EN 12767

### 4.3 Belastungen auf den menschlichen Körper

Der Mensch ist täglich Belastungen ausgesetzt, jedoch sind ihm dabei Grenzen gesetzt. Überschreitet man diese, ist mit Verletzungen zu rechnen. Bei einem Verkehrsunfall wird der menschliche Körper enormen Belastungen ausgesetzt. Man kann dabei drei Verletzungsmechanismen unterscheiden [17, 2007].

- Kontaktverletzungen (punktuelles Einwirken von Kräften)
- Beschleunigungsverletzungen
- Viskose Verletzungen (zum Beispiel Organkompression)

Um eine Evaluierung der aufgetretenen Verletzungen durchführen zu können, werden Kriterien definiert, die eine Aussage über eine wahrscheinliche Verletzung oder das Risiko einer Verletzung ermöglichen.

### 4.3.1 Verletzungskriterien und Grenzwerte

Verletzungskriterien finden heutzutage in vielen Bereichen Anwendung, wie zum Beispiel Arbeitsplatzsicherheit, Sport etc. [21, 2010]. Auch in aktuellen Craschnormen und NCAP Programmen werden Verletzungskriterien herangezogen, um eine Aussage über die Sicherheit von Fahrzeugen und deren Insassen machen zu können. Für jeden Körperbereich werden dabei Kriterien festgelegt die sich aus Beschleunigungen, Kräfte, Momente oder Deformationen berechnen lassen. Für jeden dieser Bereiche werden Grenzwerte festgelegt. Werden diese überschritten ist mit schweren Verletzungen zu rechnen. Eine Auflistung der Kriterien zeigt Tabelle 10.

**Tabelle 10: Menschliche Belastungsgrenzen [24, 2003b]**

Körperteil	Mechanische Größen	Belastungsgrenzen
Ganzer Körper	ax max	40...80g
Kopf/ Gehirn	ax max, ay max	60g T>45ms
Knöchener Schädel	ax max, ay max	80...300g abhängig von Stoßfläche
Stirn	ax max	120...200g
	Fx	4000-6000N
Halswirbelsäule	ax max thorax	30...40g
	ay max thorax	15...18g
	Fx	1200...2600N
Brust	ax max	40...60g t>2ms
	Fx	4000...8000
	Sx	5...6cm
Becken - Oberschenkel	Fx	6400...12500N Oberschenkel
	ay max	50...80g Becken
Schienbein	Fx	2500...5000N
	Ex	150...210Nm
	Mx	120...170Nm

### 4.3.2 Bewertungsmöglichkeiten von Verletzungen

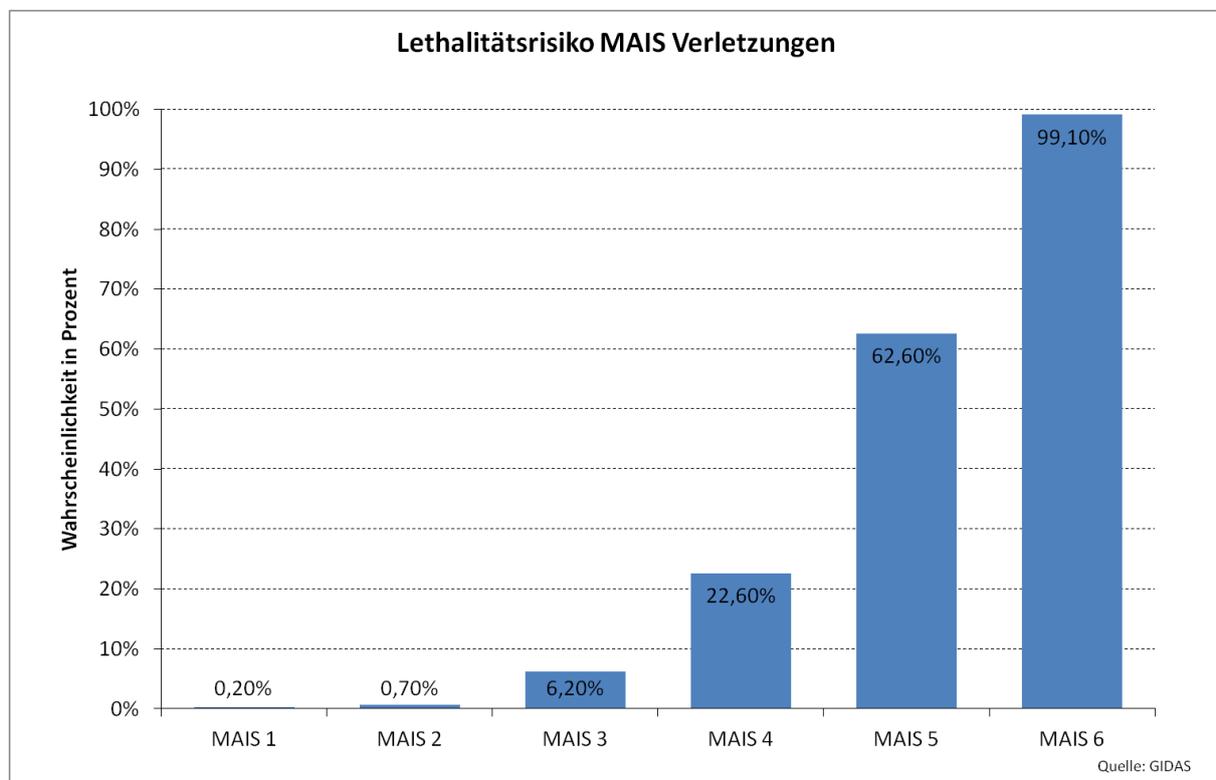
Zur Bewertung der Verletzungsschwere wurde in den 60iger Jahren die Abbreviated Injury Scale (AIS) eingeführt, deren letzte Überarbeitung aus dem Jahr 2008 bis heute Gültigkeit besitzt. Die AIS unterscheidet dabei 9 Körperregionen und 6 Verletzungsschweren (Tabelle 11).

**Tabelle 11: AIS Codierung [2]**

AIS Code	AIS Körperregion
1	Kopf
2	Gesicht
3	Nacken
4	Rumpf
5	Unterleib
6	Wirbelsäule
7	Obere Gliedmaßen
8	Untere Gliedmaßen
9	Unbekannt

AIS Code	AIS Verletzungsschwere
1	minor (leicht)
2	moderate (mäßig)
3	serious (ernst)
4	severe (schwer)
5	critical (lebensbedrohend)
6	maximum (tödlich)

Dem entsprechend können für jeden Körperbereich Verletzungsschweren angegeben werden. Die Skala beschreibt dabei das Lethalitätsrisiko für eine Person, die eine bestimmte Verletzung als einzige erlitten hat. Häufig wird auch in der Praxis der maximal AIS codierte Wert (MAIS) als Maßstab für die Schwere einer Verletzung herangezogen. Dabei wird nur der maximale Wert der betroffenen Körperregion angegeben. Einen Zusammenhang zwischen einer MAIS Verletzung und der Überlebenswahrscheinlichkeit beschreibt die GIDAS (German In-Depth Accident Study) [14] (siehe Abbildung 32).

**Abbildung 32: Lethalitätsrisiko maximaler AIS Verletzungen**

Diese Daten stammen aus der Analyse von Realunfällen und den dort vorgekommenen Verletzungsschweren. Für eine Simulation ist es jedoch nötig, Zusammenhänge zwischen der Schwere einer Verletzung und den aus der Simulation gewonnenen Werten der Analysekriterien zu finden.

### 4.3.3 Analysekriterien und Zusammenhänge mit Verletzungsschweren

Da aus der Tiefenanalyse hervorgeht, dass ein Großteil der Kollisionen mit Objekten frontal erfolgt, wurde zunächst untersucht, welche Kriterien für die Bewertung solcher Konfigurationen in aktuellen Crashnormen herangezogen werden. Ausgehend von diesen Kriterien wurde eine Recherche durchgeführt, um festzustellen, ob mögliche Zusammenhänge von Analysekriterien und einer Verletzungsskala bestehen.

#### HIC [21, 2010]

Für die Berechnung des HIC Wertes ist es notwendig, die Kopfbeschleunigungen in alle Richtungen des Insassen aufzuzeichnen.

Der HIC Wert stellt dabei den normierten maximalen Integralwert der Kopfbeschleunigung dar in einem bestimmten Zeit Intervall. Die dabei gängigsten Intervalle sind bei 15ms (HIC 15) und 36ms (HIC 36). Das Kriterium errechnet sich wie folgt:

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

mit der resultierenden Kopfbeschleunigungen im Schwerpunkt

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

**ASI [7, ]**

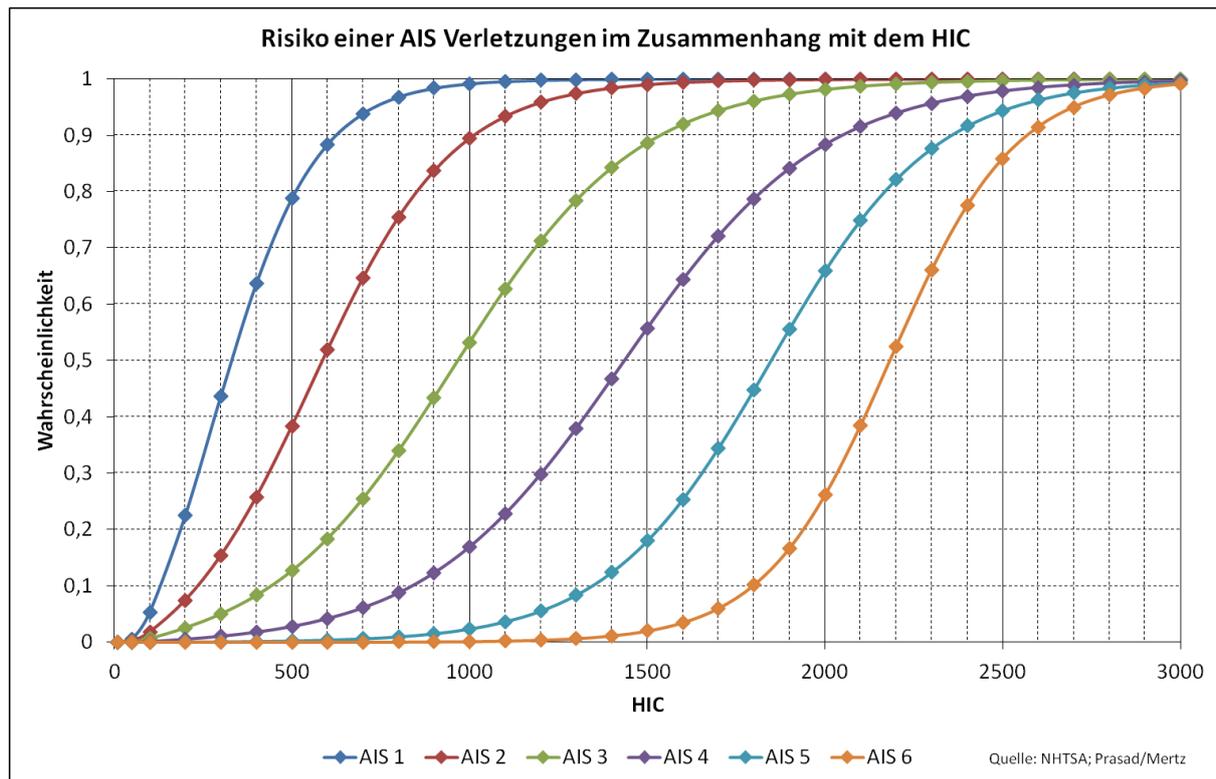
Wie schon in Kapitel 4.2 festgehalten, wird dieser Wert als Maß für die Schwere einer Beschleunigung bei der Beurteilung von Fahrzeurückhaltesystemen herangezogen. Dieser berechnet sich wie folgt:

$$ASI_{(t)} = \left[ \left( \frac{\overline{a_x}}{\hat{a}_x} \right)^2 + \left( \frac{\overline{a_y}}{\hat{a}_y} \right)^2 + \left( \frac{\overline{a_z}}{\hat{a}_z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Dabei stellen  $\overline{a_x}$ ,  $\overline{a_y}$ ,  $\overline{a_z}$  die über 50ms wirkenden mittleren Fahrzeugbeschleunigungen in den Koordinatenrichtungen dar.  $\hat{a}_x$ ,  $\hat{a}_y$ ,  $\hat{a}_z$  sind dabei die zulässigen Grenzwerte der Beschleunigungen in den Koordinatenrichtungen ( $\hat{a}_x = 12g$ ,  $\hat{a}_y = 9g$ ,  $\hat{a}_z = 10g$ .) Die Grenzwerte für den Insassen wurden bereits in Tabelle 6 für Fahrzeurückhaltesysteme und Tabelle 8 für Tragkonstruktionen dargestellt.

**HIC und AIS**

Eine Möglichkeit zur Bewertung der aus der Simulation bzw. aus realen Crashversuchen ermittelten Analyse Kriterien bietet die von Prasad/Mertz entwickelte Risikokurve von HIC und AIS4+ Verletzungen (Abbildung 33). Die weitere Entwicklung der Risikokurven für alle AIS Verletzungen wurde von der NHTSA auf Basis der von Prasad Mertz entwickelten AIS4+ Funktion durchgeführt [20].



**Abbildung 33: Verletzungsrisikofunktion für Kopfverletzungen [4]**

Diese Kurven beschreiben das Risiko einer AIS Verletzung des Kopfes bei bekanntem HIC Wert. Bei einem HIC 1000, der in den aktuellen Crashnormen als Grenzwert angesetzt wurde, liegt die Wahrscheinlichkeit einer schweren (AIS 4) Verletzung bei rund 18%. Dennoch ist mit 50%iger Wahrscheinlichkeit mit einer ernstzunehmenden Verletzung zu rechnen. Diese Kurven berücksichtigen aber nicht die individuellen körperlichen Gegebenheiten jedes einzelnen Menschen, sondern sind standardisiert auf den durchschnittlichen Menschen.

### HIC und ASI

Im Zuge des RISER Projekts (Roadside Infrastructure for Safer European Roads) wurde eine Test- und Simulationsreihe gestartet, um diese Parameter in Zusammenhang zu bringen. Dabei wurden 22 Beispiele generiert und Trend und Korrelation mittels linearer Regression analysiert. Es wurden Anprallszenarien mit einer Kollisionsgeschwindigkeit vom 35 bis 100 km/h und Kollisionswinkel zwischen 5° und 35° simuliert. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen Abbildung 34 und 35. In Abbildung 34 ist dabei die Tendenz des ASI in Abhängigkeit der Kollisionsgeschwindigkeit dargestellt.

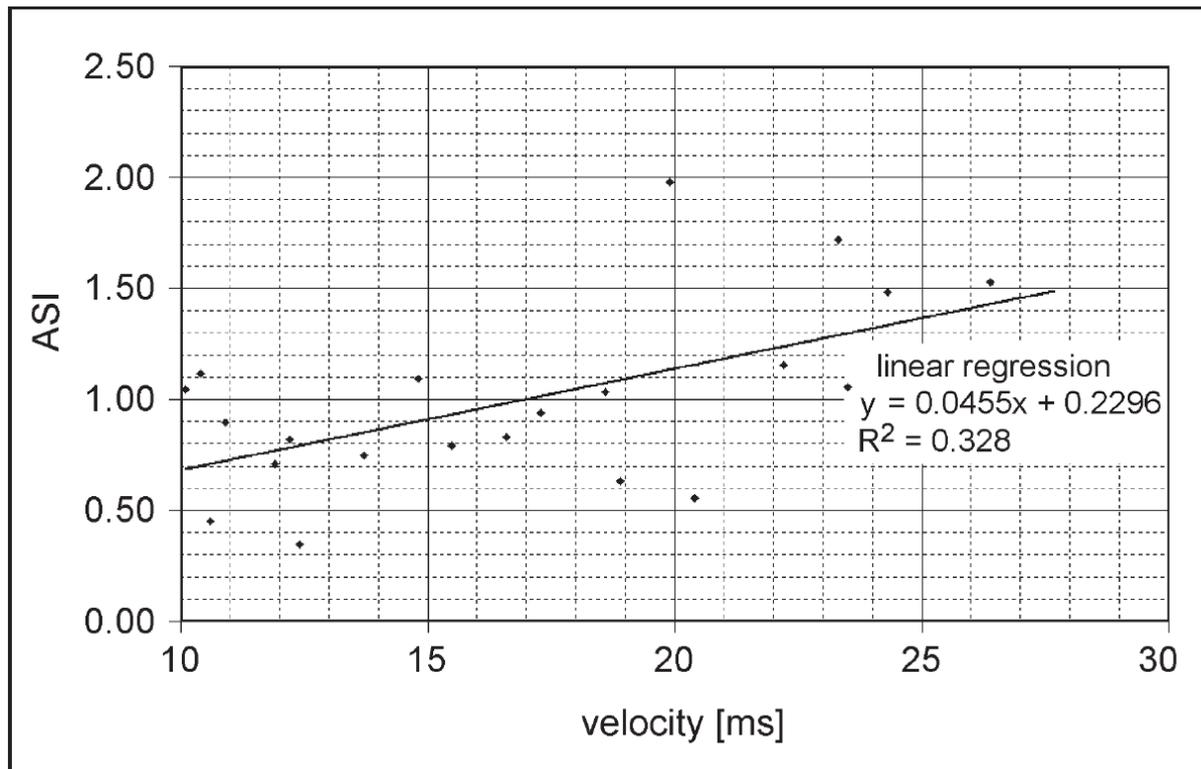


Abbildung 34: Zusammenhang ASI und Geschwindigkeit [7, ]

In weiterer Folge wurden die entsprechenden HIC Werte berechnet und die Beziehung zwischen ASI und HIC (Abbildung 35) abgebildet.

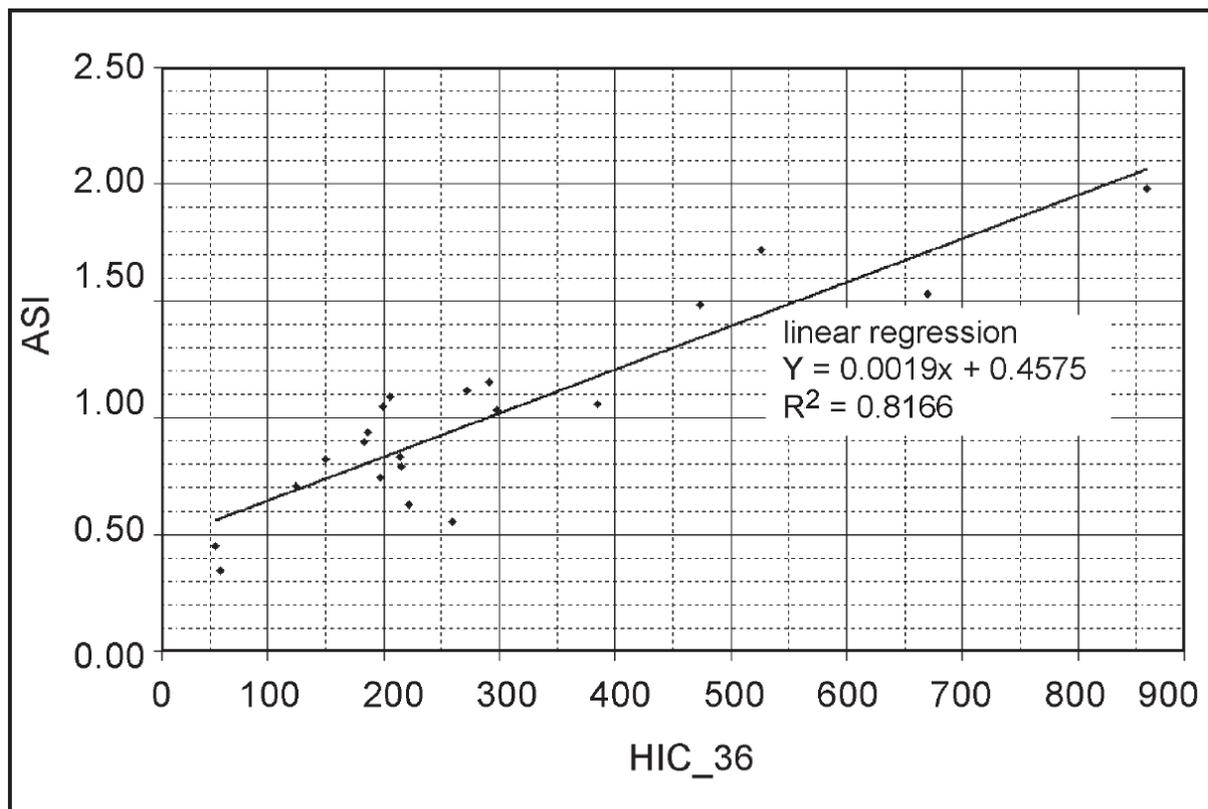


Abbildung 35: Zusammenhang ASI und HIC36 [7, ]

Eine Studie zu diesem Thema wurde ebenfalls von der ETH Zürich durchgeführt. Dabei ergab sich ein nahezu identer Zusammenhang zwischen HIC und ASI. Es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass der HIC Wert in seiner eigentlichen Anwendung nicht für laterale Crashtests (in Anlehnung an EN 1317) als Maß für die Evaluierung eines Verletzungsrisikos ausgelegt ist, da der Kopf in transversaler Richtung nicht so flexibel ist [10, 2003a]. Es wird auch darauf hingewiesen, dass für solche Crashkonfiguration ein neues Limit für den HIC festgelegt werden muss, um reproduzierbare Ergebnisse für ein Verletzungsrisiko zu erhalten.

## 5. VORGEHENSWEISE EINER REALUNFALLREKONSTRUKTION

Für die Durchführung einer Tiefenanalyse ist es notwendig Daten von Realunfällen zur Verfügung zu haben. Die Grundlage bilden dabei Gerichtsakten aus denen Informationen über den Unfallhergang hervorgehen. Mit Hilfe der Simulationssoftware PC Crash kann anhand dieser Informationen der Realunfall abgebildet und relevante Parameter wie zum Beispiel Kollisionsgeschwindigkeit, Abkommenswinkel, Abkommengeschwindigkeit etc. erhoben werden, die für Unfallanalysen von großer Bedeutung sind. Anhand eines Rekonstruktionsbeispiels soll unter vorheriger Behandlung von Grundlagen die Vorgehensweise erklärt werden.

### 5.1 Grundlagen zur Simulation mittels PC Crash

Für die Simulation mittels PC Crash stehen 3 verschiedene Stoßmodelle zur Verfügung: das Kudlich Slibar Modell (oft auch als klassisches – oder Newton'sche Stoßmodell bezeichnet), das steifigkeitsbasierende und das Mesh Modell. Die Annahme eines Stoßes für die Berechnung einer Kollision entspricht zwar nicht der Realität, jedoch unter Berücksichtigung von fachgerechten Anwendungsbedingungen liefern die Modelle gute Ergebnisse [17, 2007]. Nach der Stoßtheorie von Galilei, Huygens und Newton (klassische Stoßtheorie) werden dabei folgende Annahmen getroffen: Die Stoßdauer ist sehr kurz und die Stoßkräfte sehr groß, sodass alle äußeren Kräfte vernachlässigbar klein sind. Fahrzeugbewegungen und Deformationen während des Stoßes werden nicht berücksichtigt [16, 2006b]. Ergänzend zur klassischen Stoßtheorie hat Newton und auch Poisson eine Stoßzahlhypothese aufgestellt, in der die Stoßzahl plastische und elastische Anteile einer Kollision berücksichtigt [16, 2006b].

#### ▪ Die Stoßzahl

Für die Simulation mit dem klassischen Stoßmodell in PC Crash stellt die Stoßzahl ( $\epsilon$  oder  $k$ ) einen der Eingabeparameter dar. Diese beschreibt das Verhalten von zwei Körpern bei einem geraden zentralen Stoß, bei dem die Stoßkräfte entlang einer Linie durch den Schwerpunkt der beiden Körper wirken. Die Stoßzahl beschreibt dabei die Elastizität des

Stoßes in der Restitutions- und Kompressionsphase [16, 2006b]. Den zeitlichen Verlauf der Kräfte einer Kollision zweier Körper zeigt Abbildung 36.

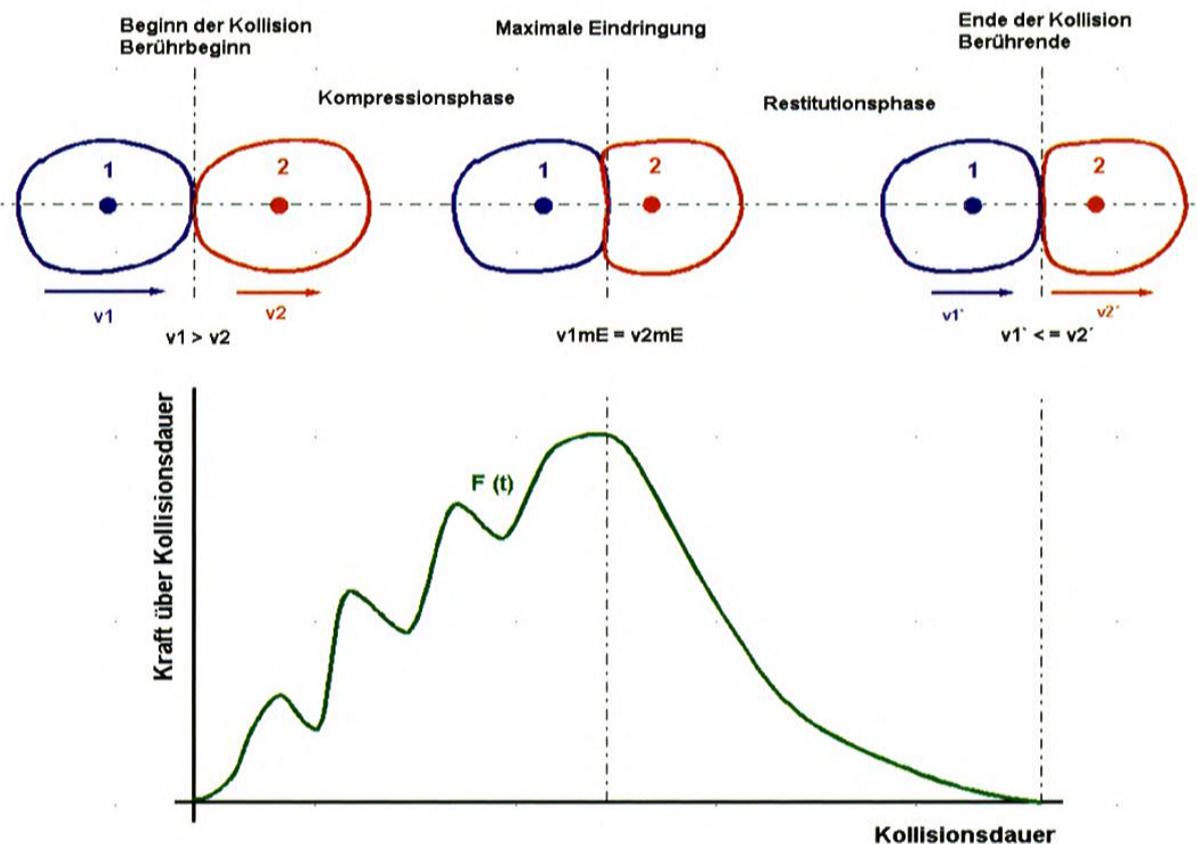


Abbildung 36: Ablauf einer Kollision von zwei Körpern [17, 2007]

Der Stoß wird dabei nach Poisson durch das Verhältnis von Restitution zu Kompression beschrieben. Nach der Definition von Newton wird dieses Verhalten durch die Relativgeschwindigkeiten der Stoßpunkte in Normalrichtung zur Berührebene charakterisiert. Somit ergibt sich für die Stoßzahl:

$$k = \frac{v_{1n}' - v_{2n}'}{v_{2n} - v_{1n}} = \frac{v_1' - v_2'}{v_2 - v_1}$$

$k$  ... Stoßzahl

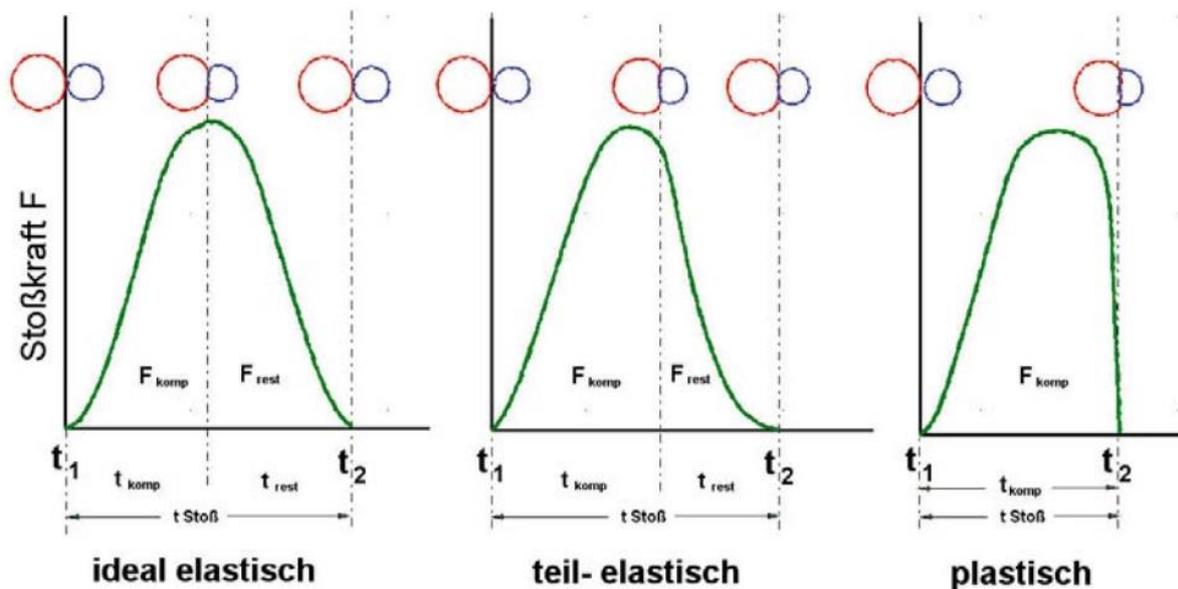
$v_{1n}', v_1'$  ... Geschwindigkeit Fahrzeug 1 nach der Kollision

$v_{2n}', v_2'$  ... Geschwindigkeit Fahrzeug 2 nach der Kollision

$v_{1n}, v_1$  ... Geschwindigkeit Fahrzeug 1 vor der Kollision

$v_{2n}, v_2$  ... Geschwindigkeit Fahrzeug 2 vor der Kollision

Dabei stellen die Grenzwerte  $k=0$  einen vollplastischen Stoß und  $k=1$  einen vollelastischen Stoß dar. Der Verlauf unterschiedlicher Stoßarten ist in Abbildung 37 dargestellt.



**Abbildung 37: Verlauf der Kontaktkraft unterschiedlicher Stoßarten [17, 2007]**

Bei einem ideal elastischen Stoß ist die Kraft in der Kompressionsphase gleich der in der Restitutionsphase. Bei einem Vollplastischen ist der Anteil der Restitutionskraft gleich null.

Bei einer Anwendung der nach Newton definierten Stoßzahl auf starre undeformierbare Objekte vereinfacht sich der Ausdruck. Diese Vereinfachung besitzt dann ihre Gültigkeit, wenn in das Anprallobjekt kein Energieeintrag stattfindet (keine Geschwindigkeitsänderung, unendliche Masse):

$$k = -\frac{v'_1}{v_1}$$

Dabei spielt nur noch die Geschwindigkeit des Fahrzeuges vor und nach der Kollision eine Rolle. Das negative Vorzeichen beschreibt dabei die Richtungsänderung der Geschwindigkeit. Bei einem Anprall gegen ein undeformierbares Hindernis ist die Stoßziffer von der Kollisionsgeschwindigkeit abhängig. Daraus ergibt sich bei niedrigen Anprallgeschwindigkeiten ein beinahe vollelastischer und bei hohen ein nahezu vollplastischer Stoß [16, 2006b].

▪ **EES (Energy Equivalent Speed) und Kollisionsgeschwindigkeit [16, 2006b]**

Betrachtet man die Energiebilanz bei einem Anprall gegen ein starres Hindernis, so lässt sich unter den zuvor getroffenen Annahmen ein einfacher Zusammenhang zwischen EES und Kollisionsgeschwindigkeit ermitteln.

Energiebilanz des Gesamtsystems:

$$E_V = \frac{m_1 * v_1^2}{2}$$

$$E_N = \frac{m_1 * v_1'^2}{2}$$

$$E_{gesV} = E_{1V} + E_{2V}$$

$$E_{gesN} = E_{1V} + E_{2N} + E_{Def1} + E_{Def2}$$

$$E_{gesV} = E_{gesN}$$

$E_V$  ... Energie vor der Kollision

$E_N$  ... Energie nach der Kollision

$m_1$  ... Masse Fahrzeug 1

$E_{gesV}$  ... Gesamtenergie vor der Kollision

$E_{gesN}$  ... Gesamtenergie nach der Kollision

$E_{Def1}$  ... Deformationsenergie Fahrzeug 1

$E_{Def2}$  ... Deformationsenergie Fahrzeug 2

Durch die Annahme, dass kein Energieeintrag in die Mauer stattfindet (unendliche Masse, Geschwindigkeit gleich Null), ergibt sich aus der Energieerhaltung mit der vorher definierten Stoßzahl ( $k < 0.1$ ) der Zusammenhang:

$$E_{Def} = E_{DefFZG} = \frac{m_1 * (v_1^2 - v_1'^2)}{2} = \frac{m_1 * v_1^2 * (1 - k^2)}{2}$$

$$E_{Def} \approx \frac{m_1 * v_1^2}{2}$$

und somit

$$v_1 \approx EES$$

da die gesamte Verformungsenergie nur vom Fahrzeug aufgenommen wird.

$E_{Def}$  ... Gesamtdeformation

*E<sub>DefFZG</sub> ... Deformation Fahrzeug*

*EES ... Energy Equivalent Speed*

Weiters kann nach H. Steffan eine Faustformel für  $1EES \approx 1cm$  Eindringtiefe angegeben werden. Somit stellt die EES in Bezug auf den Validierungsprozess eine Kontrollgröße dar, da an ihr überprüft werden kann, ob die eingegeben Parameter die richtige Größenordnung besitzen.

#### ▪ **Kontaktebene, Stoßpunkt und Kontaktreibung**

Da es sich bei den Anprallobjekten um starre Hindernisse handelt kann die Kontaktebene parallel auf die Oberfläche (Mauer) bzw. im Falle eines kreisförmigen Querschnittes (Baum, Pfahl) tangential auf die Oberfläche gelegt werden [25, 2011b]. Der Stoßpunkt soll sich dabei am Rand des Objektes befinden, da für einen Stoßpunkt innerhalb des Objektes eine Deformation angenommen werden würde. Für die Kontaktreibung wird für solchen Konfigurationen meistens ein Reibungskoeffizient von ca. 0,6 verwendet.

## 5.2 Rekonstruktion eines Realunfalls

Für die Rekonstruktion von diesem Unfall standen folgende Informationen zur Verfügung:

- Verletzungsanzeige
- Verkehrsunfallbericht
- Unfallskizze
- Sachverhalt
- Lichtbildbeilage
- Fahrzeugdaten

#### ▪ **Sachverhalt**

Die Unfalllenkerin kam mit ihrem PKW Opel Meriva laut Augenzeugen am Ende eines annähernd geraden Straßenstücks zunächst auf das rechte Bankett und von dort aus links von der Fahrbahn ab, wo der PKW frontal gegen ein circa 30 cm Starke Fichte prallte. Die

Fahrzeuglenkerin erlag dabei ihren Verletzungen noch an der Unfallstelle. Ihr Beifahrer erlitt dabei schwerste Verletzungen. Der Sicherheitsgurt wurde von Fahrer und Beifahrer verwendet und beide Airbags lösten zum Unfallzeitpunkt aus.

▪ **Lichtbilder vom Unfallgeschehen**

Aus den vorhandenen Lichtbildern können folgende wichtige Informationen für die Rekonstruktion entnommen werden:

- Fahrbahnzustand
- Anprallobjekt
- Beschädigungen/Intrusionen am Fahrzeug
- Anprallrichtung
- Fahrzeug – Endlage
- Schleuderspuren

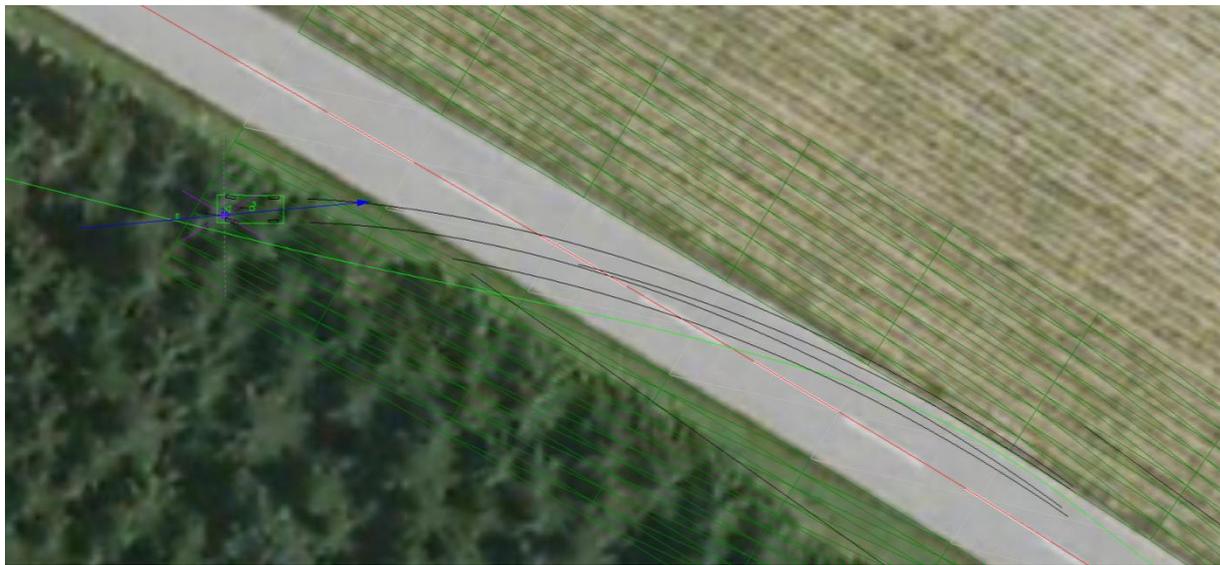


**Abbildung 38: Lichtbildbeilage Verkehrsunfall**

#### ▪ **Rekonstruktion**

Anhand der Ausführungen auf der Unfallskizze (Straßenname, Straßenkilometer, Straßenverlauf, Abmessungen, Anprallobjektposition etc.) kann nun das Unfallgeschehen abgebildet werden. Ergänzend dazu können mit Hilfe von Luftbildern (Geoland [3]) die örtlichen Gegebenheiten (Kurvenradius, Böschung, Fahrbahnbreite etc.) angepasst werden, sofern diese in der Skizze nicht enthalten sind und die genaue Unfallstelle bekannt ist. Da nach Angaben des Unfallberichts eine trockene Asphaltfahrbahn vorlag, wurde der

Reibungskoeffizient für die Fahrbahn mit 0,8 angegeben. Auf Grund der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h wurde dem Fahrzeug diese für eine erste Simulation zugeordnet. Für den Weg, den das Fahrzeug zurücklegt wurde eine Spur vorgegeben, die es zu verfolgen versucht. Dabei wurde darauf geachtet, dass die in der Unfallskizze eingezeichneten und in den Lichtbildaufnahmen abgebildeten Schleuderspuren mit denen der Simulation übereinstimmen und in weiterer Folge auch die dokumentierte Abkommensstelle erreicht. Die Ergebnisse hinsichtlich der Abkommenssituation waren mit dieser Geschwindigkeit schon bereits ausreichend nachgestellt.



**Abbildung 39: Unfallrekonstruktion mit PC Crash, Bildquelle [3]**

Dabei ergab sich von der Abkommensstelle bis zur Kollision ein zurückgelegter Weg von 16,07 Meter. Eine Abkommensgeschwindigkeit von 89,26 km/h und eine Anprallgeschwindigkeit an den Baum mit 85,52 km/h wurden dabei festgestellt. Die Ermittlung des Abkommenswinkels bzw. Geschwindigkeitswinkel erfolgte dabei analog zu Abbildung 16. Der für diesen Unfall (Abbildung 40) ermittelte Abkommenswinkel betrug 49,13 Grad. Für den Geschwindigkeitswinkel ergab sich ein Wert von 17,95 Grad und der aus Abkommens- und Geschwindigkeitswinkel berechnete Wert des Schwimmwinkels ergab 31,18 Grad.

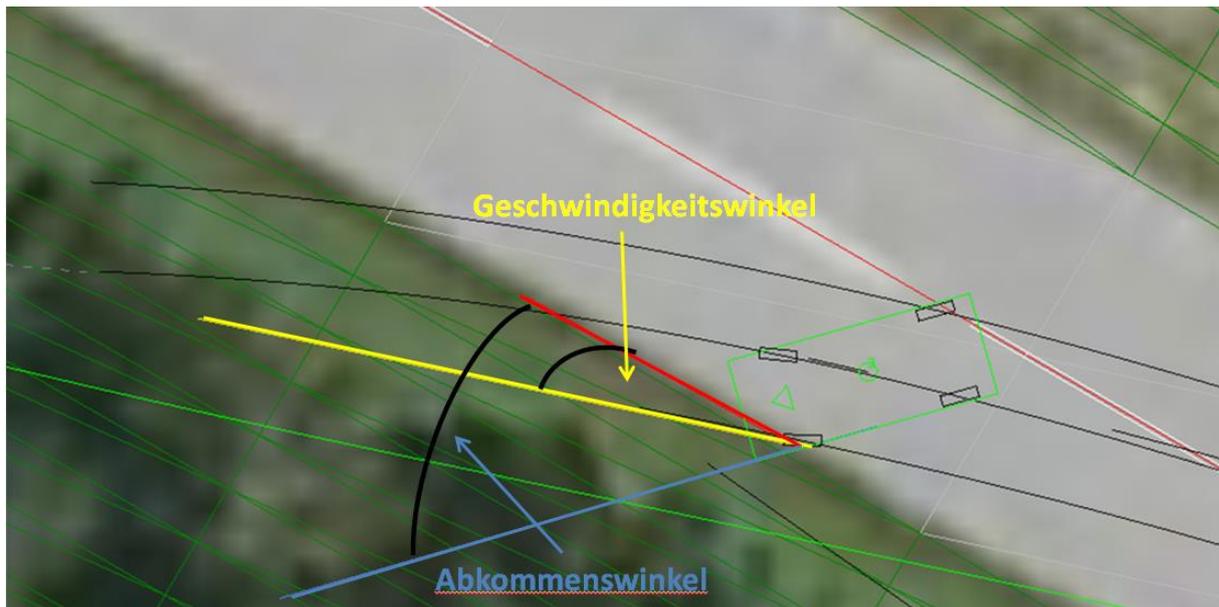


Abbildung 40: Abkommenswinkel, Geschwindigkeitswinkel, Bildquelle [3]

## 6. METHODIK

### 6.1 Fahrzeugbewegungen

#### ▪ Starre Barriere mit 100% Überdeckung

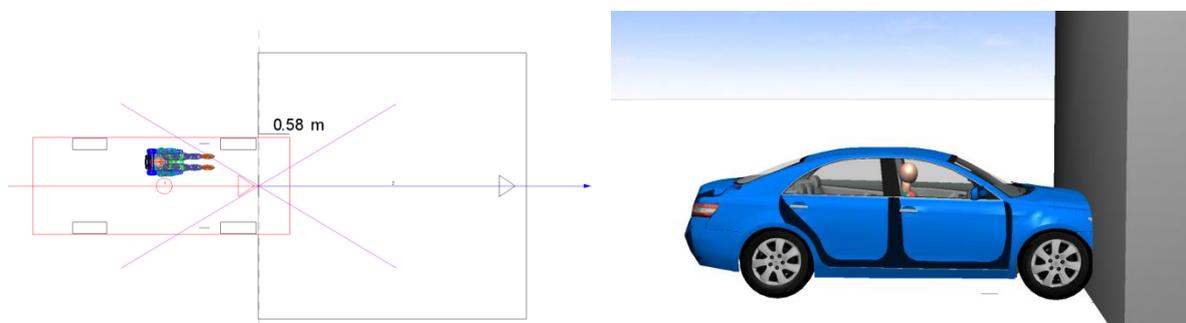
Zur Erstellung des Simulationsmodells wurden Daten von der NHTSA (National Highway Traffic Highway Administration) durchgeführter Crashtests herangezogen. Bei diesem Test wurde das Fahrzeug mit 56,5 km/h gegen eine starre undeformierbare Barriere gefahren und die Belastungen eines Hybrid III 50% Male Dummies aufgezeichnet.

Tabelle 12 zeigt Ausschnitte der Daten bzw. Ergebnisse eines nach US NCAP Richtlinien durchgeführten Frontcrashtest.

**Tabelle 12: Auszug der Crashtest No 5112[4]**

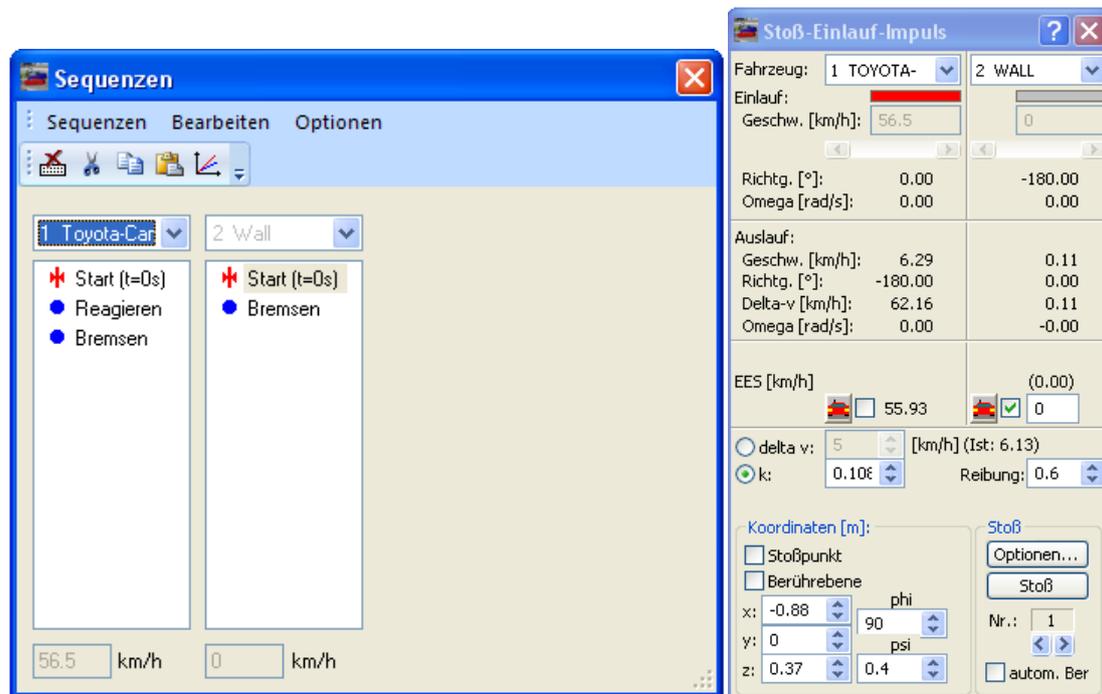
Fahrzeug : Toyota Camry LE 4-DR Sedan 2010	
Testgewicht	1705.1 kg
Kollisionsgeschwindigkeit	56.5 km/h
Geschwindigkeitsänderung	62.1 km/h
maximale Beschädigung	580 mm
HIC 15	349

Anhand dieser Daten wurde der Realtest mithilfe der Simulationssoftware PC Crash nachgestellt. Da PC Crash eine umfangreiche Fahrzeugdatenbank besitzt kann das Fahrzeug entsprechend der vorhandenen Daten des Realtests daraus übernommen werden, und sofern Abweichungen der Spezifikationen wie zum Beispiel Fahrzeugmasse oder Abmessungen vorhanden waren, diese auf Realtestbedingungen abgeglichen werden.



**Abbildung 41: Simulationsaufbau starre Barriere, 100% Überdeckung**

Dabei wurde das Fahrzeug wie in Abbildung 41 ersichtlich in den Stoßpunkt gestellt und die Kollisionsgeschwindigkeit durch die Vorgabe einer Sequenz in diesem Punkt auf die, dem Realtest entsprechenden 56,5 km/h vorgegeben (Abbildung 42).



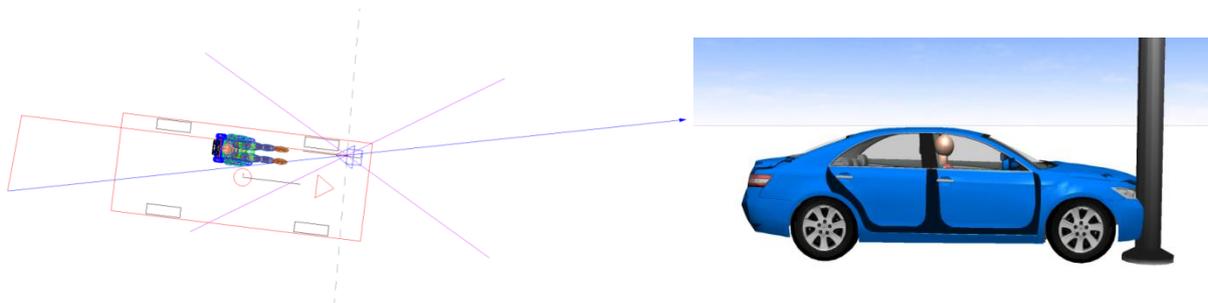
**Abbildung 42: Sequenzen und Stoß**

Für das verwendete Berechnungsmodell ist dabei, wie in Kapitel 5 bereits beschrieben, die Stoßzahl  $k$  der entscheidende Eingabeparameter. Durch die Variation von  $k$  verändert sich dementsprechend die Auslaufgeschwindigkeit und somit auch die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung die im Crashtest einen Wert von 62,2 km/h ergab. Eine weitere wichtige Eingabegröße stellt in diesem Zusammenhang die Stoßpunkthöhe dar, da dieser Wert einen entscheidenden Einfluss auf den Bewegungsablauf des Fahrzeuges hat. Um diesen Parameter die richtige Größenordnung zuordnen zu können, wurde auf die Videoaufzeichnung des durchgeführten Crashtests zurückgegriffen um die Fahrzeugbewegung realistisch abbilden zu können. Durch Variation der beiden Parameter ergab sich bei einer Stoßzahl von  $k = 0,108$  und einer Stoßpunkthöhe von  $z = 0,37\text{m}$ , wie in Abbildung 42 ersichtlich, nahezu der gleiche Wert für die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung. Für die undeformierbare Barriere wurde lediglich eine sehr große Masse angegeben und im Stoß Einlauf Impuls Fenster eine EES von 0 angegeben, da diese laut Definition keine Energie aufnimmt. Betrachtet man die berechnete EES des

Fahrzeugs und vergleicht diese mit der Kollisionsgeschwindigkeit kann man feststellen, dass die beiden Werte nahezu ident sind. Somit kann, wie in Kapitel 5 bereits festgehalten, sichergestellt werden, dass die eingegeben Parameter die richtige Größenordnung besitzen.

- **Pfahlanprall mit 10% Offset**

Die zuvor beschriebene Methodik wurde mit gleichem Vorgehen auch für den Fall eines Anpralls gegen einen Pfahl durchgeführt. Dabei wurde ein Toyota Yaris 4-DR Sedan 2010, wie in Abbildung 43 ersichtlich, mit 56,1 km/h gegen einen Pfahl mit einem Durchmesser von 254mm gefahren. Der Test wurde mit einem Offset von 10% zur linken Fahrzeugseite durchgeführt und ergab für den Dummy einen HIC 15 von 252,3. Diese Daten stammen ebenfalls von der NHTSA (Test No RA5133).



**Abbildung 43: Simulationsaufbau Pfahl, 10% Offset**

## 6.2 Insassenmodell

Für die Simulation der Insassenbewegung wurde das in PC Crash implementierte Dummymodell als Basis herangezogen. Dabei handelt es sich um ein Mehrkörpersystem bestehend aus Ellipsoiden, die mit Gelenken verbunden sind. Für die Simulation von Rückhaltesysteme werden in diesem Modell Feder-Dämpfersysteme verwendet.

Dabei wurden im ersten Schritt die Grunddaten (Größe und Gewicht) entsprechend eines Hybrid III 50% Male Dummy angegeben. Daten der Positionierung des Dummys im Fahrzeug, sowie Winkel wurden entsprechend der Testdokumentation der NHTSA entnommen und wie in Abbildung 44 ersichtlich eingegeben.

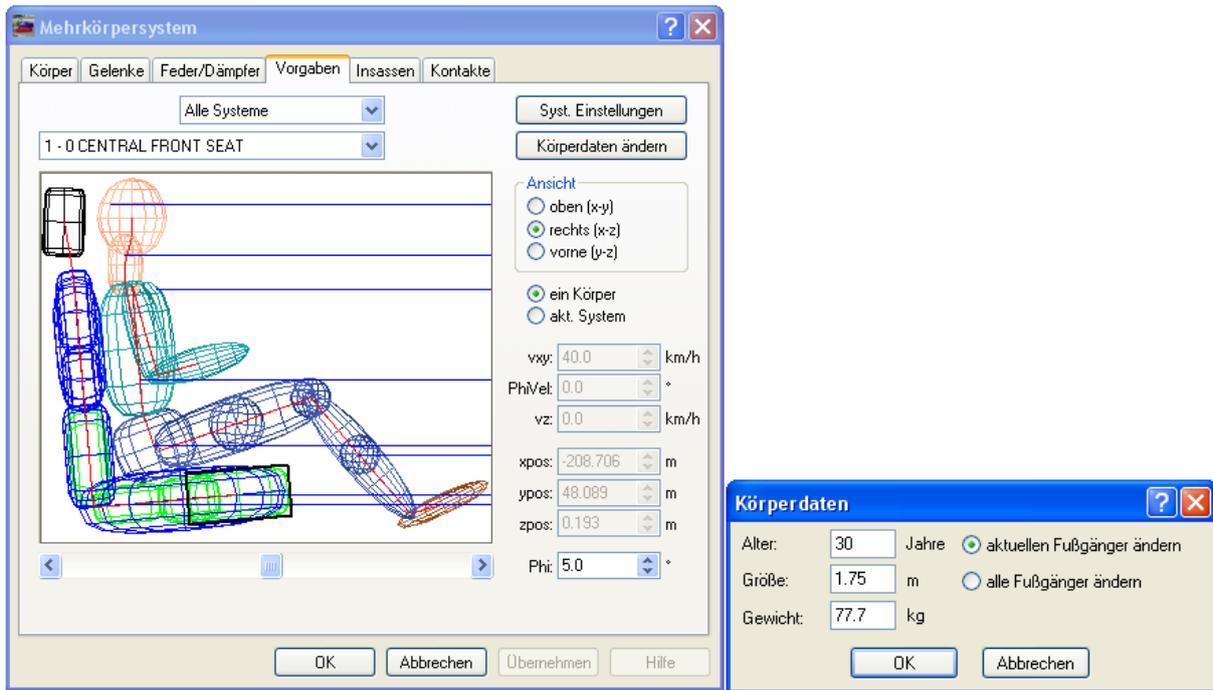


Abbildung 44: Grundeinstellungen des Mehrkörpersystems

Für die Modellierung von Rückhaltesystemen bietet PC Crash die Möglichkeit Feder Dämpfer Systeme einzubinden um einen angegurten Insassen simulieren zu können (Abbildung 45).

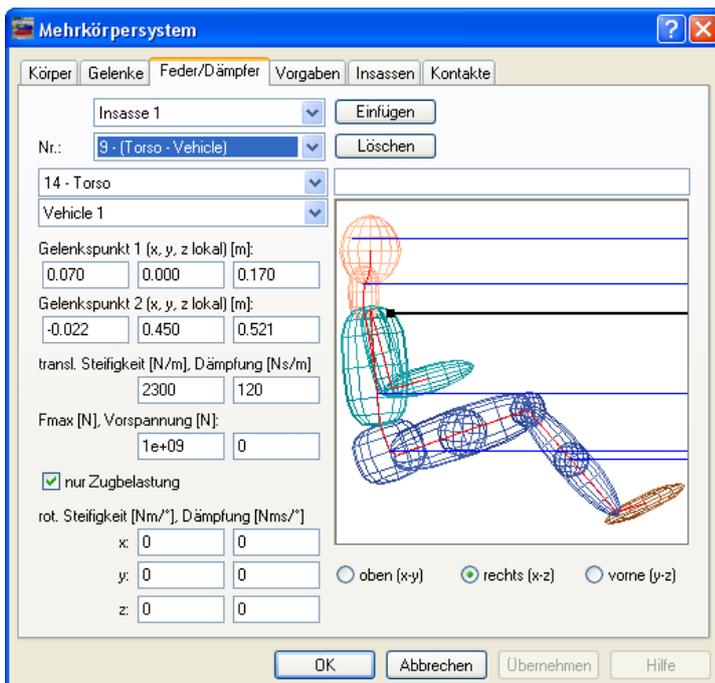


Abbildung 45: Parameter der Rückhaltesysteme

Nach Eingabe aller oben genannten Grunddaten wurde eine Simulationsreihe gestartet und die Parameter der Feder Dämpfer Systeme (translatorische Steifigkeit, Dämpfung, Vorspannung) variiert, bis sich ein realistischer Bewegungsablauf des Dummymodells einstellte und der Beschleunigungsverlauf des Kopfes dem des Crashtests entsprach.

### 6.3 Generierung von Unfallszenarien

Für die Simulation der möglichen Verletzungsschwere wurde ausgehend von den zwei zuvor gewählten Anprallsituationen (starre Barriere, Pfahl) durch Variation der Kollisionsgeschwindigkeit neue Unfallszenarien generiert. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass diese Generierung auf dem bereits validierten Simulationsmodell basiert (siehe Kapitel 7), um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Für die entsprechenden Crashkonfigurationen in Abbildung 41 und Abbildung 43 wurde dabei die Anprallgeschwindigkeiten des Fahrzeuges in einem Bereich von 50 km/h bis 100 km/h variiert und die Insassenbewegung für die jeweilige Anprallgeschwindigkeit simuliert. Dabei wurden die Kopfbeschleunigungen des Dummymodells aufgezeichnet und die dazugehörigen HIC Werte berechnet. Die Ergebnisse der einzelnen Anprallgeschwindigkeiten und Kopfbeschleunigungen bzw. die errechnete HIC 36 Werte sind in Anhang A und Anhang B dokumentiert.

## 7. VALIDIERUNG DES SIMULATIONSMODELLS

Das erstellte Simulationsmodell wurde entsprechend der vorhandenen Daten der resultierenden Kopfbeschleunigung des Realtests überprüft. Die resultierende Kopfbeschleunigung der Simulation wurden mit den Testdaten verglichen und der dazugehörige HIC 36 mittels des Datenanalyseprogramms Diadem berechnet. Dabei ergaben sich die in Tabelle 13 dargestellten Werte. Die Abweichungen vom Realversuch betragen für den Fall der starren Barriere mit 100% Überdeckung 3,56% und für den Fall des Pfahlanpralls 4,67%.

**Tabelle 13: Vergleich der Testdaten mit der Simulation**

HIC 36 Real - Simulation			
	Real	Simulation	Abweichung [%]
starre Barriere, 100% Überdeckung	428,6	443,9	3,56
Pfahl, 10% Offset	433,7	453,9	4,67

Abbildung 46 und 47 zeigen die Beschleunigungsverläufe des Kopfes für die beiden Simulationsmodelle im Vergleich zu den aus dem Test vorhandenen Verläufe. Dabei sei angemerkt, dass der Grund für den raschen Beschleunigungsanstieg am Beginn der Simulationskurven nicht verifiziert werden konnte. Auch in der Simulationsanimation konnten keine Bewegungen festgestellt werden, worauf dieser rasche Anstieg zurückzuführen wäre. Eine Beeinflussung der berechneten HIC 36 Werte konnte durch diesen Verlauf nicht festgestellt werden. Im Realtest zeigt sich auch ein etwas langsamerer Anstieg der Beschleunigung, der darauf zurückzuführen ist, dass Verformungen am Fahrzeug entstehen, die im Simulationsmodell auf Grund des Berechnungsverfahrens nicht berücksichtigt wurden.

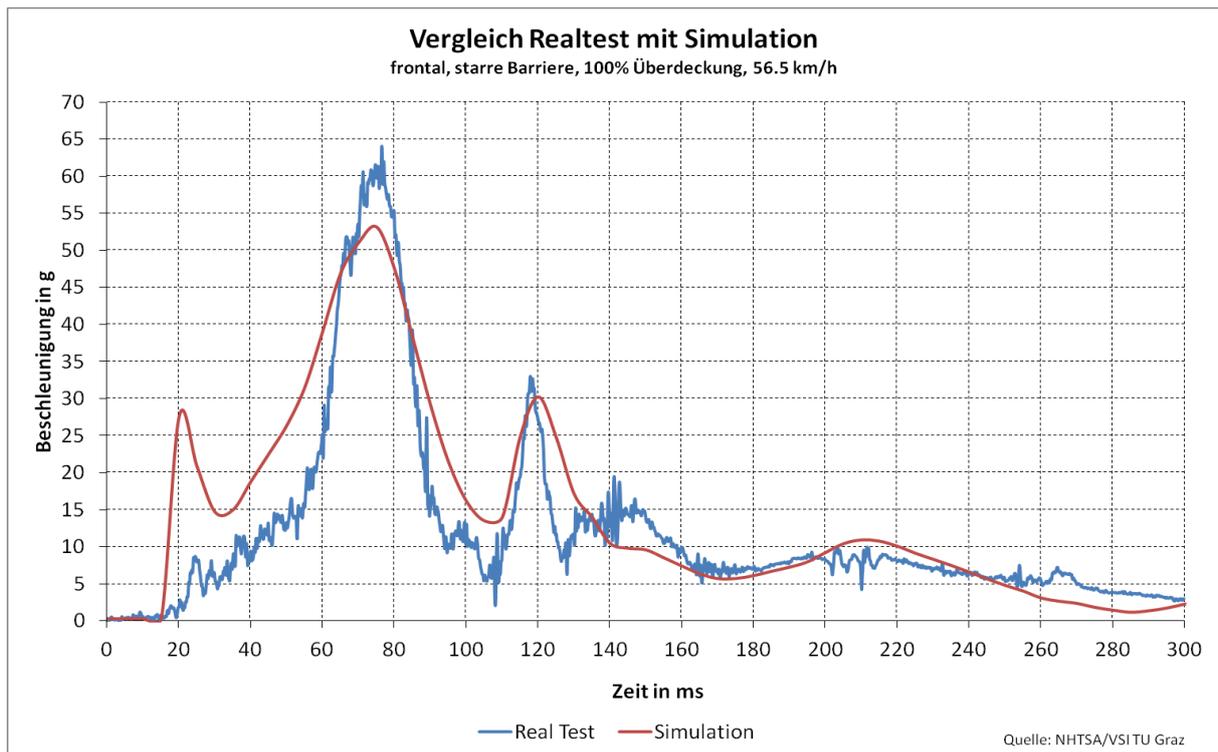


Abbildung 46: Validierungsergebnis starre Barriere, 100% Überdeckung

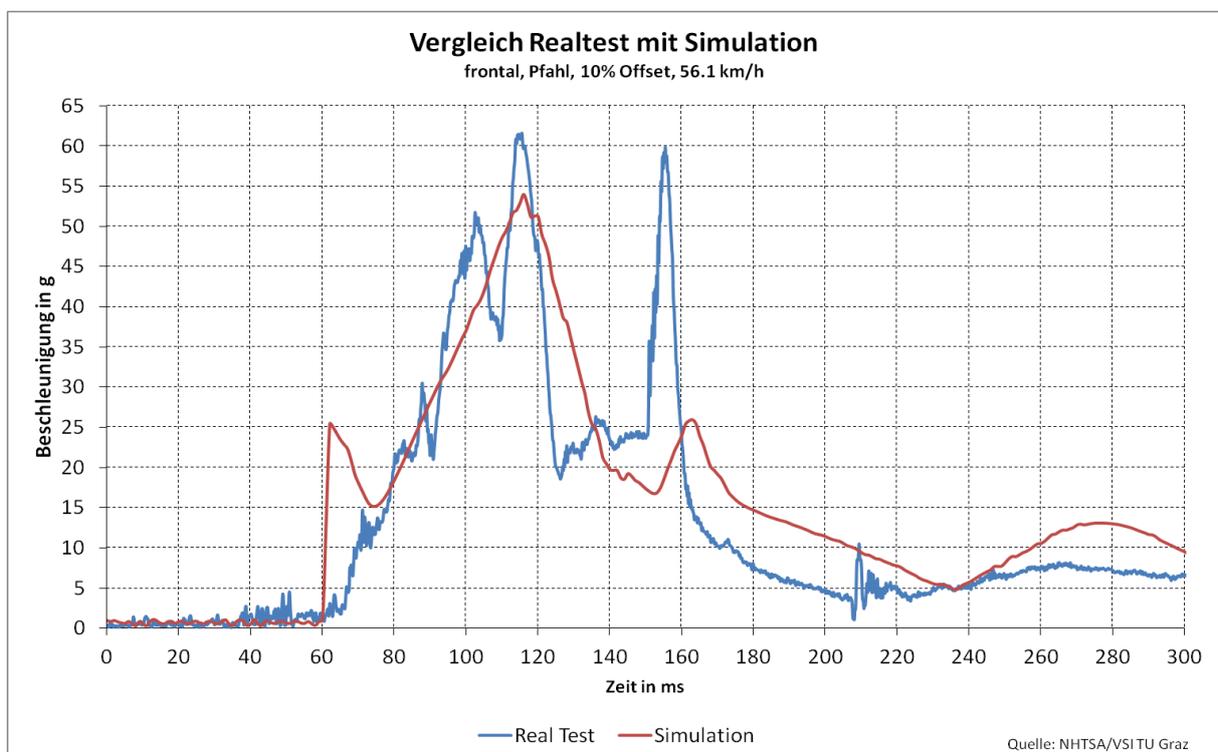


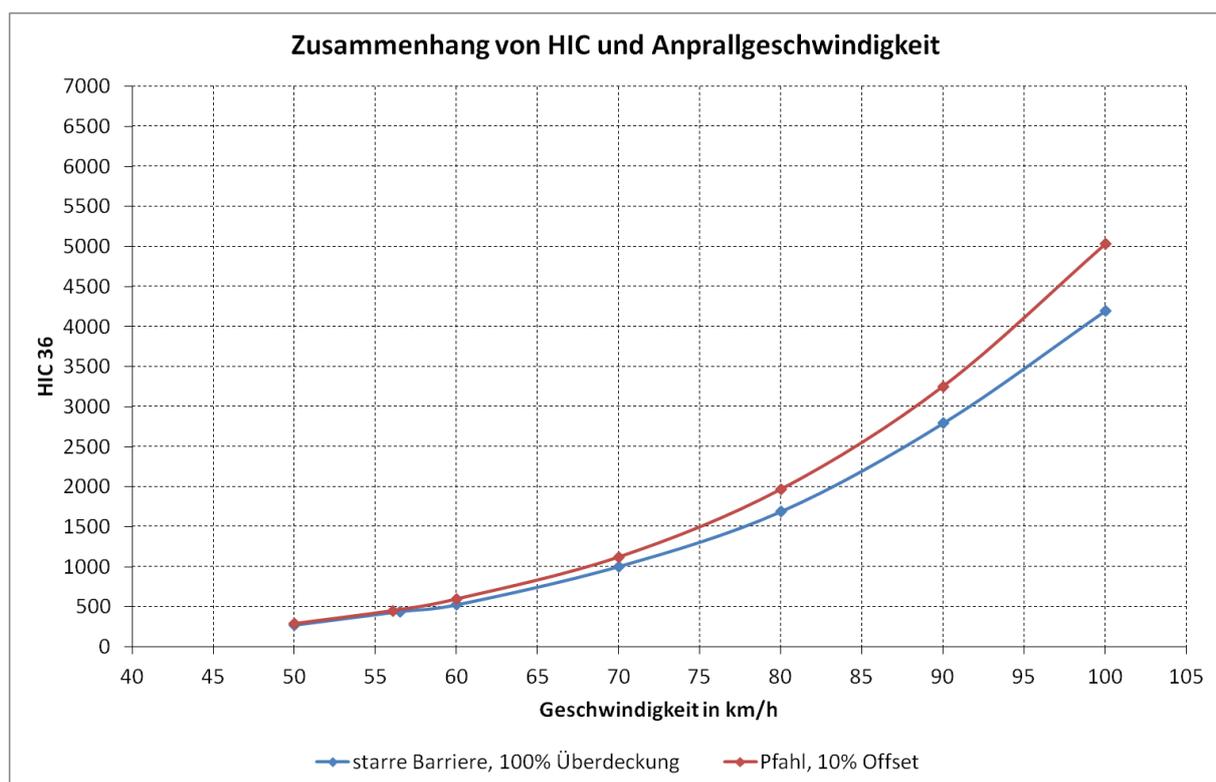
Abbildung 47: Validierungsergebnis Pfahl, 10% Offset

## 8. ERGEBNISSE

Die Auswertung der aus der Simulation erhaltenen Ergebnisse erfolgte hinsichtlich des Verletzungsrisikos durch die Kollisionsgeschwindigkeit, des Gefährdungspotentials in Bezug auf Objektabstände zur Fahrbahn und einer mögliche Reduzierung der Verletzungsschwere durch Fahrzeugrückhaltesysteme.

### 8.1 Verletzungsrisiko und Kollisionsgeschwindigkeit

Aus den von den generierten Unfallszenarien gewonnenen Kopfbeschleunigungen wurde der HIC 36 berechnet und dieser in Zusammenhang mit der Anprallgeschwindigkeit gebracht. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 48 dargestellt.



**Abbildung 48: Simulationsergebnis unterschiedlicher Kollisionsgeschwindigkeiten**

Der in den aktuellen Crashtest Gesetzen und den Verbraucherschutztests festgelegte Grenzwert von HIC 1000 würde dabei bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 67,7 km/h (starre Barriere) und 69,8 km/h (Pfahl) erreicht werden.

Um nun eine Aussage über die mögliche Verletzungsschwere der beiden Konfigurationen in Abhängigkeit von der Kollisionsgeschwindigkeit treffen zu können, wird auf den in Abbildung 33 dargestellten Zusammenhang von HIC und AIS zurückgegriffen. Dabei wurde ausgehend von den aus der Simulation gewonnenen HIC 36 Werten (Abbildung 48) bei unterschiedlichen Kollisionsgeschwindigkeiten, die entsprechenden Eintrittswahrscheinlichkeiten unterschiedlicher AIS Verletzungen aus Abbildung 33 abgelesen und in Tabelle 14 für die Anprallkonfiguration an eine starre Barriere mit 100% Überdeckung übertragen. Bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 70 km/h errechnete sich dabei ein HIC 36 von 1007 und würde bedeuten, dass mit 99% Wahrscheinlichkeit eine AIS 1 Verletzung auftritt, mit 89,7% eine AIS Verletzung usw.

**Tabelle 14: Verletzungsrisiko starre Barriere**

v kollision	HIC 36	Wahrscheinlichkeit in %					
		AIS 1	AIS 2	AIS 3	AIS 4	AIS 5	AIS 6
50	275,84	38,45	13,22	4,36	0,94	0,06	0,00
56,5	443,9	71,00	31,09	10,08	2,21	0,17	0,00
60	529,45	82,06	42,24	14,18	3,16	0,27	0,01
70	1006,05	99,18	89,75	53,83	17,25	2,41	0,12
80	1692,12	99,99	99,62	94,19	71,52	33,64	5,74
90	2793,29	100,00	100,00	99,90	99,21	98,35	96,98
100	4196,29	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

In Tabelle 15 wurden unter gleichem Vorgehen die Eintrittswahrscheinlichkeiten von AIS Verletzungen für den Pfahlanprall mit 10% Offset dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass das Verletzungsrisiko aller AIS Verletzungen geringfügig größer ist als das bei der starren Barriere.

Tabelle 15: Verletzungsrisiko Pfahl

v kollision	HIC 36	Wahrscheinlichkeit in %					
		AIS 1	AIS 2	AIS 3	AIS 4	AIS 5	AIS6
50	289,11	41,28	14,36	4,71	1,02	0,07	0,00
56,1	453,98	72,52	32,35	10,51	2,30	0,18	0,00
60	597,34	88,16	51,51	18,20	4,16	0,37	0,01
70	1121,69	99,62	93,99	64,67	24,21	3,97	0,23
80	1968,87	100,00	99,90	97,88	87,09	62,83	22,84
90	3254,69	100,00	100,00	99,98	99,84	99,77	99,77
100	5031,77	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

## 8.2 Abstand der Objekte zum Fahrbahnrand

Basierend auf die im Kapitel Tiefenanalyse erhobenen Daten, wurden für die weiteren Auswertungen Annahmen in Bezug auf die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens getroffen. Für die Erarbeitung eines Gefahrenbereichs wurde ein Geradenstück angenommen. Die Beschaffung der Fahrbahnumgebung wurde als gerade Fläche mit einem Reibungskoeffizienten von 0,3 festgelegt. Dieser Wert entspricht der Bodenbeschaffenheit einer nassen Wiese [17, 2007]. Die dadurch maximal erreichbare Verzögerung entspricht dabei einem Wert von  $2,91\text{m/s}^2$  und wurde als Reaktion des Fahrers an der Abkommensstelle angenommen. Auf Grund der hohen Anteile an Abkommenswinkel unter 10 Grad wurde für die weitere Auswertung ein Winkel von 5 bzw. 8 Grad gewählt. Einen Aufschluss über die Ermittlung der Normalabstände der Objekte soll Abbildung 49 geben.

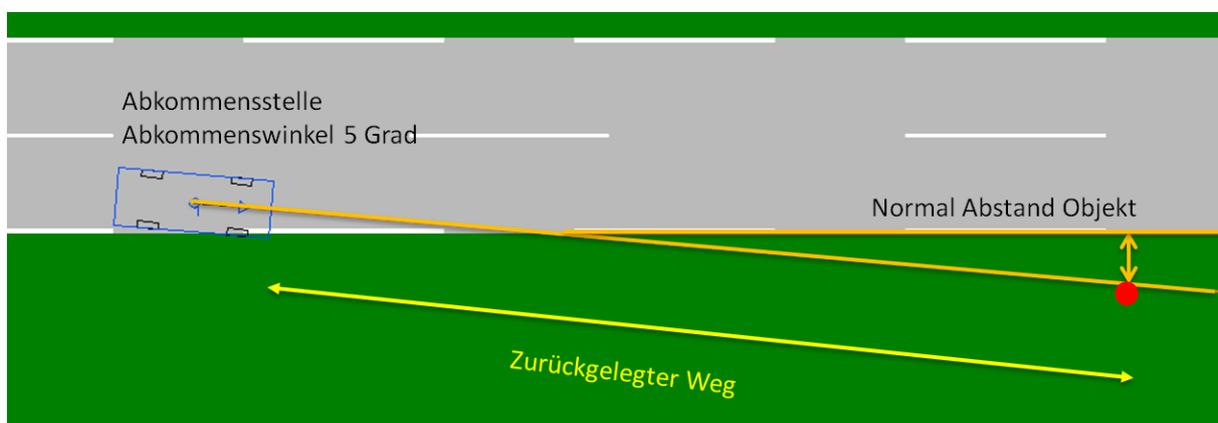


Abbildung 49: Normalabstände der Objekte

Der Normalabstand des Objektes ergibt sich dabei aus dem einfachen Zusammenhang

$$d = \sin \alpha * x.$$

Der zurückgelegte Weg des Fahrzeuges abseits der Fahrbahn wurde dabei durch Anwendung der zeitfreien Gleichung in Abhängigkeit der Abkommensgeschwindigkeit berechnet:

$$v = \sqrt{v_0 - 2 * a_b * s}$$

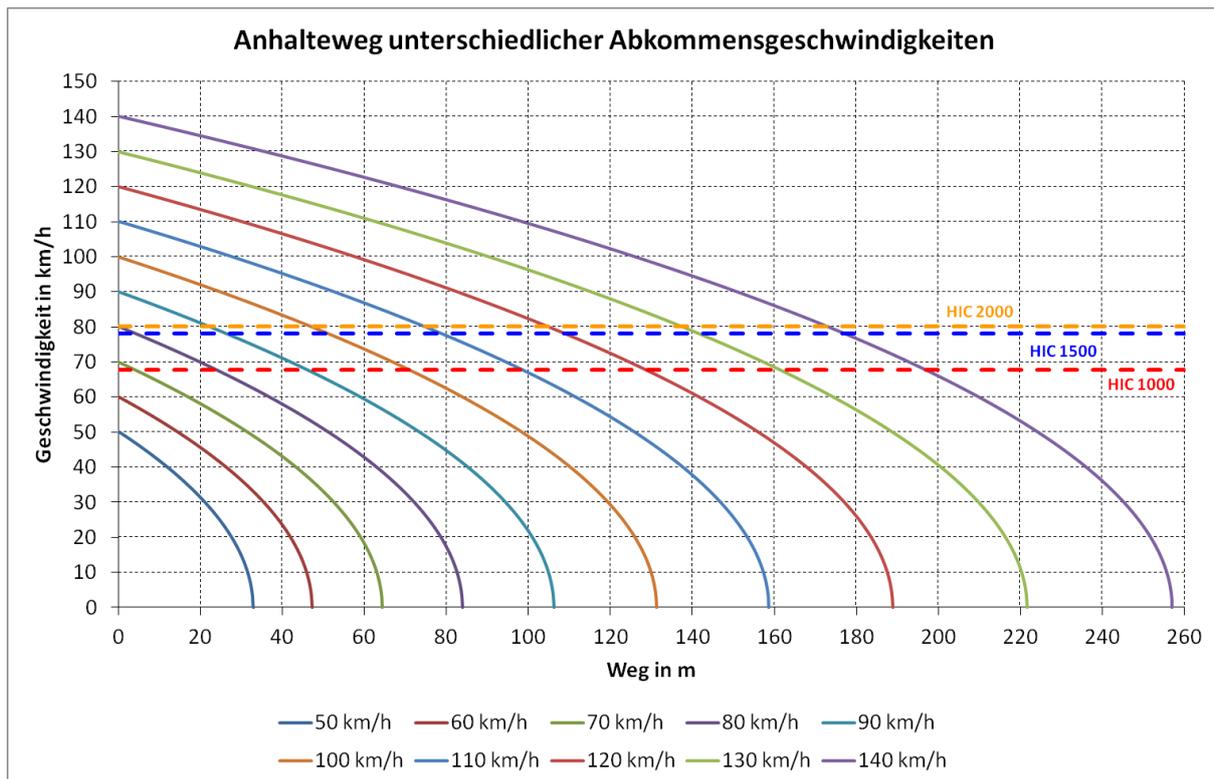
*v ... Geschwindigkeit*

*v<sub>0</sub> ... Anfangsgeschwindigkeit*

*a<sub>b</sub> ... Bremsverzögerung*

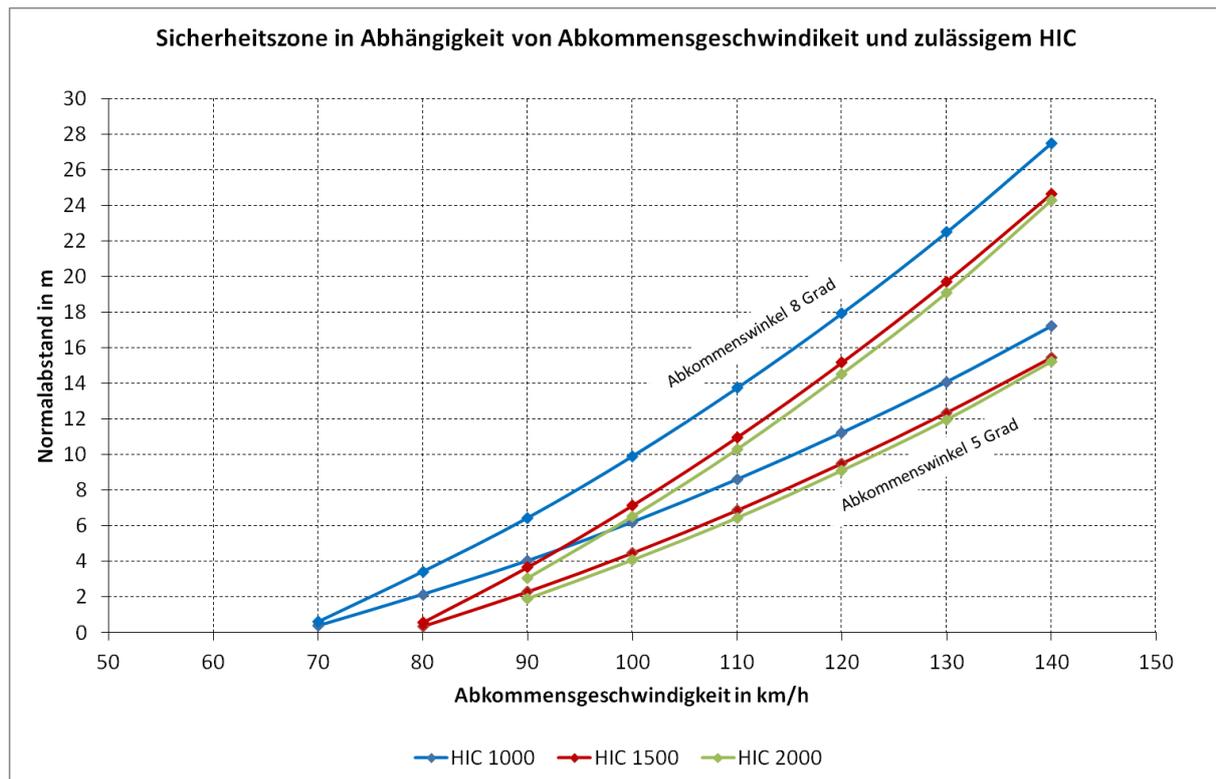
*s ... Weg*

Abbildung 50 zeigt den Weg bis zum Stillstand des Fahrzeuges unter Berücksichtigung unterschiedlicher Abkommensgeschwindigkeiten. Mit dem Zusammenhang von HIC und Anprallgeschwindigkeit in Abbildung 48 wurden Grenzggeschwindigkeiten für unterschiedliche HIC Werte ermittelt und in Abbildung 50 übertragen. Dabei ergaben sich für HIC 1000 67,7 km/h, für HIC 1500 78 km/h und für HIC 2000 80,2 km/h. Durch das Einzeichnen dieser Geschwindigkeiten kann man nun den zurückgelegten Weg bis zum Erreichen des entsprechenden HIC Wertes ablesen.



**Abbildung 50: Anhalteweg unterschiedlicher Abkommensgeschwindigkeiten**

Der zurückgelegte Weg bis zum Erreichen dieser Grenzgeschwindigkeit ist dabei ausschlaggebend für die Dimensionierung einer Sicherheitszone. In Abhängigkeit des Abkommenswinkels ergeben sich daraus für unterschiedliche Abkommensgeschwindigkeiten die Abstände der Objekte bzw. eine theoretische Sicherheitszone. Im Falle einer Kollision mit einem Objekt, würde das zu Verletzungen äquivalent der zuvor zugelassenen HIC Werte führen. Für die drei zuvor festgelegten HIC Werte wurde der Normalabstand der Objekte für 8 und 5 Grad entsprechend Abbildung 49 berechnet und über der Abkommensgeschwindigkeit abgebildet. Daraus ist ersichtlich, dass zum Beispiel bei einer Abkommensgeschwindigkeit von 100 km/h und einem Abkommenswinkel von 5 Grad ein Objekt mindestens 5 Meter entfernt sein müsste um den Grenzwert HIC 1000 nicht zu überschreiten. Analog dazu müsste bei 8 Grad Abkommenswinkel ein Abstand von mindestens 8 Meter vorhanden sein (Abbildung 51).



**Abbildung 51: Theoretische Sicherheitszone**

Eine Sicherheits- oder Auslaufzone neben der Fahrbahn würde bei entsprechender Gestaltung eine Kollision eventuell komplett verhindern, bzw. würde es zumindest zu einer Verringerung der Kollisionsgeschwindigkeit führen. Da die Kollisionsgeschwindigkeit unmittelbar mit einer Verletzungsgefahr verbunden ist, könnte dadurch auch die Verletzungsschwere bei einem Anprall reduziert werden.

### 8.3 Reduktion der Verletzungsschwere durch Fahrzeugrückhaltesysteme

Ein weiterer Anhaltspunkt ist eine Reduktion der Schwere durch ein durchgängiges Leitschienenetz. Um eine Aussage über eine mögliche Verletzungsschwerereduktion treffen zu können, muss ein Zusammenhang zwischen ASI und HIC hergestellt werden.

Basierend auf den Zusammenhang in Abbildung 34 und 35 wurden mit Hilfe der angegebenen linearen Regression aus den Anprallgeschwindigkeiten der ASI und in weiterer Folge der HIC berechnet. Analog zu Punkt 8.1 wurden für die jeweiligen HIC Werte die Wahrscheinlichkeiten eine AIS Verletzung aus Abbildung 33 abgelesen und in Tabelle 16 dargestellt. Dadurch kann nun eine theoretische Verletzungsreduktion der in dieser Arbeit

untersuchten Anprallsituationen angegeben werden. Die Anwendung dieses Zusammenhanges würde aber bedeuten, dass nur AIS 1 und AIS 2 Verletzungen mit hoher Wahrscheinlichkeit auftreten würden.

**Tabelle 16: Theoretische Verletzungsreduktion**

Geschwindigkeit in km/h	ASI	HIC	Wahrscheinlichkeit in %					
			AIS 1	AIS 2	AIS 3	AIS 4	AIS 5	AIS 6
50	0,86	212,7	25,08	8,32	2,83	0,61	0,04	0,00
60	0,99	279,2	39,31	13,57	4,47	0,96	0,07	0,00
70	1,11	345,7	53,27	19,83	6,41	1,39	0,10	0,00
80	1,24	412,2	65,76	27,18	8,76	1,91	0,14	0,00
90	1,37	478,7	76,06	35,57	11,65	2,57	0,21	0,00
100	1,49	545,3	83,69	44,41	15,06	3,38	0,29	0,00

Auf Grund der in Punkt 4.3.3 behandelten Einschränkungen dieser Bewertung kann an dieser Stelle daher auch keine genaue Aussage über eine mögliche Reduktion der Verletzungsschwere getroffen werden. Die in Tabelle 16 dargestellten Werte zeigen daher nach Stand der Technik nur eine Schätzung der möglichen Verletzungen. Um eine genaue Vorhersage treffen zu können, müssten weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

## 9. EINSCHRÄNKUNGEN

Für die Simulation der Verletzungsschwere wurde, wie in Kapitel 5 schon erwähnt, das klassische Stoßmodell verwendet. Dadurch mussten diverse auf Literatur gestützte Annahmen getroffen werden. Verformungen am Fahrzeug werden durch dieses Berechnungsmodell nicht berücksichtigt, die jedoch in realen Unfallgeschehen Auswirkungen auf Fahrzeug und Insassenbeschleunigung haben. Des Weiteren wurde zur Insassensimulation das in PC Crash implementierte Dummy Modell verwendet. Der Dummy wurde entsprechend dem Versuchsaufbau ideal positioniert, und eine eventuell auftretende Out Of Position Konfiguration wurde nicht berücksichtigt, ebenso wie mögliche Kontakte des Insassen mit dem Fahrzeuginnenraum. Dementsprechend ergeben sich die theoretisch erreichbaren Kopfbeschleunigungen. Dieses Modell besitzt auch keinen Airbag und somit musste dieser mit Hilfe von einem Feder Dämpfer Modell nachgebildet werden. Gleiches gilt für den Sicherheitsgurt. Da jedoch dieses Modell basierend auf einen Realtest und nach Stand der Technik validiert wurde, ist die Aussagekraft der Ergebnisse gegeben.

Zur Untersuchung einer theoretischen Sicherheitszone sei angemerkt, dass dabei von einem Anprall an ein Objekt ausgegangen wurde, da als Ziel dieser Arbeit auch eine Abschätzung der Verletzungsschwere definiert worden ist. Dabei wurde nur eine Bremsverzögerung auf gerader Fläche mit  $2,9 \text{ m/s}^2$  entsprechend der maximal erreichbaren Verzögerung auf einer Wiese mit  $\mu = 0,3$  angegeben.

## 10. ZUSAMMENFASSUNG

Im Zuge dieser Arbeit wurden mit Hilfe von Daten der Statistik Austria und ZEDATU Verkehrsunfälle auf Autobahnen und Schnellstraßen analysiert und das Problemfeld immer weiter eingegrenzt um Anprallobjekte zu identifizieren. Diese Unfälle können nach dem Unfalltypenkatalog der Statistik Austria den Alleinunfällen zugeordnet werden die 43,74% aller Unfälle ausmachen und ein erhöhtes Risiko von 1,2 aufweisen tödlich zu verunglücken. Dabei wurde festgestellt, dass in 93% der Fälle ein Abkommen von der Fahrbahn vorausgeht, von denen rund 43% tödlich verlaufen. Folgt nach dem Abkommen ein Anprall an ein Objekt erhöht sich dabei dieses Risiko auf 3,9. Als Objekte konnten dabei mit 50%igem Anteil Fahrzeugrückhaltesysteme als Anprallobjekt identifiziert werden. Berücksichtigt man diese nicht ergaben sich dabei Kontakte mit der Oberfläche (Böschungen, Boden) als häufigstes Kollisionsobjekt mit 42%. Kollisionen mit pfahlähnlichen Objekten und wandähnlichen Objekten traten mit 22% zu gleichen Teilen auf. Die restlichen Anteile sind sonstige Objekte die nicht weiter definiert sind.

Aus der Tiefenanalyse ging hervor, dass bei einer mittleren Abkommengeschwindigkeit von 110,2 km/h die Kollisionsgeschwindigkeit an ein Objekt im Mittel 93,4 km/h betrug. Eine Auswertung der Objektabstände gab Aufschluss über die relativ hohe Anprallgeschwindigkeit. 76% der Objekte konnten in einem Bereich unter 5 Metern festgestellt werden. Um die Abkommenssituation beschreiben zu können wurden Analysen bezüglich Straßenverlauf, Abkommenswinkel, Geschwindigkeitswinkel und Schwimmwinkel durchgeführt. Dabei überwiegt ein Abkommen nach rechts auf gerader Strecke mit 39,73% gefolgt von einem Abkommen rechts in einer Linkskurve mit 21,73%. Durch Auswertung der zuvor genannten Winkel ergab sich, dass in 30% der Fälle auf einer Geraden und in 41% der Fälle in Kurven keine Reaktion vom Fahrer erfolgte. Bei 38% auf der Geraden und 24% in Kurven konnte von einem stabilen Fahrzustand in der Abkommensstelle ausgegangen werden. Die restlichen Anteile wurden als schleuderndes Abkommen identifiziert.

Ausgehend von der Tiefenanalyse wurde ein validiertes Simulationsmodell erstellt, um pfahlähnliche und wandähnliche Objekte bezüglich einer Verletzungsschwere zu bewerten. Dabei wurde der HIC über die Kollisionsgeschwindigkeit ermittelt und mit dem in der Literatur beschriebenen Zusammenhang mit der AIS Skala bewertet. Dabei wurde in

Anlehnung an aktuelle Crashtestgesetze der Grenzwert von HIC 1000 bei einem Pfahlanprall mit 69,8km/h und für wandähnlich Objekte bei 67,7km/h erreicht. Eine Aussage über eine mögliche Reduktion der Verletzungsschwere bei gleichen Anprallsituationen an Fahrzeugrückhaltesystemen konnte dabei nicht getroffen werden. Jedoch hinsichtlich eines theoretischen Sicherheitsbereichs neben der Fahrbahn konnte festgestellt werden, dass bei der zuvor ermittelten mittleren Anprallgeschwindigkeit von knapp 94km/h, ein Bereich von 8 Meter für 8° Abkommenswinkel und 5 Meter für 5° notwendig wäre um einen Grenzwert von HIC 1000 nicht zu überschreiten.

## 11. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Für die Analyse von Verkehrsunfällen und insbesondere für die Erstellung eines Risikomodells für Verletzungsschweren ist man auf Daten von Realunfällen angewiesen. Die ZEDATU bietet dabei ein breites Spektrum an Daten von rekonstruierten Realunfällen, jedoch werden nur tödliche Verkehrsunfälle genauer erhoben. Somit ist es schwierig vorherzusagen, wie eine mögliche Verletzung bei einem Anprall an ein Objekt zustande kommt. Für weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet, müssten daher auch Daten von Verkehrsunfällen mit Leicht- und Schwerverletzten erhoben und nach AIS codiert werden. Nach Rekonstruktion dieser Unfälle könnten dann Zusammenhänge zwischen den Anprallobjekten und relevante Unfallparameter wie Kollisionsgeschwindigkeit, kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung etc. untersucht werden um Verletzungsschweren objektbezogen noch besser vorhersagen zu können.

Zum Berechnungsmodell sei angemerkt, dass Verformungen am Fahrzeug nicht berücksichtigt wurden. Um die Auswirkungen von Verformungen bei einem Anprall an ein Objekt abbilden, und auch ein eventuell vorkommendes Strukturversagen der Karosserie vorhersagen zu können, müsste man sich der finiten Elemente Berechnung bedienen. Dabei sei aber angemerkt, dass jedes Fahrzeug ein anderes Verformungsverhalten hat, und diese auch dementsprechend modelliert werden müssten. Ob diese Ergebnisse dann den Aufwand rechtfertigen würden, müsste vor Beginn einer solchen Untersuchung abgeklärt werden.

Der in dieser Arbeit untersuchte Sicherheitsbereich neben der Fahrbahn, würde dem Fahrer auch die Möglichkeit einer Lenkreaktion geben, um das Fahrzeug wieder unter Kontrolle zu bringen. Untersuchungen hinsichtlich der Reaktionen wie zum Beispiel Lenkbewegungen mit und ohne ESP müssten dabei in einer eigenen Studie zur Abschätzung des Potentials einer solchen Sicherheitszone durchgeführt werden.

Um die Verletzungsgefahr bei einem Anprall zu reduzieren werden in der Regel Fahrzeurückhaltesysteme nach DIN EN1317 angebracht. Da aber aus der Analyse hervorgegangen ist, dass rund 50% aller tödlichen Verkehrsunfälle am hochrangigen

Straßennetz durch die Kollision mit Rückhaltesystemen geschehen, bedarf es hinsichtlich der Anbringung auch noch weitere Untersuchungen. Im speziellen sollte dabei auf die richtige Anbringung Wert gelegt werden um Anrampungen mit stumpfen Leitschienenenden und Leitschienen Absenker zu vermeiden. Ebenfalls sollte an Stellen, an denen Leiteinrichtungen unterbrochen sind darauf geachtet werden, dass diese nicht hinterfahren werden können um eine Kollision mit dahinter befindlichen Objekten auszuschließen.

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Verkehrsunfälle zwischen 2002-2011.....	3
Abbildung 2: Verkehrsunfälle nach Straßenart von 2002 bis 2011 .....	4
Abbildung 3: Trend der Verkehrsunfälle von 2002 bis 2011 .....	5
Abbildung 4: Tödliche Verkehrsunfälle nach Art der Beteiligung.....	7
Abbildung 5: Risiko und Frequenz nach Unfalltypen .....	8
Abbildung 6: Unfälle mit Hindernissen auf Autobahnen und Schnellstraßen .....	10
Abbildung 7: Kollisionsobjekte USA 2011 .....	12
Abbildung 8: Baumunfälle in Deutschland.....	13
Abbildung 9: Baumunfälle auf deutschen Autobahnen.....	13
Abbildung 10: Ortsfeste Hindernisse .....	14
Abbildung 11: Abkommensgeschwindigkeit auf Autobahnen Schnellstraßen.....	15
Abbildung 12: Anprallgeschwindigkeit an Hindernisse und kumulierte Anteile .....	16
Abbildung 13: Definition Normalabstand von Objekten zur Fahrbahn .....	17
Abbildung 14: Normalabstände der Objekte und kumulierte Anteile.....	18
Abbildung 15: Abkommenssituation bezogen auf die Straßenführung .....	19
Abbildung 16: Abkommenswinkel und Geschwindigkeitswinkel .....	19
Abbildung 17: Abkommenswinkel auf Autobahnen und Schnellstraßen .....	20
Abbildung 18: Geschwindigkeitswinkel und Abkommenswinkel auf Geraden .....	21
Abbildung 19: Schwimmwinkel in Kurven und auf Geraden .....	22
Abbildung 20: Reaktionen des Fahrers auf Geraden und in Kurven.....	23
Abbildung 21: Beschädigungen am Fahrzeug .....	24
Abbildung 22: Verletzungen nach Körperregionen.....	25
Abbildung 23: Crashtestkonfiguration und Grenzwerte nach ECE-R94 [8, 2012] .....	27
Abbildung 24: Crashtestkonfiguration und Grenzwerte nach FMVSS 208 [8, 2012].....	28
Abbildung 25: NCAP frontaler Crashtests im Vergleich [8, 2012].....	29
Abbildung 26:Crashtestkonfiguration und Grenzwerte nach ECE-R95 [8, 2012] .....	30
Abbildung 27: Crashtestkonfiguration und Grenzwerte nach FMVSS214 [8, 2012].....	31
Abbildung 28: NCAP seitlicher Crashtests im Vergleich [8, 2012] .....	32

Abbildung 29: Einteilung von Rückhaltesystemen an Straßen nach DIN EN1317 [12].....	33
Abbildung 30: Testkonfiguration nach DIN EN 1317.....	34
Abbildung 31: Prüfaufbau gemäß DIN EN 12767.....	39
Abbildung 32: Lethalitätsrisiko maximaler AIS Verletzungen.....	41
Abbildung 33: Verletzungsrisikofunktion für Kopfverletzungen [4].....	44
Abbildung 34: Zusammenhang ASI und Geschwindigkeit [7, ].....	45
Abbildung 35: Zusammenhang ASI und HIC36 [7, ].....	46
Abbildung 36: Ablauf einer Kollision von zwei Körpern[17, 2007].....	48
Abbildung 37: Verlauf der Kontaktkraft unterschiedlicher Stoßarten[17, 2007].....	49
Abbildung 38: Lichtbildbeilage Verkehrsunfall.....	53
Abbildung 39: Unfallrekonstruktion mit PC Crash, Bildquelle [3].....	54
Abbildung 40: Abkommenswinkel, Geschwindigkeitswinkel, Bildquelle [3].....	55
Abbildung 41: Simulationsaufbau starre Barriere, 100% Überdeckung.....	56
Abbildung 42: Sequenzen und Stoß.....	57
Abbildung 43: Simulationsaufbau Pfahl, 10% Offset.....	58
Abbildung 44: Grundeinstellungen des Mehrkörpersystems.....	59
Abbildung 45: Parameter der Rückhaltesysteme.....	59
Abbildung 46: Validierungsergebnis starre Barriere, 100% Überdeckung.....	62
Abbildung 47: Validierungsergebnis Pfahl, 10% Offset.....	62
Abbildung 48: Simulationsergebnis unterschiedlicher Kollisionsgeschwindigkeiten.....	63
Abbildung 49: Normalabstände der Objekte.....	65
Abbildung 50: Anhalteweg unterschiedlicher Abkommensgeschwindigkeiten.....	67
Abbildung 51: Theoretische Sicherheitszone.....	68

**TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1: Unfalltypen nach Hauptgruppen [22].....	6
Tabelle 2: Risiko und Frequenz .....	7
Tabelle 3: Unfälle mit nur einem Beteiligten [22].....	9
Tabelle 4: Anprallprüfungen gemäß DIN EN 1317 .....	34
Tabelle 5: Aufhaltestufen gemäß DIN EN 1317.....	35
Tabelle 6: Anprallheftigkeit gemäß DIN EN 1317.....	35
Tabelle 7: Wirkungsbereich gemäß DIN EN 1317 .....	36
Tabelle 8: Klassen, Sicherheitsstufe und Grenzwerte gemäß DIN EN 12767 .....	37
Tabelle 9: Geschwindigkeitsklassen .....	38
Tabelle 10: Menschliche Belastungsgrenzen [24, 2003b].....	40
Tabelle 11: AIS Codierung [2] .....	41
Tabelle 12: Auszug der CrashdatenTest No 5112[4] .....	56
Tabelle 13: Vergleich der Testdaten mit der Simulation .....	61
Tabelle 14: Verletzungsrisiko starre Barriere.....	64
Tabelle 15: Verletzungsrisiko Pfahl .....	65
Tabelle 16: Theoretische Verletzungsreduktion .....	69

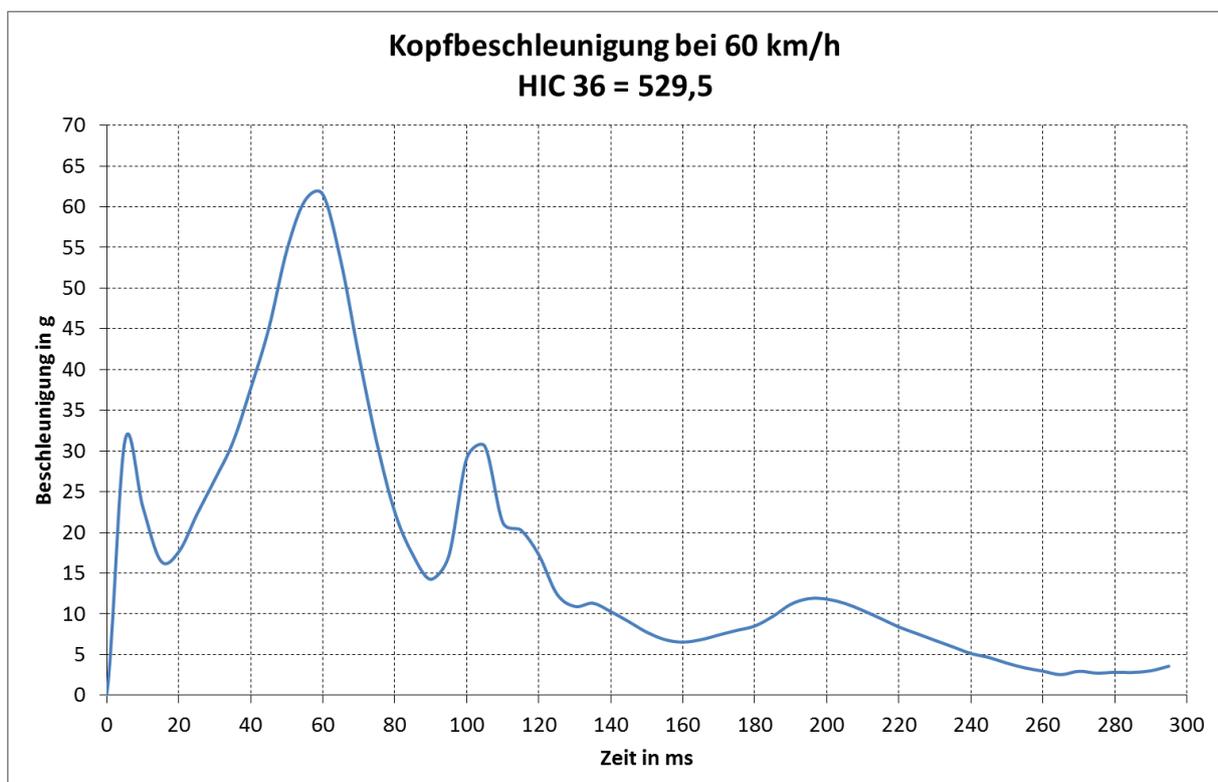
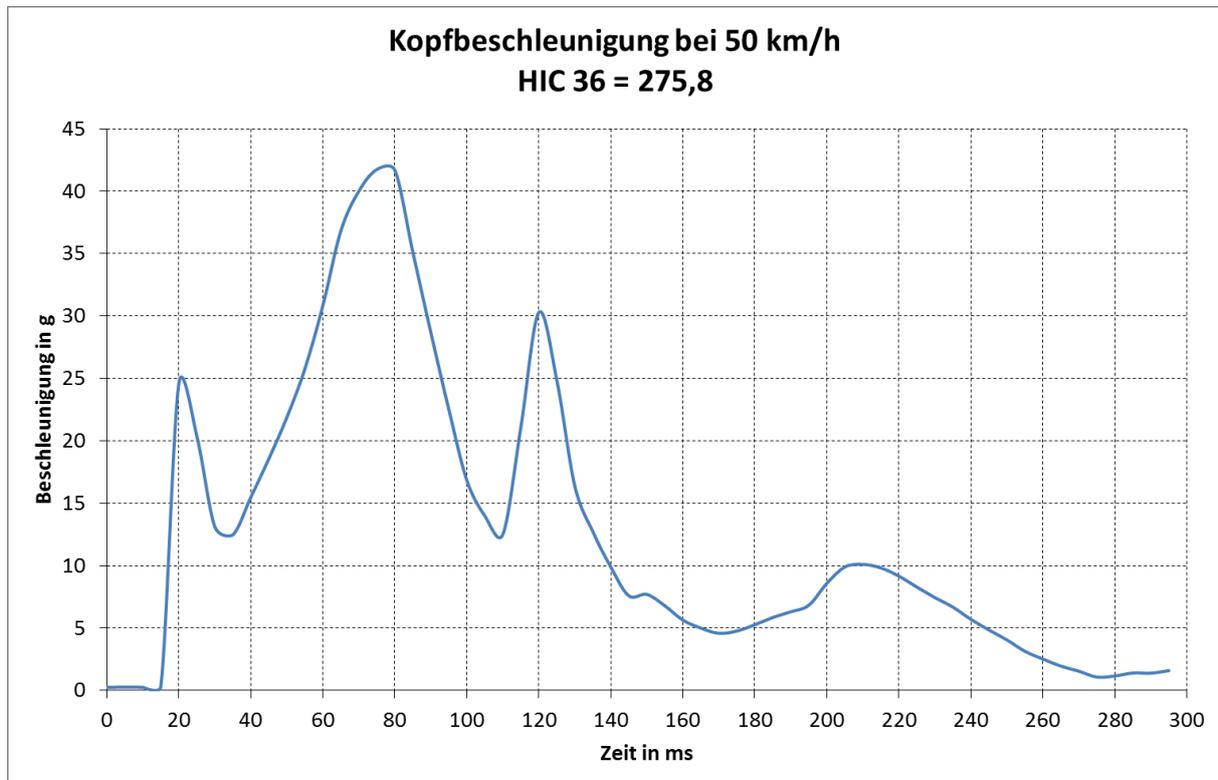
**LITERATURVERZEICHNIS**

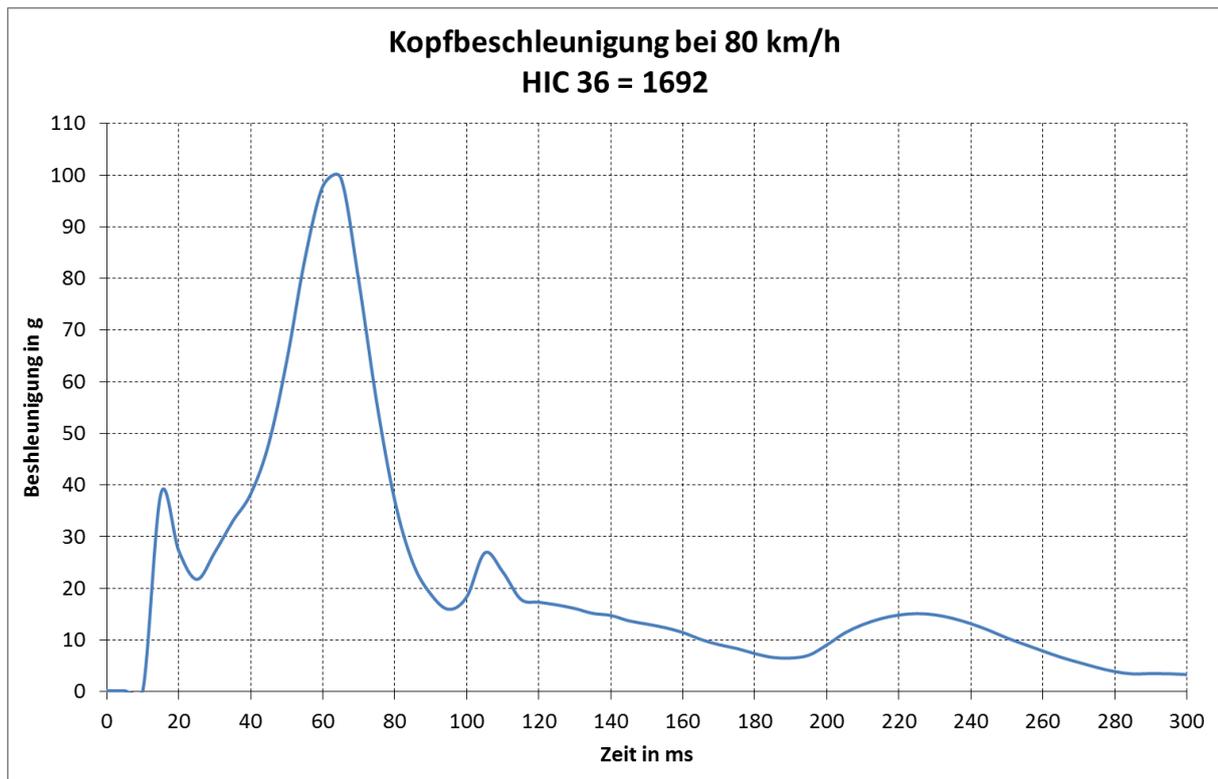
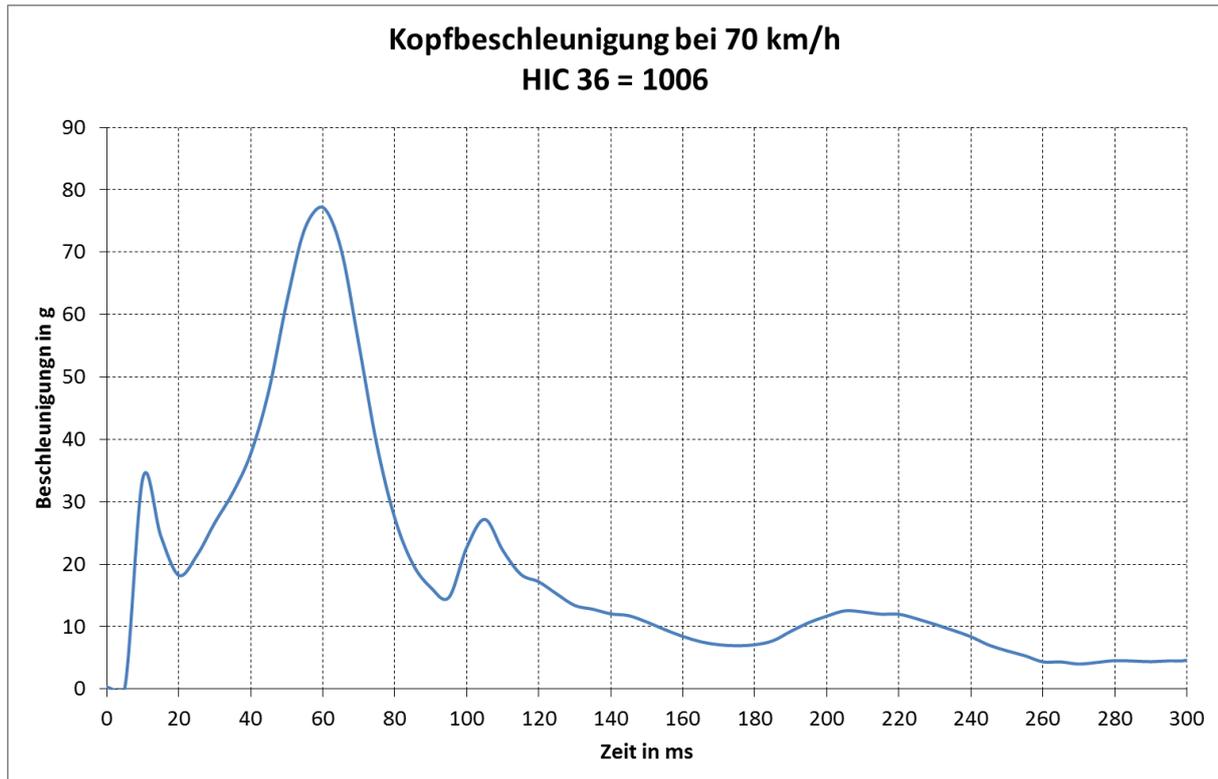
1. Euro NCAP; [www.euroncap.com](http://www.euroncap.com)
2. Association for the Advancement of Automotive Medicine; <http://www.aaam.org/> access to website: (2005b)
3. Geoland; [www.geoland.at](http://www.geoland.at) access to website: (2013c)
4. NHTSA; [www.nhtsa.com](http://www.nhtsa.com) access to website: (2013d)
5. B.Lorenz and O.Zander: Crash Rules and Regulations; Proceedings of ; 2011a;
6. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: Österreichisches Verkehrssicherheitsprogramm 2011-2020; 2013, (Report);
7. C.W.Klootwijk and R.H.Hoogvelt: Sensitivity of Car with Guardtail Impacts with a Multibody Simulation Tool; (Report);
8. Carhs GmbH. Safety Companion 2012; Publisher: Cahrs GmbH; 2012
9. CN Kloeden, AJ McLean MRJ Baldock and AJT Cockington: Severe and Fatal Car Crashes Due to Roadside Hazards; 1999, (Report);
10. Dr.M.Shojaati: Correlation between injury risk and impact severity index ASI; Proceedings of ; 2003a;
11. European Committee for Standardization: EN 12767 - Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen für die Straßenausstattung - Anforderungen und Prüfverfahren;
12. European Committee for Standardization: EN 1317 - Road restraint systems;
13. FSV: RVS 05.02.31 - Anforderungen und Aufstellung; 11-10-2011g
14. GIDAS: German In-Depth Accident Study; [www.gidas.org/](http://www.gidas.org/) access to website: (14-4-2011h)
15. H.Hoschopf, Tomasch E., Steffan H. Ermittlung der notwendigen Aufstelllängen für Leitschienen unter Berücksichtigung der typischen Auslaufbewegung unterschiedlicher Fahrzeuge sowie Erarbeitung eines Katalogs von typischen Unfallszenarien bei Rückhaltesystemen; Publisher: DSD; 2006a
16. H.Steffan. Skriptum zur Vorlesung Unfallmechanik im Verkehrswesen; Publisher: TU Graz - Institut für Fahrzeugsicherheit; 2006b

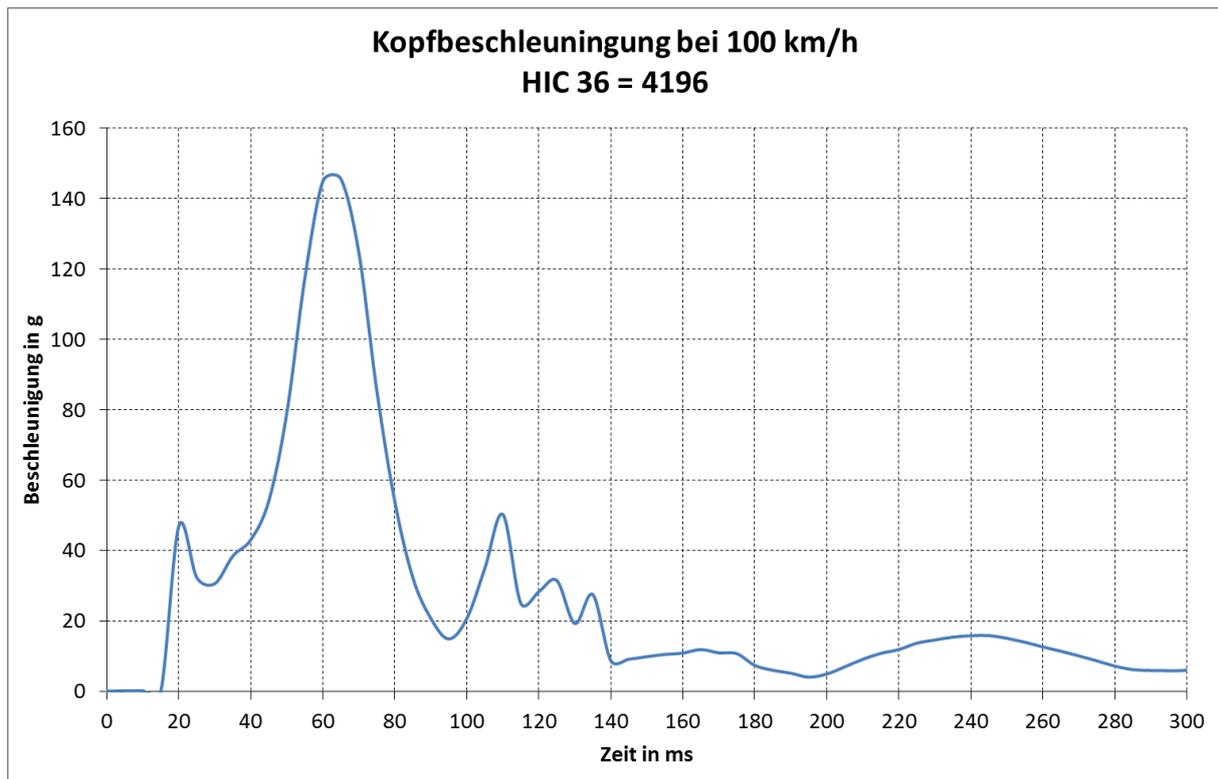
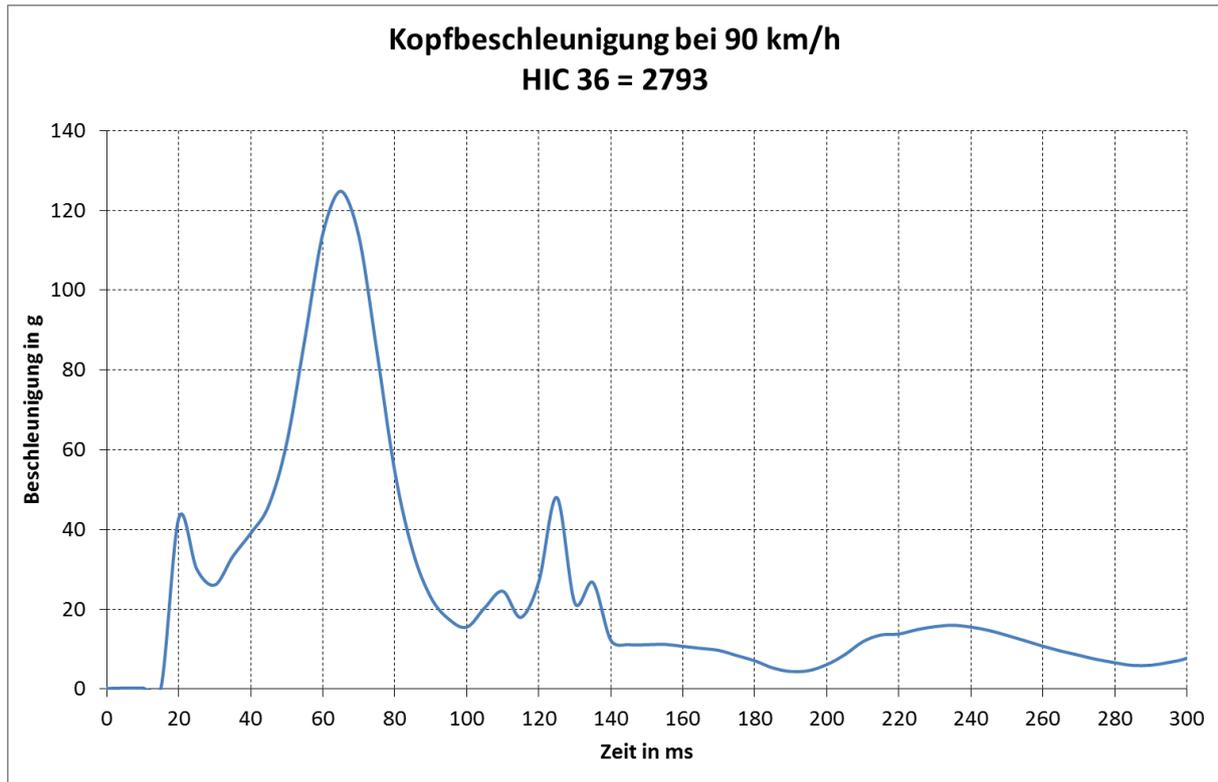
17. Heinz Burg, Andreas Moser. Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion; 1.Auflage. Edition; Publisher: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag; GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2007; 2007
18. Kuratorium für Verkehrssicherheit (KFV): Status-quo-Analyse & Strategieentwicklung für ein Verkehrssicherheitsprogramm der ASFINAG; 2008, (Report);
19. Ministry for Transport Innovation and Technology: Austrian Road Safety Programme 2002 - 2010 - Strategies for Improving Road Safety, Edition 2004; 2004, (Report);
20. NHTSA: NHTSA Test Database; [www-nrd.nhtsa.dot.gov](http://www-nrd.nhtsa.dot.gov) access to website: (2012i)
21. Schmitt K, Niederer P, Muser M, Walz F. Trauma-Biomechanik; Publisher: Springer Verlag; 2010
22. Statistics Austria: National accident statistics; [www.statistik-austria.at](http://www.statistik-austria.at)
23. TU Graz - Institut für Fahrzeugsicherheit: ZEDATU - Zentrale Datenbank tödlicher Unfälle;
24. U.Seiffert, L.Weich. Automotive Safety Handbook; Publisher: SAE International; 2003b
25. W.Wach. Simulation of Vehicle Accidents using PC-Crash; Publisher: Institute of Forensic Research Publishers; 2011b
26. Winner H., Hakuli S., Wolf G. Handbuch Fahrerassistenzsysteme; Publisher: Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH; 2009

**ANHANG A**

Ergebnisse unterschiedlicher Anprallgeschwindigkeiten der Simulationsreihe starre Barriere mit 100% Überdeckung.

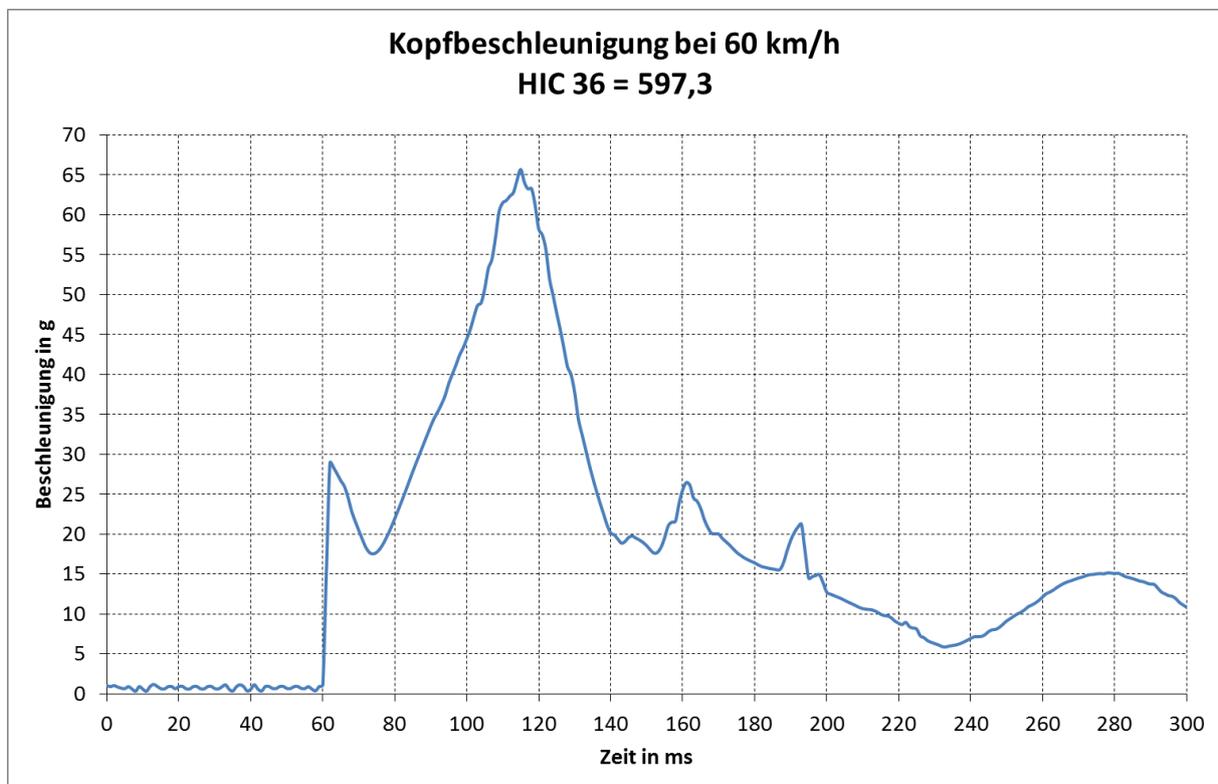
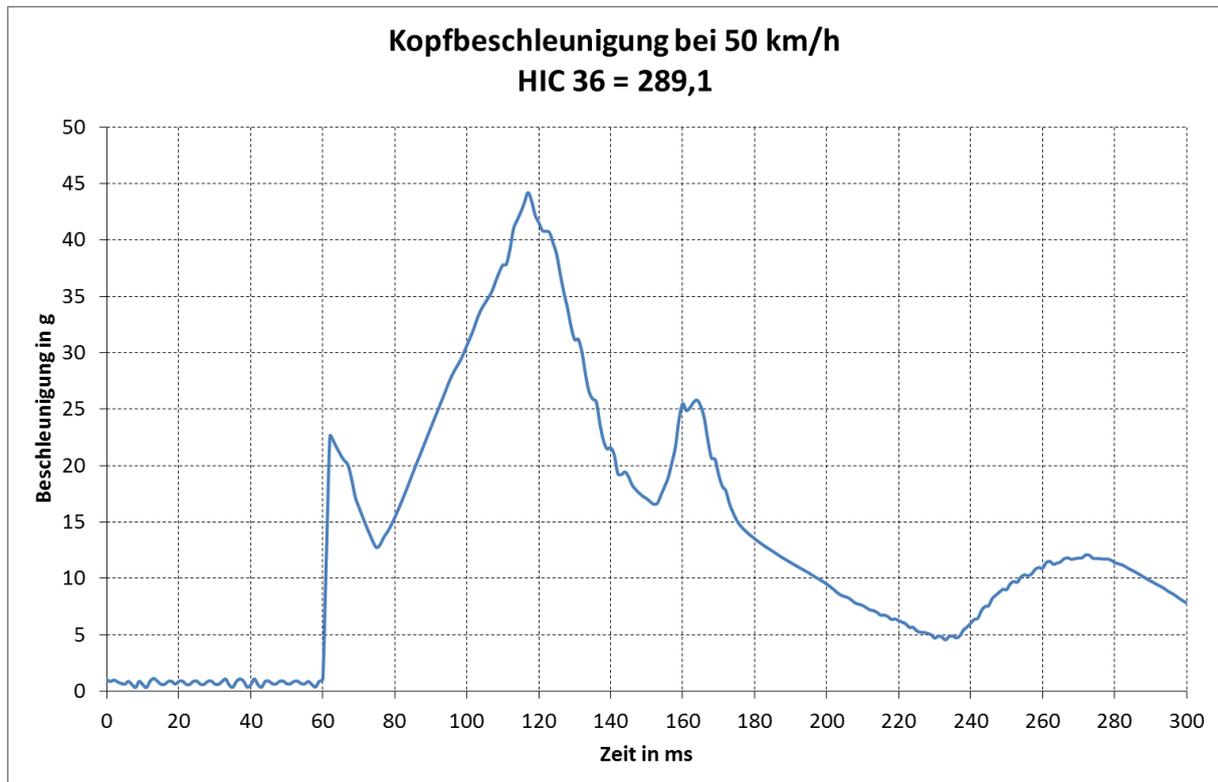


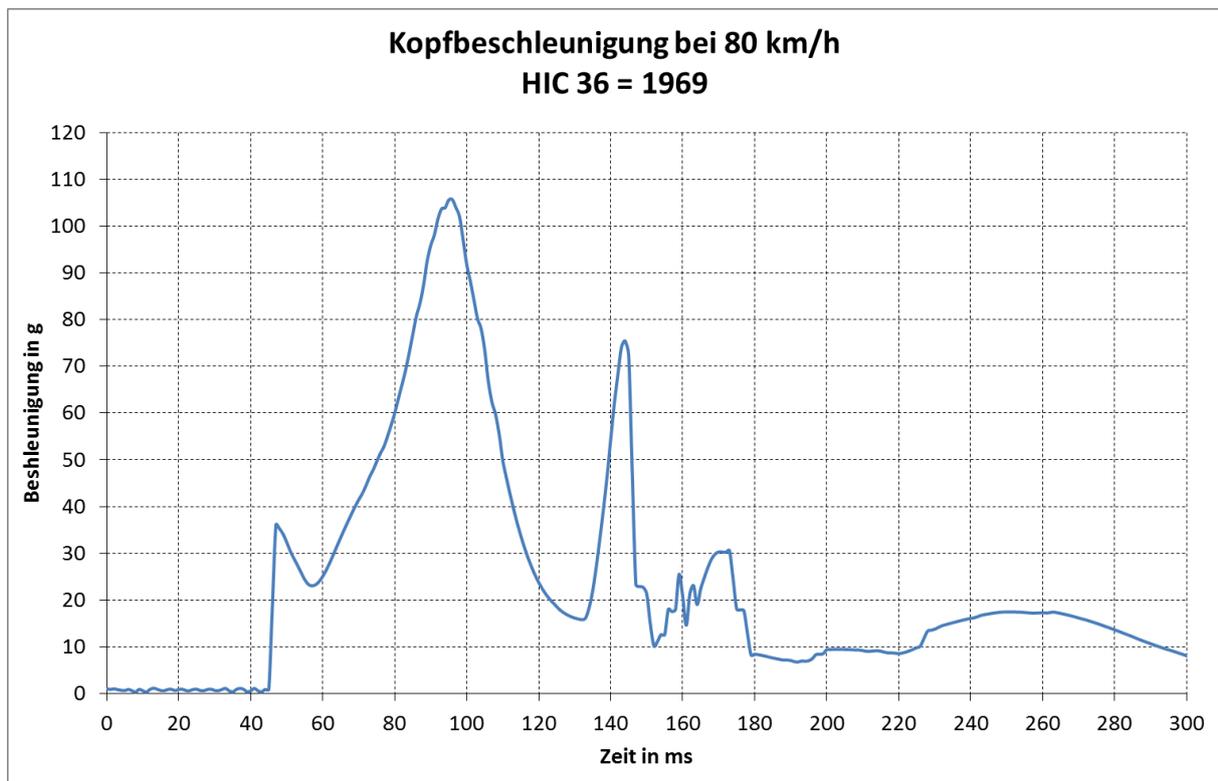
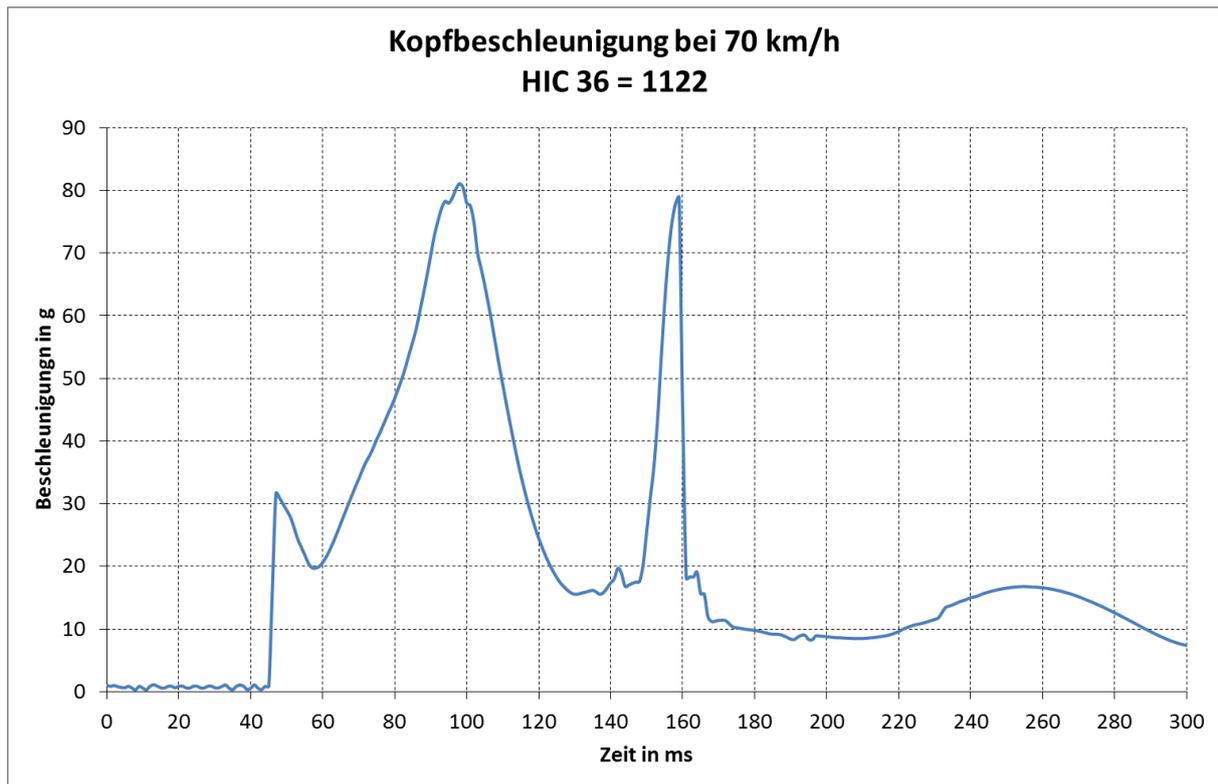


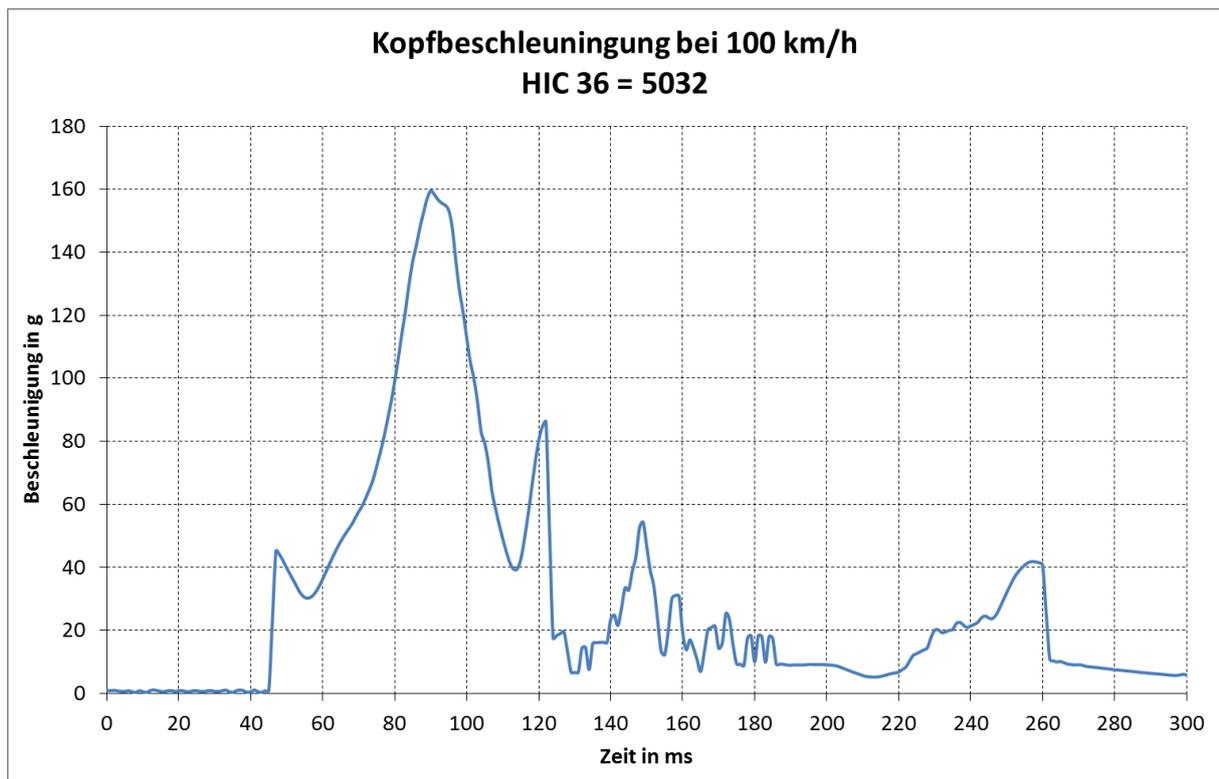
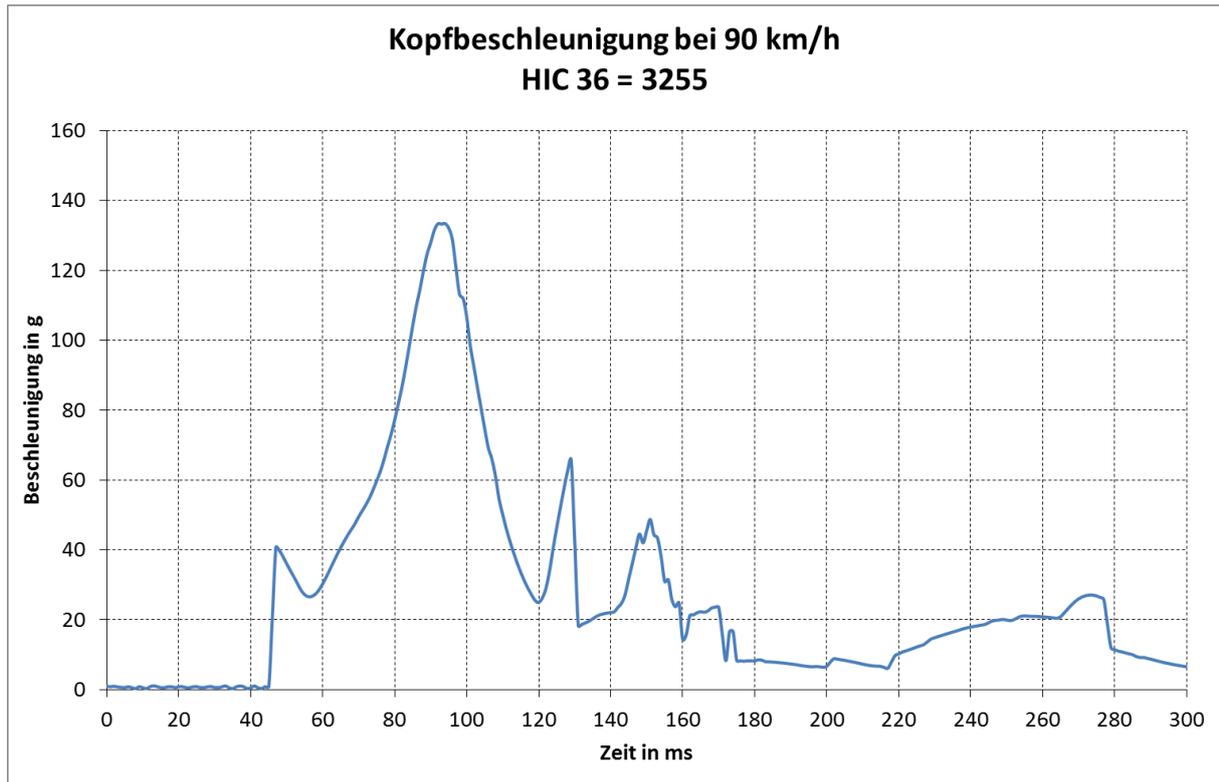


**ANHANG B**

Ergebnisse unterschiedlicher Anprallgeschwindigkeiten der Simulationsreihe Pfahlanprall mit 10% Offset.

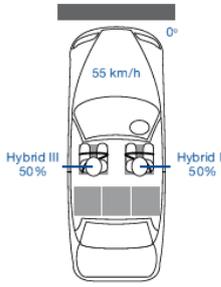
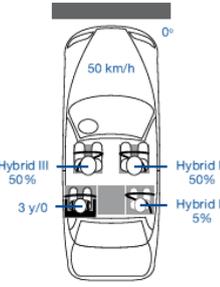
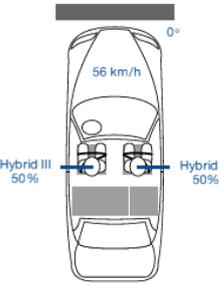
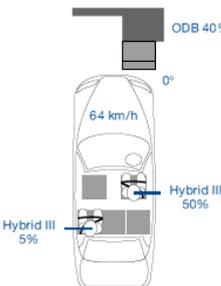
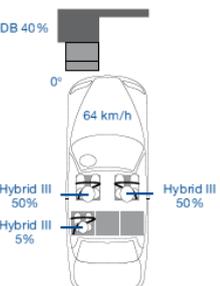
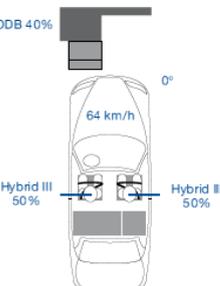
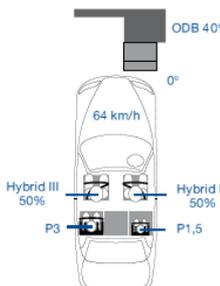
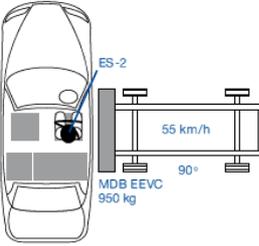
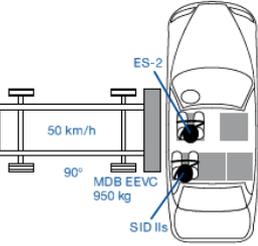
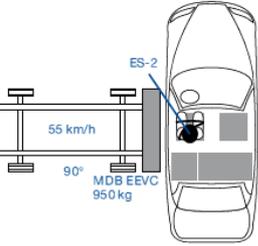
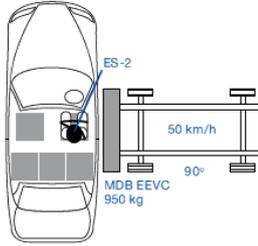
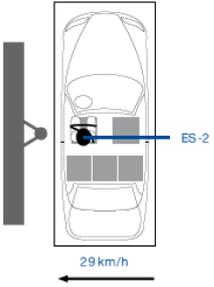
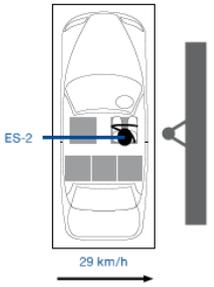






**ANHANG C**

Verbraucherschutztests [8, 2012]

<b>JNCAP</b> 	<b>C-NCAP</b> 	<b>KNCAP</b> 	<b>ANCAP</b> 
			
			
			
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fußgängerschutz</li> <li>■ Whiplash Test</li> <li>■ Dynamische Tests mit Kinderschutzsystemen und Bewertung der Handhabung</li> <li>■ Bewertung der Bremsen</li> <li>■ Grand Prix Award für beste Fahrzeuge pro Jahr</li> </ul> <p>SafetyWissen by </p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Whiplash Test mit Mid Severity Puls und BioRID II</li> <li>■ Zusatzpunkte für SBR, ESC, ISOFIX, Curtain-Airbags</li> </ul> <p>* Testverfahren ab Juli 2012</p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fußgängerschutz</li> <li>■ Whiplash</li> <li>■ Static Stability Factor und Fishhook Manöver (S. 100)</li> <li>■ Bewertung der Bremsen</li> <li>■ Gesamtrating (5 Sterne)</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fußgängerschutz</li> <li>■ Whiplash</li> <li>■ Dacheindrückung</li> <li>■ Zusatzpunkte für SAT</li> </ul>

