

Analyse der Radfahrer-Pkw-Kollision

Michael Hamacher

Matthias Kühn

Thomas Hummel

Analyse der Radfahrer-Pkw-Kollision

Dr.-Ing. Michael Hamacher
Dr.-Ing. Matthias Kühn
Dipl.-Ing. Thomas Hummel

Impressum

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Unfallforschung der Versicherer

Wilhelmstraße 43/43G, 10117 Berlin

Postfach 08 02 64, 10002 Berlin

E-Mail: unfallforschung@gdv.de

Internet: www.udv.de

Facebook: www.facebook.com/unfallforschung

Twitter: [@unfallforschung](https://twitter.com/unfallforschung)

YouTube: www.youtube.com/unfallforschung

ISBN-Nr.: 978-3-939163-64-0

Redaktion: Dipl.-Ing. Thomas Hummel

Bildnachweis: UDV und siehe Quellenangaben

Erschienen: 04/2016

Im Auftrag der Unfallforschung der Versicherer (UDV)

Analyse der Radfahrer-Pkw-Kollision

bearbeitet durch:

Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen
Karosserie

Dr.-Ing. Michael Hamacher



Bei der UDV betreut von:

Dr.-Ing. Matthias Kühn
Dipl.-Ing. Thomas Hummel



Inhalt

1	Einleitung.....	6
2	Unfallanalyse und Stand der Technik	9
2.1	Unfallszenarien.....	9
2.1.1	Fahrzeuggeschwindigkeit und -verzögerung	12
2.1.2	Radfahrgeschwindigkeit.....	15
2.1.3	Definition geeigneter Anstoßkonstellationen für das Bewertungsverfahren	16
2.2	Verteilung der Kopfaufprallbereiche in Fahrzeuginnenrichtung	20
2.3	Verteilung der Erstkontaktstellen in Fahrzeugquerrichtung	24
2.4	Verletzungsverursachende Teile der Fahrzeugfront.....	24
2.5	Verletzungsschwere und -häufigkeit der jeweiligen Körperregionen	28
2.6	Alter und Größe verunglückter Radfahrer	31
2.7	Radgrößen und Bauformen	32
2.8	Aktuelle fahrzeugseitige Entwicklungen zur Radfahrersicherheit	34
3	Numerische Simulation von Fahrzeug-Radfahrer-Kollisionen	39
3.1	Modellaufbau.....	39
3.1.1	Fahrzeugmodelle	39
3.1.2	Radfahrermodelle.....	41
3.1.3	Abbildung einer aktiven Haube.....	43
3.2	Anstoßkonstellationen und Simulationsparameter	43
3.3	Simulationsmatrix	44
3.4	Simulationsauswertung.....	45
3.5	Modellvalidierung mittels Rekonstruktion eines Realunfalls	47
3.6	Simulationsergebnisse.....	50
3.6.1	Kompakt.....	51
3.6.2	Limousine.....	52
3.6.3	Van	53
3.6.4	SUV	54
3.6.5	OneBox.....	55
3.6.6	Sportwagen.....	56

3.6.7	Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit	57
3.6.8	Einfluss der erhöhten Masse eines Pedelecs auf den Primäranprall	59
3.6.9	Sekundäraufprall	60
3.6.10	Beianprall	62
4	Anpassung der Bewertungsmethodik	64
4.1	Module & Anpassungen.....	64
4.1.1	Übersicht.....	64
4.1.2	Fahrzeug-Einordnung & Einteilung.....	66
4.1.3	Fahrzeugklassenspezifische Unfallkinematik	68
4.1.4	Fahrzeugmodellspezifische Struktureigenschaften.....	77
4.1.4.1	Crashaktive Systeme	82
4.1.5	Gewichtung	86
4.1.5.1	Relevanzfaktoren	86
4.1.5.2	Geschwindigkeitsfaktor	87
4.1.5.3	Winkelfaktor	94
4.1.6	Indexberechnung	98
4.1.6.1	Anwendung des Excel-Tools zur Indexberechnung.....	101
4.1.7	Systeme der aktiven Sicherheit.....	105
4.2	Ergebnisse Radfahrerindex	106
4.2.1	Beispielfahrzeug der Klasse Kompakt.....	107
4.2.2	Beispielfahrzeug der Klasse Limousine.....	108
4.2.3	Beispielfahrzeug der Klasse Van.....	110
4.2.4	Beispielfahrzeug der Klasse SUV.....	111
4.2.5	Beispielfahrzeug der Klasse OneBox	113
4.2.6	Klasse Sportwagen	114
4.3	Ergebnisse Fußgängerindex.....	115
4.3.1	Beispielfahrzeug der Klasse Kompakt.....	116
4.3.2	Beispielfahrzeug der Klasse Limousine.....	117
4.3.3	Beispielfahrzeug der Klasse Van.....	119
4.3.4	Beispielfahrzeug der Klasse SUV.....	119
4.3.5	Beispielfahrzeug der Klasse OneBox	120

4.3.6	Klasse Sportwagen	121
4.3.7	Fazit	122
5	Full-Scale-Tests.....	124
5.1	Simulationen.....	124
5.2	Versuchsaufbau und Randbedingungen	127
5.3	Versuchsauswertung	132
5.3.1	Zentraler rechtwinkliger Anprall mit 40 km/h.....	132
5.3.2	Zentraler rechtwinkliger Anprall mit 30 km/h.....	138
5.3.3	Zentraler rechtwinkliger Anprall mit 20 km/h.....	144
5.4	Fazit	149
6	Zusammenfassung	155
7	Formelzeichen und Indizes	157
8	Literatur	159
9	Anhang.....	165
9.1	Unfallszenarien APROSYS.....	165
9.2	Alter und Größe verunglückter Radfahrer	166
9.3	Definition der Fahrradrahmengenometrien	167
9.4	Fahrzeugmodellparameter im SaveCAP-Projekt.....	168
9.5	Dummypositionierung im SaveCAP-Projekt.....	168
9.6	SaveCAP Testergebnisse.....	169
9.7	Fahrzeugmodelle	170
9.8	Fußgängergrößenverteilungen.....	171
9.9	Simulationsergebnisse Versuchsfahrzeug	172
9.10	Ergebnisse Full-Scale-Tests	173
9.10.1	Zentraler rechtwinkliger Anprall mit 40 km/h	173
9.10.2	Zentraler rechtwinkliger Anprall mit 30 km/h	175
9.10.3	Zentraler rechtwinkliger Anprall mit 20 km/h	177

1 Einleitung

Während beim Fußgängerschutz sowohl auf gesetzlicher Seite als auch auf Seiten des Verbraucherschutzes (Euro NCAP) jeweils spezifische Prüfanforderungen zur Bewertung des Schutzpotentials von Fahrzeugfronten existieren, sind entsprechende Vorgaben hinsichtlich der Sicherheit von Fahrradfahrern bislang nicht definiert. Aktuelle Unfalldaten zeigen jedoch die hohe Relevanz von Radfahrerunfällen, welche hinsichtlich der Zahl der Verletzten deutlich über dem Anteil der verunglückten Fußgänger liegen. So wurden in Deutschland bei Straßenverkehrsunfällen im Jahre 2012 13.854 Fahrradfahrer schwer und 60.516 leicht verletzt. Bei den Fußgängern lag die Zahl der Leichtverletzten bei 23.348 und die der Schwerverletzten bei 7.962, wobei hier die Zahl der tödlich Verunglückten mit 520 gegenüber 406 getöteten Radfahrern etwas höher ausfällt. Während für die Gruppe der Fußgänger die Zahl der Getöteten von 2011 auf 2012 abgenommen hat, ist die Zahl der getöteten Radfahrer leicht gestiegen [STA13].

In Europa kamen im Jahr 2009 in den EU-15 Staaten zuzüglich Polen, Rumänien, Slowenien, Tschechien und Ungarn insgesamt 2.196 Radfahrer ums Leben, was 6,7% der Gesamtunfalltoten entspricht [DAC12]. Allerdings ist der Anteil der Radfahrer an der Zahl der insgesamt getöteten Verkehrsteilnehmer stark länderspezifisch und kann in einigen Ländern deutlich höher ausfallen. In den Niederlanden liegt dieser beispielsweise bei 21% (2009) [DAC12], sodass hier das Thema Radfahrerschutz einen besonders hohen Stellenwert besitzt. Auch wenn die absoluten Werte rückläufig sind und die Zahl der getöteten Radfahrer in den zwanzig betrachteten europäischen Staaten zwischen 2001 und 2009 um 32% gesunken ist [DAC12], so besteht weiterhin Handlungsbedarf. Gerade das durch die EU-Kommission im Jahr 2010 im Rahmen des „4th Road Safety Action Programme“ ausgegebene Ziel einer nochmaligen Halbierung der Zahl der Verkehrstoten bis zum Jahr 2020 erfordert auch Maßnahmen zur Verbesserung der Radfahrersicherheit.

Von den im Jahr 2012 in Deutschland insgesamt 74.961 Fahrradunfällen mit Personenschaden waren 16,9% Alleinunfälle (Abb. 1-1). Bei 79,9% gab es nur einen weiteren Unfallbeteiligten (59.897) und bei 3,2% dieser Unfälle waren mindestens zwei weitere Verkehrsteilnehmer involviert. Der häufigste Unfallgegner war dabei ein Pkw (74%). In 8,3% der Fälle war ein weiterer Radfahrer und bei 6,3% ein Fußgänger der Unfallgegner. Insgesamt galten 41,5% aller unfallbeteiligten Radfahrer als Hauptverursacher ihres Unfalls. Bei Unfällen mit einem Pkw war der Radfahrer aber nur zu 24,9% und bei Unfällen mit Güterkraftfahrzeugen nur zu 18,9% der Hauptverursacher des Unfalls [STA13a].

Trotz der hohen Relevanz von Pkw-Radfahrerunfällen ist, im Gegensatz zu infrastrukturellen und verkehrserzieherischen Maßnahmen zur Radfahrersicherheit, ein fahrzeugseitiger Radfahrerschutz bislang kaum ausgeprägt. Als Grund ist hier in erster Linie das Fehlen eines radfahrerspezifischen Prüfverfahrens zur Bewertung des Schutzpotentials von Pkw-Frontflächen zu nennen. Die Implementierung einer entsprechenden Prüfvorschrift in der Gesetzgebung würde die Schaffung von Mindeststandards zum Radfahrerschutz ermöglichen und so zu einer Verbesserung der allgemeinen Verkehrssicherheit beitragen. Gleichzeitig würde

dies auch auf Seiten des Verbraucherschutzes die Notwendigkeit zur Einführung von Tests zur Radfahrsicherheit erhöhen. Durch die in der Regel verschärften Anforderungen der Verbraucherschutztests könnte in diesem Falle das Schutspotential der fahrzeugseitigen Maßnahmen nochmals gesteigert werden. Derzeit ist die Einführung solcher Prüfungen im Rahmen von Euro NCAP nicht vorgesehen [SCH12].

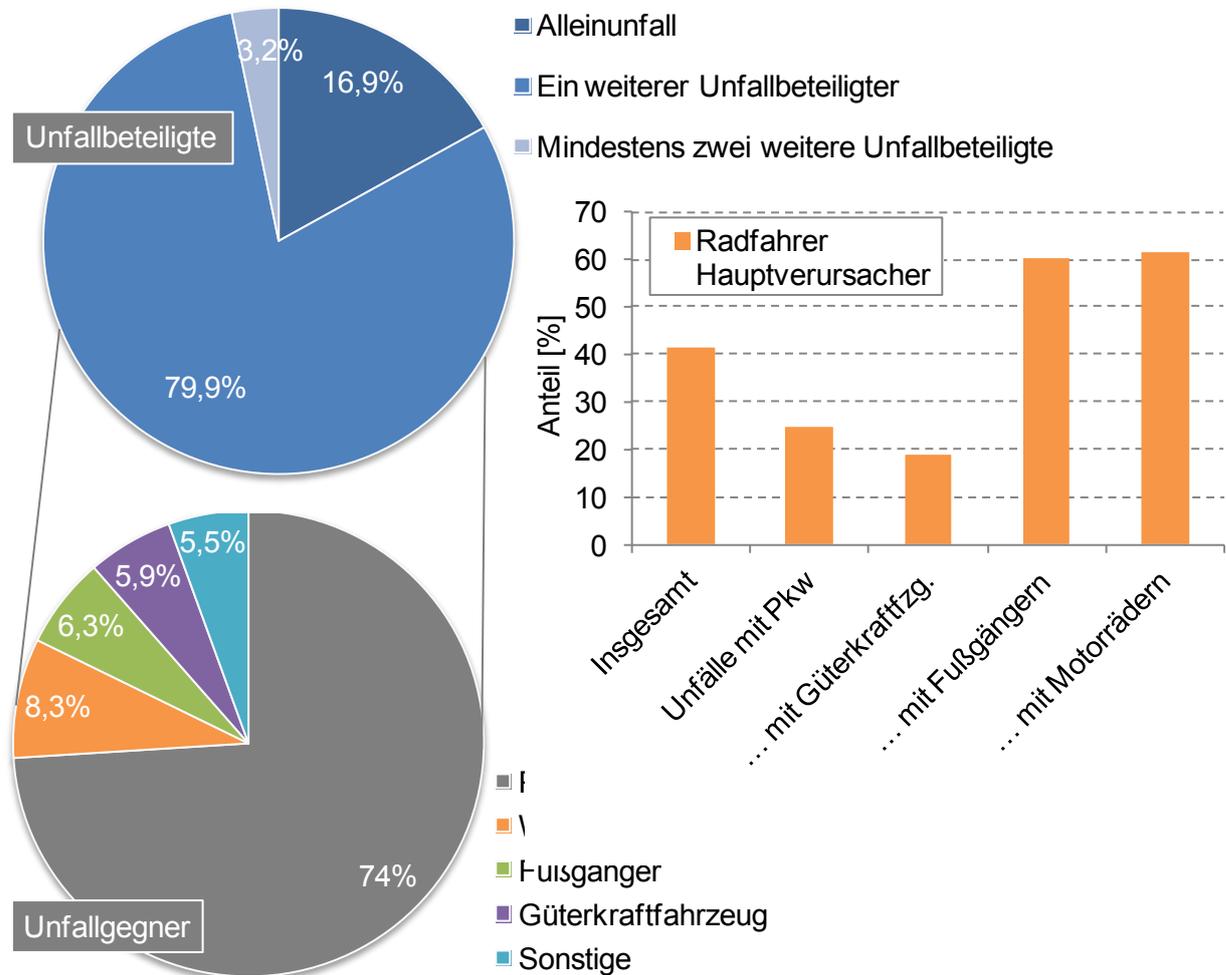


Abb. 1-1: Fahrradunfälle mit Personenschaden 2012 in Deutschland [STA13a]

Die im vorherigen Forschungsprojekt „Fußgängerschutz am Kraftfahrzeug“ erarbeitete integrierte Methodik zur Bewertung von Fahrzeugfronten bei Pkw-Fußgänger-Kollisionen wird im Rahmen dieses Projektes weiterentwickelt und in diesem Zuge um den Aufprall von Radfahrern erweitert. Ziel ist es, auch für Radfahrer Schutzmaßnahmen der passiven und aktiven Sicherheit fahrzeugspezifisch auf einer gemeinsamen Skala bewerten und jeweils mit dem Verletzungsrisiko für Fußgänger vergleichen zu können. Dabei soll das Verfahren nachwiesbar eine versuchsunabhängige und automatisierte Bewertung ermöglichen, die seitens des Anwenders allein die Euro NCAP-Fußgängerschutzdaten des Fahrzeuges erfordert.

Den Ausgangspunkt bildet zunächst eine vertiefende Analyse des Pkw-Radfahrer-Unfallgeschehens sowie ein Überblick über aktuelle Entwicklungen im Bereich der Radfahrsicher-

heit (Kapitel 2). Die Grundlage zur Erarbeitung der Radfahrerbewertungsmethodik bilden umfangreiche Simulationen von Pkw-Radfahrer-Kollisionen mit verschiedenen Fahrzeugfrontgeometrien aus insgesamt sechs Fahrzeugklassen und unter Berücksichtigung von vier Kollisionsgeschwindigkeiten (Kapitel 3). Die Simulationen dienen der detaillierten Ermittlung der Unfallkinematik für die im Rahmen der Unfallanalysen mit Hinblick auf das Bewertungsverfahren festgelegten relevanten Anstoßkonstellationen. Zudem werden im Rahmen zweier Simulationsstudien die Themen Pedelecs und Sekundäraufprall näher untersucht. Die im Zuge der Weiterentwicklung des Bewertungsverfahrens bzw. der zugrunde liegenden Indexberechnung vorgenommenen Anpassungen sind Inhalt von Kapitel 4. Dies umfasst auch die hierzu durchgeführten Kopfpimpaktorversuchsreihen im Hauben- und Windschutzscheibenbereich eines Versuchsfahrzeuges. Durch Bewertung verschiedener Schutzmaßnahmen für jeweils einen aktuellen Vertreter jeder Fahrzeugklasse werden sowohl für Radfahrer als auch Fußgänger die fahrzeugklassenübergreifende Anwendbarkeit des Verfahrens sowie die Plausibilität der entsprechenden Indexwerte geprüft.

Abschließend beschreibt Kapitel 5 die Ergebnisse der zur weiteren Untersuchung der Radfahrerkinematik sowie des Einflusses einer reduzierten Kollisionsgeschwindigkeit auf die Radfahrersicherheit durchgeführten Full-Scale-Tests. Hierbei handelt es sich um drei Realversuche mit Fahrzeuggeschwindigkeiten von 40, 30 und 20 km/h bei gleichzeitig bewegtem Radfahrer, welcher durch einen auf einem realen Fahrrad platzierten Polar-II Dummy abgebildet wird. Die Versuche ermöglichen neben einem Abgleich mit den Simulationsergebnissen auch eine nähere Untersuchung des Sekundäraufpralls.

Parallel zur Entwicklung eines Radfahrerschutzbewertungsverfahrens innerhalb dieses Projektes wurde im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ein weiteres Forschungsprojekt zum Themengebiet Radfahrersicherheit durchgeführt. Hier ist basierend auf den bestehenden gesetzlichen Prüfanforderungen zum Fußgängerschutz ein Prüfverfahren zur Bewertung des Schutzpotentials von Fahrzeugfronten bei einer Kollision mit Fahrradfahrern entwickelt worden. Sowohl in der Gesetzgebung als auch beim Verbraucherschutz erfolgt die Bewertung des fahrzeugseitigen Fußgängerschutzes durch Verwendung von Subsystemen für Kopf, Hüfte bzw. Oberschenkel und Bein. Den Fokus des BASt-Projekts bildet die Übertragung dieser Komponenten- bzw. Impaktortests auf die Gegebenheiten bei Radfahrer-Pkw-Kollisionen. Dies umfasst die Definition geeigneter Prüfrandbedingungen sowie die Erstellung einer praxisingerechten Prüfvorschrift, welche die Bewertung des Radfahrerschuttpotentials von Pkw-Frontflächen bzw. Maßnahmen der passiven Sicherheit anhand von Komponententests ermöglichen soll. In beiden Projekten erfolgten ein Austausch der gewonnenen Erkenntnisse sowie eine Nutzung von Synergien in den Bereichen Unfallanalyse und Simulation.

2 Unfallanalyse und Stand der Technik

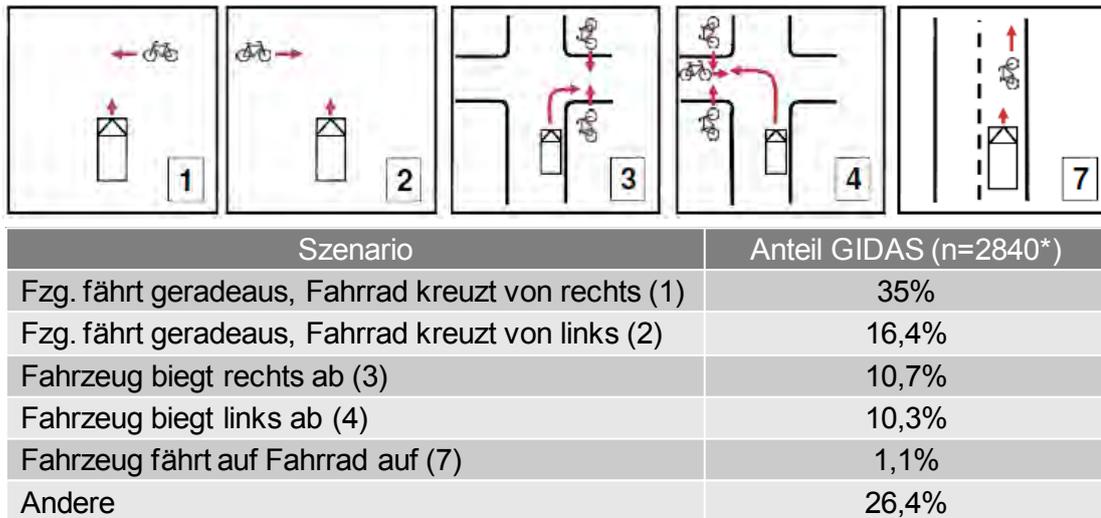
Den Ausgangspunkt für die Erweiterung des Bewertungsverfahrens hinsichtlich Radfahrerschutz stellt eine umfassende Kenntnis des Unfallgeschehens sowie aktueller Entwicklungen zur Radfahrersicherheit dar. Auf Grundlage vorhandener Unfalldaten und bereits veröffentlichter Studien, beispielsweise im Rahmen des SaveCAP-Projekts (Kapitel 2.8) oder seitens der Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden (VUFO), erfolgt eine vertiefende Analyse des Unfallgeschehens bei Pkw-Radfahrer-Kollisionen. Diese umfasst zahlreiche Aspekte. Zunächst werden die relevanten Szenarien des Radfahrerunfalls und die damit verbundenen Parameter wie Kollisionswinkel, Fahrzeug- und Radfahrgeschwindigkeit identifiziert. Des Weiteren sind fahrzeugseitig die Aufprallbereiche der einzelnen Körperregionen sowie die entsprechenden Verletzungsverursachenden Teile zu bestimmen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Verletzungsschwere und -häufigkeit der jeweiligen Körperregionen. Hinsichtlich der Relevanz der verschiedenen Aufprallbereiche an der Fahrzeugfront ist zudem die Verteilung der Radfahrergrößen im realen Unfallgeschehen von Interesse. Auf Basis dieser Daten werden für verschiedene Körpergrößen von Kindern und Erwachsenen typische Radgrößen und Bauformen bestimmt.

Im Rahmen der Unfallanalyse sind zahlreiche Quellen gesichtet und ausgewertet worden. Alle relevanten Ergebnisse sind in einer umfangreichen Präsentation (13hm0080.pptx) mit zugehörigem Quellenverzeichnis (13hm0048.xlsm) dokumentiert. Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse nochmals zusammengefasst. Ein Fokus liegt dabei auf GIDAS-Daten (German In-Depth Accident Study) sowie Analysen seitens der Unfallforschung der Versicherer (UDV) und teilweise auch auf APROSYS-Ergebnissen (Advanced Protection Systems), einem Forschungsprojekt des 6. Rahmenprogramms der Europäischen Union.

2.1 Unfallszenarien

Die häufigsten Unfalltypen innerhalb der GIDAS- und UDV-Datenbank sind Kreuzungs- und Abbiegesituationen [LIE11] [UDV13]. Die Mehrheit der Ausgangssituationen ist vergleichbar mit den kritischen Situationen in Fußgängerfrontalunfällen [LIE11]. Eine Auswertung der BMW-Unfallforschung bezüglich aller Kollisionen mit Pkw und Radfahrern innerhalb der GIDAS-Datenbank, welche bspw. auch Auffahrunfälle von Radfahrern berücksichtigt, ergibt in Bezug auf Frontalunfälle fünf allgemeine Szenarien (Abb. 2-1). Die Wichtigsten sind dabei „Fahrzeug fährt geradeaus, Fahrrad kreuzt“, welche zusammen einen Anteil von ca. 51% aller Kollisionen von Pkw und Radfahrern ausmachen. Die Szenarien 1 bis 4 treten überwiegend innerorts auf. Hier liegt der Anteil bei über 90% pro Szenario, während ein Auffahren des Fahrzeugs auf das Fahrrad (Szenario 7) zu einem Drittel außerorts auftritt [BMW12]. Die Szenarien 5 und 6 beschreiben keine Frontalunfälle und werden hier daher nicht betrachtet.

Der häufigste Anstoßbereich bei Kollisionen mit Pkw und Radfahrern ist laut GIDAS-Datenbank die Fahrzeugfront, gefolgt von der rechten Seite. Für die Szenarien 1 und 2 beträgt der Anteil für einen Anstoß an der Front 80% bzw. 72%. Für die beiden Abbiegeszenarien (3 & 4) beträgt dieser 59% bzw. 70% [BMW12].



*Alle Kollisionen mit Pkw und Radfahrern

Abb. 2-1: Frontalunfallszenarien mit Pkw und Fahrradfahrern (GIDAS, n=2840) [BMW12]

Eine GIDAS-Auswertung seitens der Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden, welche ausschließlich Frontalunfälle mit Verletzungsschweregrad MAIS2+ betrachtet und somit die durch das Bewertungsverfahren adressierten Fälle besser widerspiegelt, zeigt ein ähnliches Bild. Hier werden die Szenarien allerdings nochmals genauer aufgeschlüsselt (Abb. 2-2).

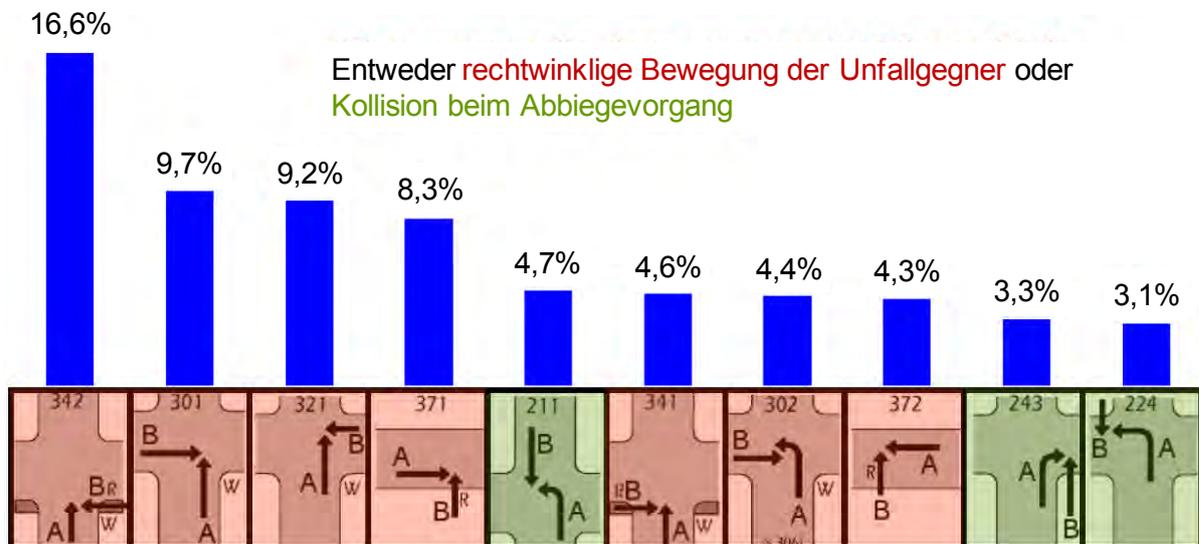


Abb. 2-2: Szenarien für MAIS2+ Pkw-Radfahrer-Frontalunfälle (GIDAS, n=403) [LIE11]

Die vier relevantesten Unfallszenarien für Pkw-Radfahrer-Frontalunfälle mit MAIS2+ Verletzungsschweregrad sind allesamt rechtwinklige Anstoßkonstellationen. Das erste Abbiegeszenario folgt mit deutlich reduzierter Relevanz auf Rang fünf und beschreibt einen links abbiegenden Pkw bei entgegenkommendem Radfahrer. Insgesamt verunglücken in den betrachteten Daten über 80% der Radfahrer in Kreuzungs- oder Abbiegesituationen. Der Anteil innerstädtischer Unfallorte liegt bei 88% und rund ein Fünftel der Unfälle geschieht bei

Dämmerung oder bei Nacht. Die Mehrheit der Unfälle (62%) wird durch den Pkw verursacht. Das Ignorieren der Vorfahrt ist sowohl für Pkw als auch für Radfahrer der bei weitem häufigste Unfallgrund [LIE11].

Eine seitens der UDV innerhalb dieses Projektes durchgeführte Analyse der eigenen Datenbank dient als weitere Grundlage zur Definition geeigneter Szenarien bzw. Anstoßkonstellationen für das Radfahrschutzbewertungsverfahren (Kapitel 2.1.3). Die Auswertung umfasst ausschließlich Fälle mit bekanntem Erstkontakt an der Fahrzeugfront, wobei hier die gesamte Front bis zum vorderen Dachrahmen berücksichtigt wird, also beispielsweise auch die Kotflügel. Zudem werden auch Fälle mit MAIS1 Verletzungsschweregrad betrachtet, welche einen Anteil von 16,8% an den insgesamt 299 ausgewerteten Frontalunfällen haben, die wiederum 84% aller Pkw-Radfahrer-Unfälle mit bekanntem Erstkontakt innerhalb der UDV-Datenbank ausmachen. Abb. 2-3 zeigt die jeweiligen Relevanzen der sich aus den möglichen Bewegungsrichtungen von Pkw und Radfahrer ergebenden Frontalunfallkonstellationen.

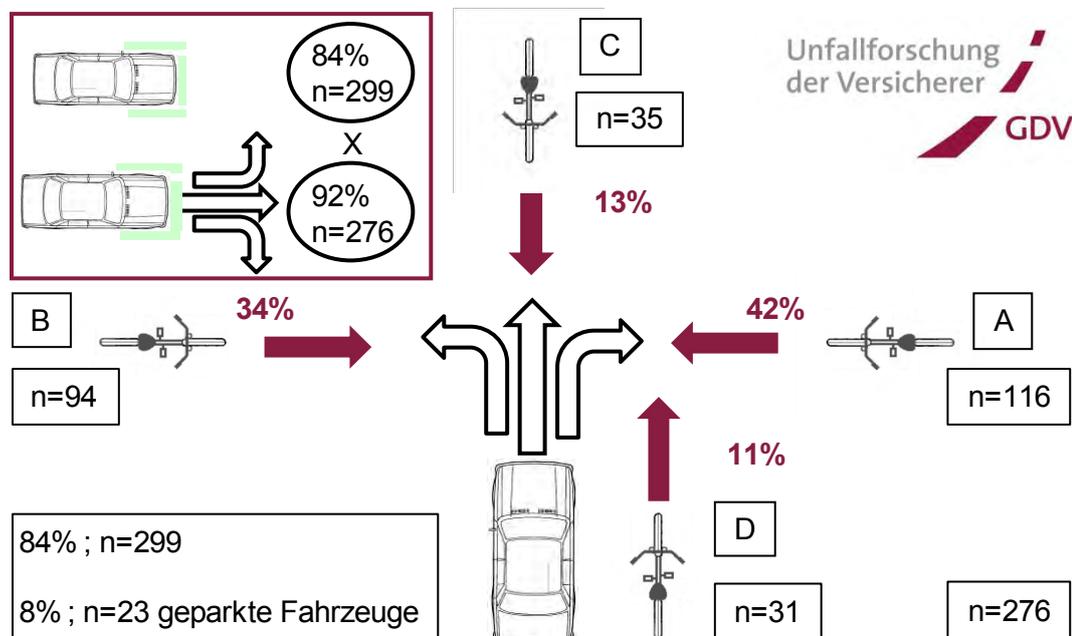


Abb. 2-3: Relevanz der Frontalunfallkonstellationen innerhalb der UDV-Datenbank [UDV13]

Im Vergleich zu Fußgängern sind Radfahrer häufiger in Kollisionen verwickelt, bei denen sie sich in Fahrtrichtung des Pkws oder entgegengesetzt entlang der Straße bewegen. Insgesamt sind jedoch Konstellationen mit einem kreuzenden Radfahrer maßgeblich für das Unfallgeschehen, welche in Abb. 2-4 weiter aufgeschlüsselt werden. Hier kristallisieren sich drei relevante Szenarien innerhalb der UDV-Daten heraus. Zum einen wird, ähnlich wie bei den GIDAS-Daten, die hohe Relevanz des von rechts oder links kreuzenden Radfahrers bei geradeaus fahrendem Pkw (A2 & B2) deutlich und zum anderen ist das Szenario des rechts abbiegenden Pkw bei von rechts kreuzendem Radfahrer (A3) auffällig. Betrachtet man für die insgesamt 210 Fälle mit kreuzendem Radfahrer zudem die Anstoßpositionen an Pkw und Fahrrad samt Anstoßwinkel, so bildet der zentrale, seitliche Anstoß des Radfahrers am Fahr-

zeugfrontend, d.h. rechtwinkliger Kollisionswinkel, mit einem Anteil von ca. einem Drittel die relevanteste Konstellation [UDV13].

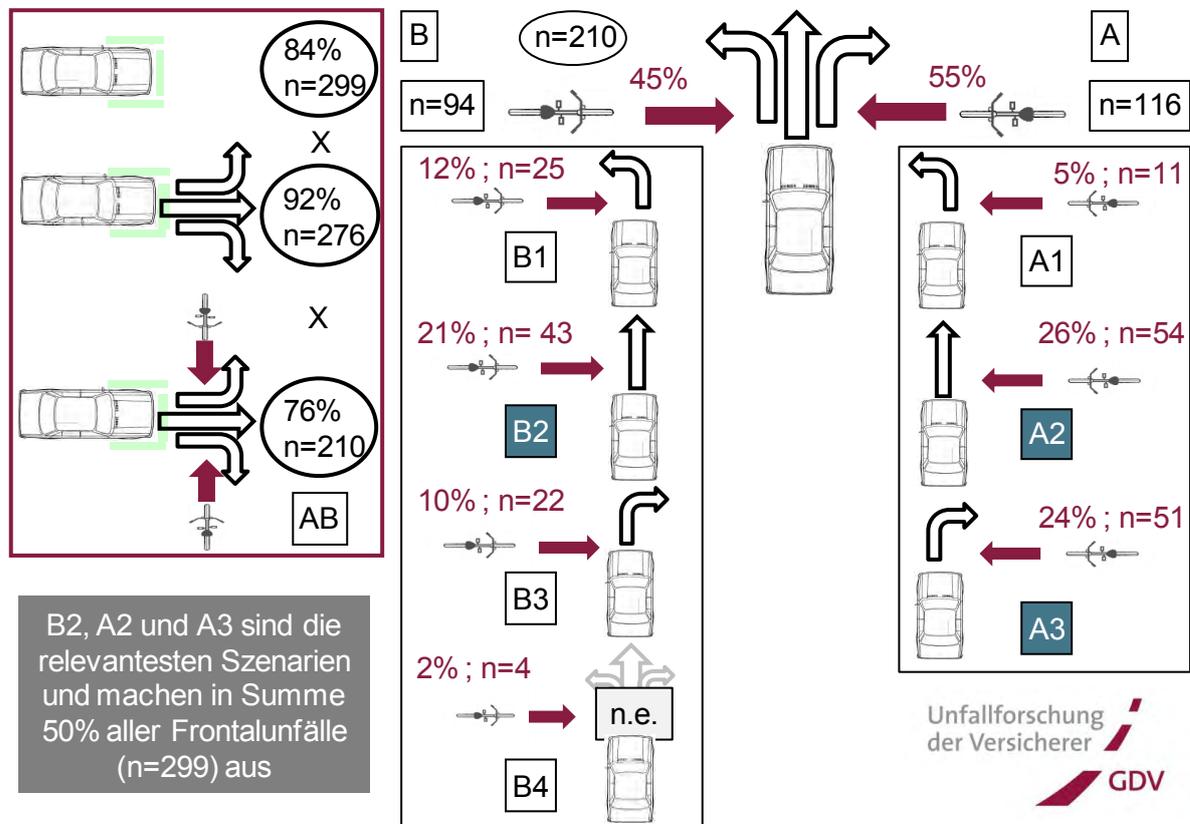


Abb. 2-4: Szenarien für MAIS1+ Frontalunfälle mit kreuzendem Radfahrer (UDV, n=210)

Ein abschließender Blick in die Daten des APROSYS-Projekts [CAR05], wo typische Szenarien in Deutschland, Großbritannien und Schweden betrachtet werden, bestätigt die vorgestellten Erkenntnisse zum Radfahrerunfallgeschehen weitestgehend, offenbart aber gleichzeitig auch eine länderspezifische Ausprägung der relevanten Konstellationen. So ist für Großbritannien eine nicht geradeaus gerichtete Bewegungsrichtung des Fahrzeugs deutlich relevanter als eine geradeaus gerichtete (Anhang, Abb. 9-1). Eine mögliche Erklärung hierfür ist der hohe Anteil an Kreisverkehren in Großbritannien. In Schweden stellt ein vor einem geradeausfahrenden Pkw abbiegender Radfahrer die relevanteste Konstellation dar (Abb. 9-2).

2.1.1 Fahrzeuggeschwindigkeit und -verzögerung

Die Identifizierung relevanter Anstoßkonstellationen samt Definition entsprechender Kollisionswinkel geht einher mit der Festlegung realistischer Kollisionsgeschwindigkeiten. Für die in Abb. 2-1 aufgeführten allgemeinen Szenarien ist in Abb. 2-5 die Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeiten angegeben. Diese spiegeln für die Szenarien 1 bis 4 mit einem Median im Bereich von 20 km/h, sowohl für die Ausgangs- als auch die Kollisionsgeschwindigkeit, das hauptsächlich innerstädtische Unfallgeschehen wider. In Szenario 7 treten aufgrund des signifikanten Anteils außerorts stattfindender Kollisionen deutlich höhere Ge-

schwindigkeiten auf. Der Median liegt hier für die Ausgangsgeschwindigkeit bei ca. 40 km/h und für die Kollisionsgeschwindigkeit bei ca. 35 km/h. Im dargestellten Box-Whisker-Diagramm repräsentieren die Boxen die mittleren 50% der Daten, während die Whisker (Antennen) maximal das 1,5-fache des Interquartilsabstands (Länge der Box und Maß für die Streuung der Daten) abbilden, abhängig vom nächstgelegenen Datenwert innerhalb dieser Grenze, welcher per Definition das Ende des jeweiligen Whiskers markiert.

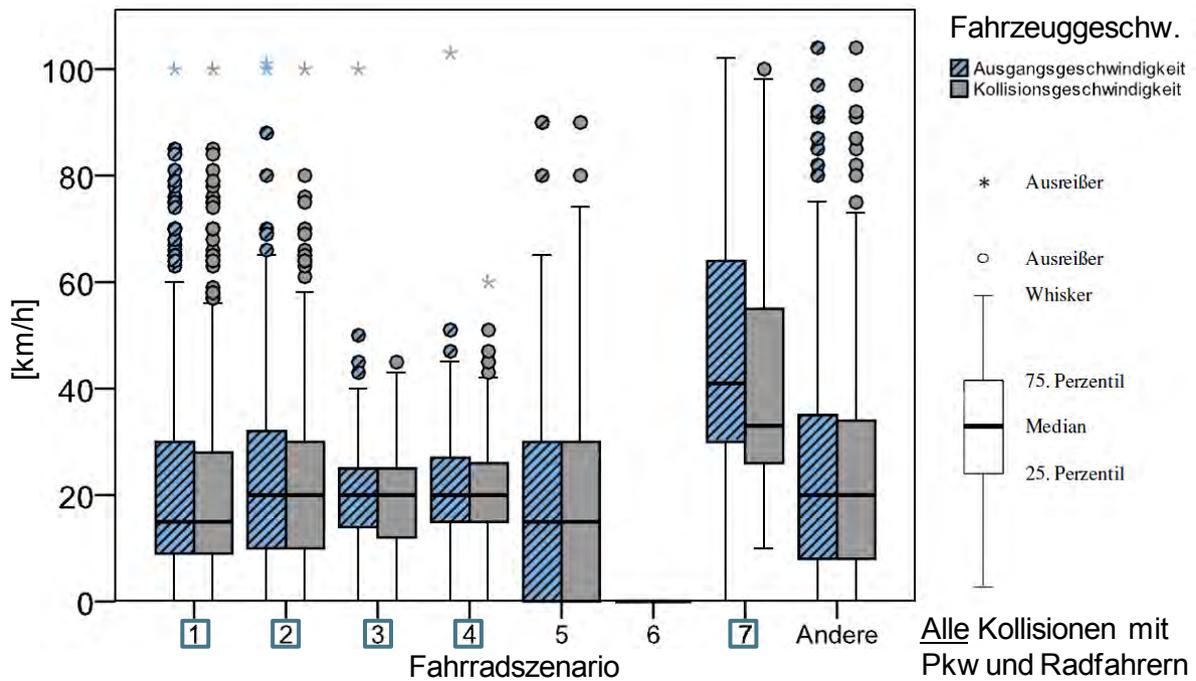


Abb. 2-5: Frontalunfallszenarien - Fahrzeuggeschwindigkeiten (GIDAS, n=2840) [BMW12]

Aus den jeweiligen Boxen für die Ausgangs- und die Kollisionsgeschwindigkeit ist bereits abzusehen, dass ein hoher Anteil der Unfälle ungebremst erfolgt, was in Abb. 2-6 nochmals im Detail dargestellt ist. In den ausgewerteten Daten bremsen mindestens 46% aller Fahrer nicht, während in den übrigen Fällen die Verzögerung meist unter dem möglichen Maximum bleibt [BMW12].

Berücksichtigt man im Rahmen der Auswertung nur Frontalunfälle mit MAIS2+ Verletzungsschweregrad, so nimmt das durchschnittliche Geschwindigkeitsniveau zu. Abb. 2-7 zeigt für die VUFO-Daten (Abb. 2-2) die Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit sowohl für das Fahrzeug als auch für den Radfahrer (Kapitel 2.1.2). Die durchschnittliche Pkw-Kollisionsgeschwindigkeit beträgt hier 26,8 km/h, der Median liegt bei 23 km/h.

Eine weitere Steigerung zeigt sich für eine Eingrenzung der GIDAS-Daten auf MAIS3+ Frontalkollisionen, d.h. Kollisionen mit schweren bis tödlichen Verletzungen des Radfahrers. Eine entsprechende Auswertung in [FRE12] für den Zeitraum von 1999 bis 2010 mit insgesamt 139 Fällen ergibt eine durchschnittliche Pkw-Kollisionsgeschwindigkeit von 36 km/h. Die Bremsrate liegt in den bekannten Fällen bei 53%. Des Weiteren erfolgt in 78% der Kollisionen ein seitlicher Anstoß des Radfahrers. Bei den im Rahmen der Studie ebenfalls unter-

suchten Fußgängerunfällen (n=191) ist auffällig, dass hier der Anteil der Unfälle bei Tageslicht mit 48% im Vergleich zu 74% bei Radfahrern signifikant niedriger ausfällt. Zudem liegt das durchschnittliche Geschwindigkeitsniveau des Pkw mit 44 km/h nochmals höher.

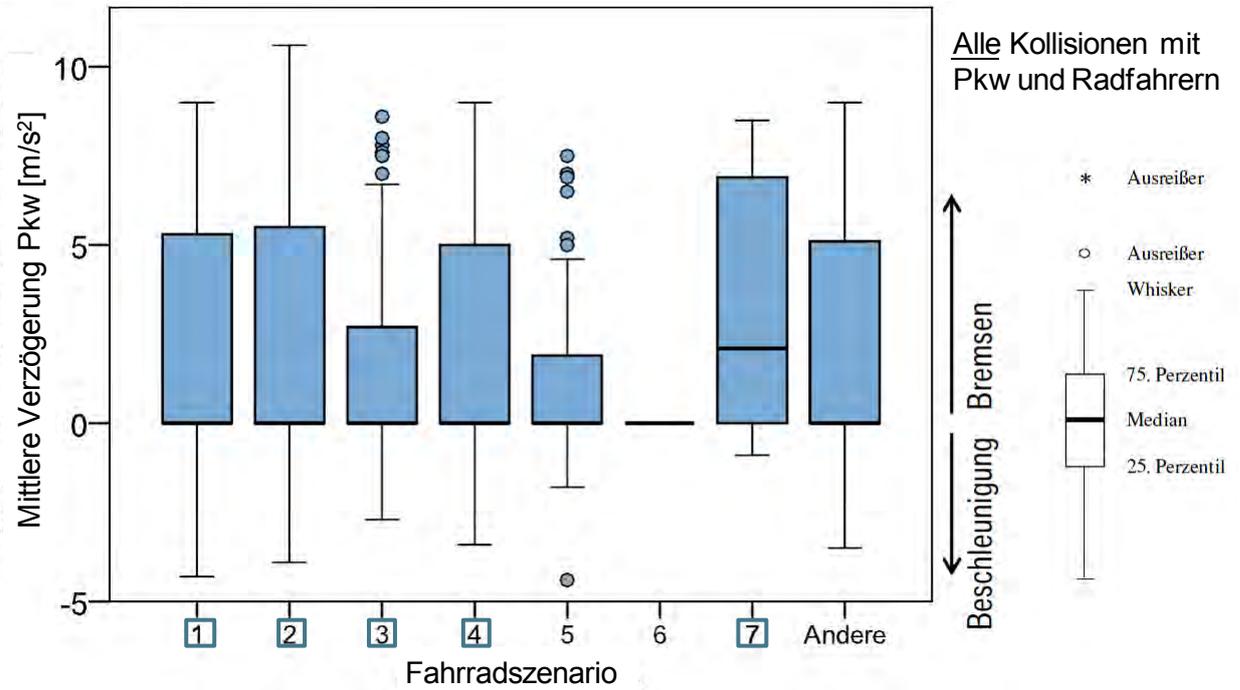


Abb. 2-6: Frontalunfallszenarien - Fahrzeugverzögerung (GIDAS, n=2840) [BMW12]

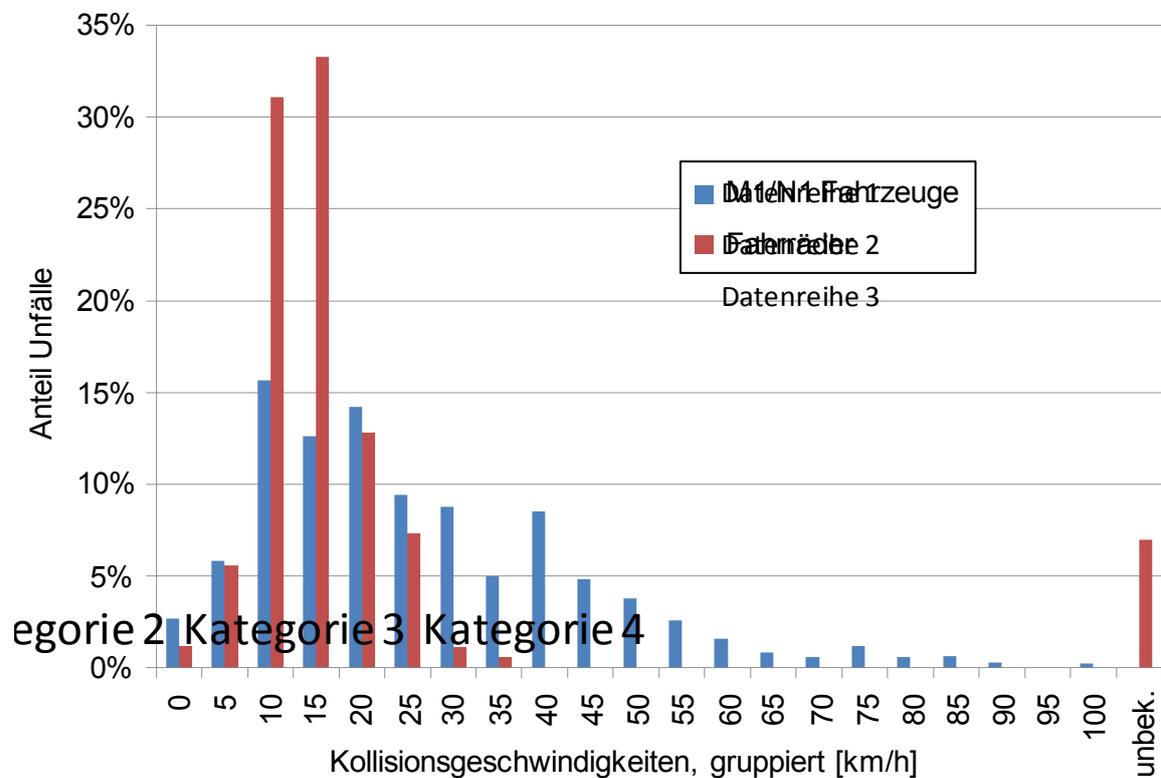


Abb. 2-7: Fzg.- und Radgeschwindigkeiten (GIDAS, MAIS2+ Frontalunfälle, n=403) [LIE11]

Insgesamt ereignen sich bei Radfahrern im Vergleich zu Fußgängern mehr Unfälle bei niedriger Kollisionsgeschwindigkeit, auch bedingt durch den größeren Anteil an Abbiegeunfällen [CAR05]. Ein Beispiel aus der UDV-Datenbank verdeutlicht den Unterschied im Geschwindigkeitsniveau für Szenarien mit geradeausfahrendem und abbiegendem Pkw. Betrachtet man für beide Fälle jeweils das Szenario eines von rechts kreuzenden Radfahrers, so beträgt die durchschnittliche Kollisionsgeschwindigkeit bei geradeausfahrendem Pkw 28 km/h, während sie bei abbiegendem Pkw mit 14 km/h nur halb so hoch ausfällt [KÜH12]. Umfasst die Auswertung alle Frontalunfallszenarien mit kreuzendem Radfahrer innerhalb der UDV-Datenbank (Abb. 2-4), ergibt sich eine durchschnittliche Pkw-Kollisionsgeschwindigkeit von 20 km/h (Abb. 2-8). Neben der Relevanz der Abbiegesituationen ist hierbei auch zu berücksichtigen, dass 70% der seitens der UDV insgesamt betrachteten Frontalunfälle (Abb. 2-3) einen Verletzungsschweregrad von MAIS1 oder MAIS2 aufweisen und somit nicht als schwerwiegend einzustufen sind. Auffällig ist auch hier der hohe Anteil ungebremster Fälle, welcher für die bekannten Fälle 67% beträgt [UDV13].

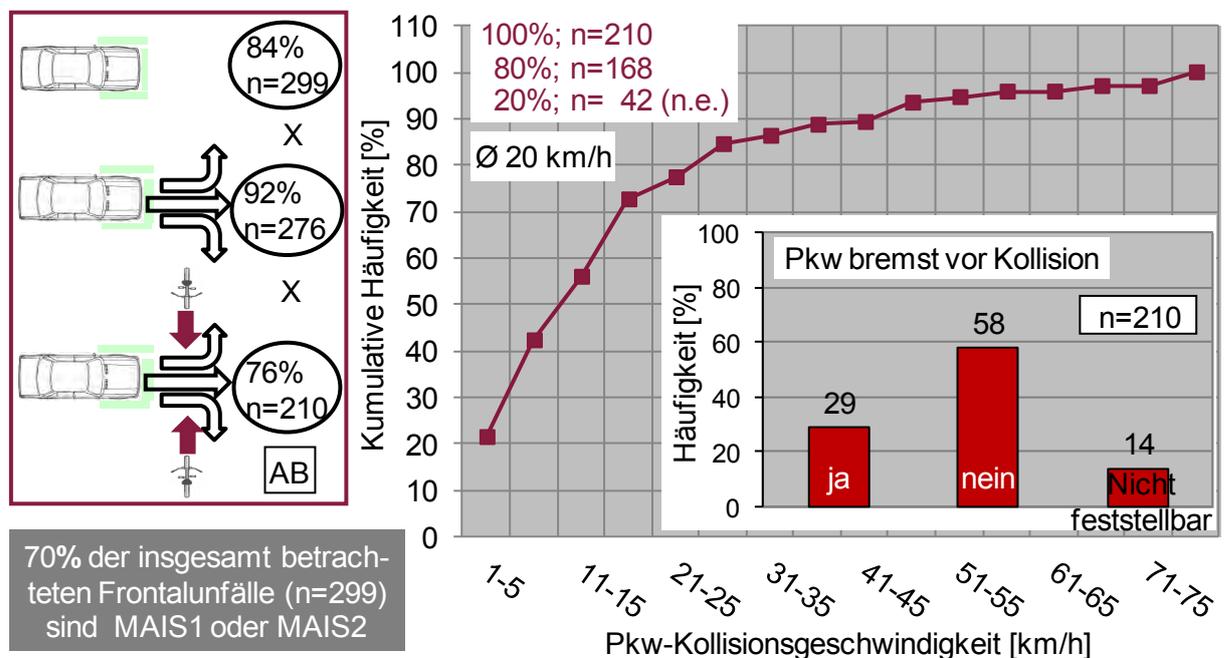


Abb. 2-8: Pkw-Kollisionsgeschwindigkeit - MAIS1+ Frontalunfälle mit kreuzendem Radfahrer (UDV, n=210) [UDV13]

2.1.2 Radfahrgeschwindigkeit

Ein wesentlicher Unterschied zum Fußgängerschutz ergibt sich aus der deutlich höheren Eigengeschwindigkeit von Radfahrern, welche bei der Definition realistischer Szenarien nicht vernachlässigt werden kann. Betrachtet man wiederum die allgemeinen GIDAS-Szenarien aus Abb. 2-1, so unterscheidet sich hier die Geschwindigkeit der Radfahrer nur geringfügig. Die Mediane liegen bei ca. 15 km/h (Abb. 2-9). Viele Radfahrer scheinen dabei vor der Kollision zu verzögern. Generell sind Informationen zu Radfahrgeschwindigkeit und -verzögerung allerdings unschärfebehaftet [BMW12].

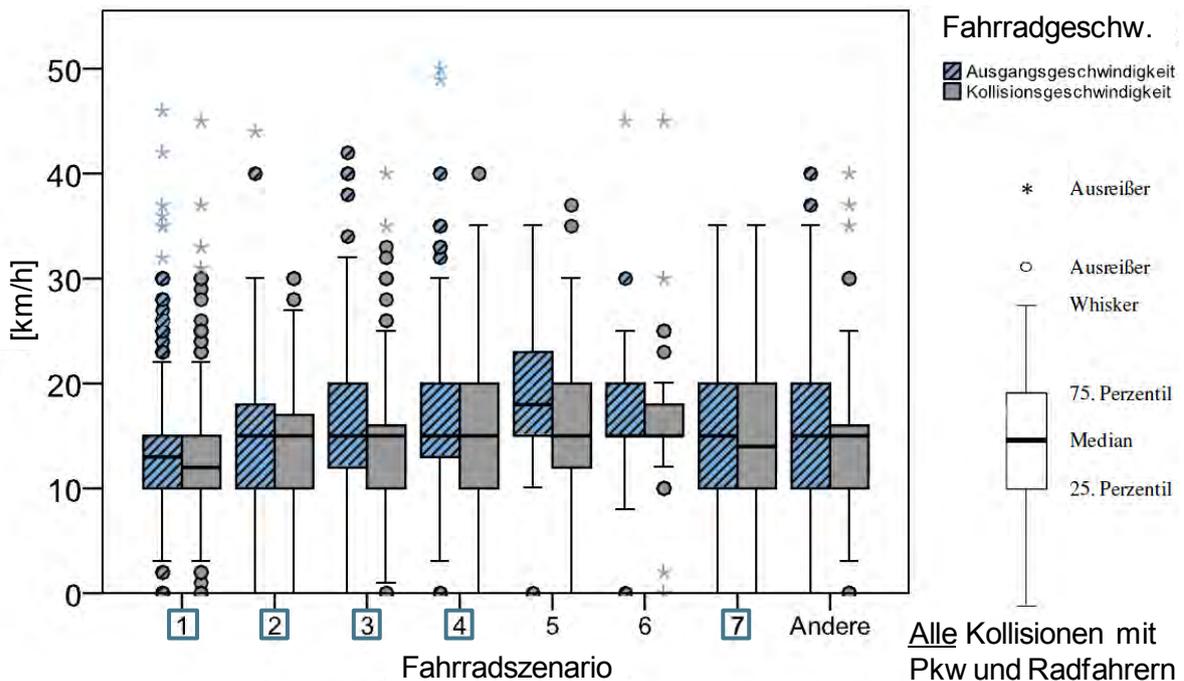


Abb. 2-9: Frontalunfallszenarien - Fahrradgeschwindigkeiten (GIDAS, n=2840) [BMW12]

Bezüglich der auf MAIS2+ Frontalunfälle beschränkten VUFO-Auswertung geht die Verteilung der Radfahrergeschwindigkeiten bereits aus Abb. 2-7 hervor. Hier beträgt die durchschnittliche Radfahrerkollisionsgeschwindigkeit 14,1 km/h. Der Median liegt auch hier bei 15 km/h. Für die in [FRE12] untersuchten MAIS3+ Frontalkollisionen ergibt sich ein Median von 14 km/h, sodass insgesamt die Wahl einer Radfahrergeschwindigkeit von 15 km/h im Rahmen der nachfolgenden Definition repräsentativer Szenarien als sinnvoll erscheint und zudem auch den Vorgaben im SaveCAP-Projekt (Kapitel 2.8) entspricht. Innerhalb der UDV-Datenbank werden keine Geschwindigkeitswerte für den Radfahrer spezifiziert.

2.1.3 Definition geeigneter Anstoßkonstellationen für das Bewertungsverfahren

Die für die Bewertung herangezogenen Szenarien müssen eine hohe Relevanz im Hinblick auf das reale Unfallgeschehen aufweisen und gleichzeitig in der Simulation und idealerweise auch im Versuch umsetzbar sein. Letzteres schließt die Abbildung einer Kurvenfahrt des Fahrzeugs aus, da der im Projekt für die Full-Scale-Tests vorgesehene Versuchsaufbau nur eine gerade Bewegungsrichtung des Fahrzeugs zulässt.

Unter Berücksichtigung dieses Aspektes werden auf Basis der in Kapitel 2.1 ausgewerteten Unfallanalysedaten in einem ersten Schritt insgesamt drei repräsentative Szenarien definiert (Abb. 2-10), welche im Folgenden näher ausgeführt und begründet werden. Es handelt sich dabei um zwei rechtwinklige Konstellationen, d.h. mit einem Kollisionswinkel von 90°, sowie eine weitere Konstellation mit einem sich schräg auf das geradeausfahrende Fahrzeug zubewegenden Radfahrers, die gleich zwei relevante Abbiegesituationen repräsentieren soll. Als Referenzpunkt bei der Positionierung des Radfahrers dient die Mitte des Kurbeltretlagers. Das Szenario „Zentraler rechtwinkliger Anprall“ sieht eine mittige Anstoßposition des Rad-

fahrers vor. Mit Hinblick auf die relativ hohe Eigengeschwindigkeit des Radfahrers ist diese auf Basis vorab durchgeführter Simulationen so definiert, dass auch bei niedrigerer Fahrzeuggeschwindigkeit ein Auftreffen des Radfahrerkopfes auf die Fahrzeugfront gewährleistet sein sollte. Hier nimmt infolge der bei reduzierter Kollisionsgeschwindigkeit verlängerten Kopfaufprallzeit und dem quer zur Fahrtrichtung des Fahrzeugs gerichteten Geschwindigkeitsvektors des Radfahrers die Wahrscheinlichkeit zu, dass dieser sich bereits vor dem Kopfaufprall jenseits der Fahrzeugfront befindet. Je weiter die Erstkontaktstelle von der rechten Fahrzeugaußenseite entfernt ist, desto eher trifft der Kopf des Radfahrers nicht mehr auf der Fahrzeugfront auf. Für die zentrale Anstoßposition wird ein Versatz des Kurbeltretlagers von 20 cm relativ zur Fahrzeuglängsachse und entgegen der Fahrtrichtung des Radfahrers gewählt. Für die definierte Radfahrgeschwindigkeit von 15 km/h kann so bis zu Fahrzeuggeschwindigkeiten von 20 km/h noch ein Kopfaufprall auf der Front erzielt werden, sodass das Szenario auch für Untersuchungen mit reduzierter Kollisionsgeschwindigkeit innerhalb des Bewertungsverfahrens geeignet ist.

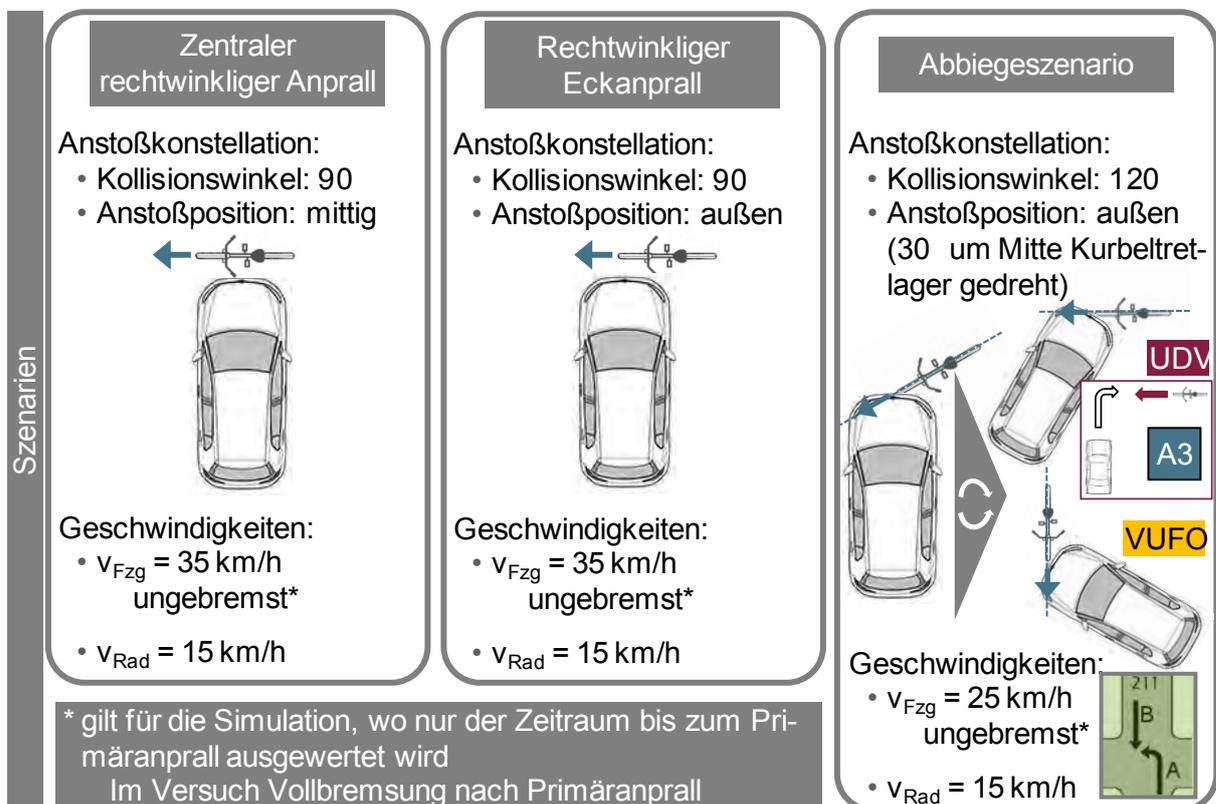


Abb. 2-10: Repräsentative Szenarien für Simulation und Versuch

In der zweiten rechtwinkligen Konstellation erfolgt ein Anstoß des Radfahrers außen an der Fahrzeugfront. Hier wird das Fahrrad so positioniert, dass sich die Mitte des Kurbeltretlagers in einer Flucht mit der Außenkontur des Fahrzeugkotflügels befindet. Durch dieses Szenario wird die veränderte Unfallkinematik eines Eckanpralls berücksichtigt, welche sich zwangsläufig aus dem dezentralen Anstoß des Fahrrads ergibt. Insgesamt beruhen die beiden Anstoßkonstellationen „Zentraler rechtwinkliger Anprall“ und „Rechtwinkliger Eckanprall“ auf der

hohen Relevanz der Unfallszenarien mit geradeausfahrendem Pkw und kreuzendem Radfahrer. Allein der hier abgebildete von rechts kommende Radfahrer weist in den GIDAS-Daten einen Anteil von 35% auf (Abb. 2-1). Unter der Annahme, dass das Szenario des von links kreuzenden Radfahrers gleichermaßen abgedeckt wird, steigt der Anteil der adressierten Realunfallsituationen sogar auf über 51% (Abb. 2-1). Diese Anteile bleiben auch bei Eingrenzung der GIDAS-Daten auf MAIS2+ Frontalunfälle gültig (Abb. 2-2).

Ein wichtiger Aspekt ist in diesem Zusammenhang die Wahl der Fahrzeuggeschwindigkeit, die zunächst unabhängig von Randbedingungen des Bewertungsverfahrens betrachtet wird. Der in Abb. 2-10 definierte Betrag von 35 km/h orientiert sich am oberen Ende des im realen Unfallgeschehen mit der größten Häufigkeit auftretenden Geschwindigkeitsspektrums (Kapitel 2.1.1). Ferner repräsentiert er die durchschnittliche Pkw-Kollisionsgeschwindigkeit von MAIS3+ Frontalunfällen innerhalb der GIDAS-Datenbank (36 km/h), welche durch das Bewertungsverfahren hauptsächlich adressiert werden (Kapitel 4).

Das dritte aus den Unfalldaten abgeleitete Szenario ergibt sich unmittelbar aus der äußeren rechtwinkligen Anstoßkonstellation, indem man hier das Fahrrad unter einem Winkel von 30° um die Mitte des Kurbeltretlagers in Richtung Fahrzeug dreht. Durch Drehung der gesamten Konstellation lässt sich veranschaulichen, wie diese mit den jeweils relevantesten Abbiegeszenarien innerhalb der UDV- sowie MAIS2+ GIDAS-Daten korrespondiert (Abb. 2-10). Die Abbiegetrajektorie des Pkw wird dabei aufgrund der kurzen Zeitspanne zwischen Erstkontakt und primären Kopfaufprall, welche für die definierte Konstellation für alle Radfahrergrößen und Fahrzeuggeometrien unterhalb von 320 ms liegt, vernachlässigt. Generell sollen durch das Szenario solche Abbiegesituationen adressiert werden, in denen der Geschwindigkeitsvektor des Radfahrers in Richtung des entgegenkommenden Pkw zeigt, wodurch sich eine höhere Relativgeschwindigkeit des Kopfes ergibt. Aufgrund des Abbiegevorgangs des Pkw wird dessen Geschwindigkeit hier allerdings niedriger gewählt als in den beiden rechtwinkligen Anstoßkonstellationen. Auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 2.1.1 erfolgt eine Festlegung der Fahrzeuggeschwindigkeit auf 25 km/h, welche wiederum das obere Spektrum des relevanten Geschwindigkeitsbereichs innerhalb der GIDAS-Datenbank widerspiegelt (Abb. 2-5).

Unter Berücksichtigung des hohen Anteils ungebremster Unfälle wird auch in den drei definierten Szenarien das Fahrzeug vor dem Primäranprall des Kopfes nicht verzögert. Dies bildet zum einen den ungünstigsten und gleichzeitig relevantesten Fall ab und sorgt zum anderen für einheitliche und reproduzierbare Randbedingungen bei der Untersuchung des Primäranpralls. So muss beispielsweise ein Bremsnicken des Fahrzeugs im Rahmen der Simulationen nicht abgebildet werden, da diese nur bis zum Primäranprall des Kopfes berechnet und ausgewertet werden. In den späteren Full-Sale-Tests wird das Versuchsfahrzeug unmittelbar nach dem Kopfaufprall abgebremst.

Die Umsetzung der identifizierten Szenarien im Rahmen des bestehenden Bewertungsverfahrens ist mit Anpassungen und Einschränkungen verbunden, welche im Folgenden näher erläutert werden. Die im Vorgängerprojekt zur Bewertung des Fußgängerschutzes definierte

Fahrzeuggeschwindigkeit beträgt 40 km/h und liegt somit um 5 km/h höher als die für die rechtwinkligen Radfahrerunfallkonstellationen ermittelte Geschwindigkeit. Möchte man das durch eine Fahrzeugfront im Falle eines Frontalunfalls für Fußgänger und Radfahrer hervorgerufene Verletzungsrisiko unter gleichen Randbedingungen bewerten, so muss die Fahrzeuggeschwindigkeit jeweils identisch sein. Vor dem Hintergrund des in Kapitel 2.1.1 aufgezeigten breiten Geschwindigkeitsspektrums für Frontalunfälle zwischen Pkw und Radfahrern, welches Fahrzeuggeschwindigkeiten bis 60 km/h und darüber hinaus umfasst, und einer durchschnittlichen Pkw-Kollisionsgeschwindigkeit bei den im Fokus der Bewertung stehenden MAIS3+ Frontalunfällen von 36 km/h, ist eine Anpassung der Fahrzeuggeschwindigkeit an das Niveau des Fußgängerschutzes im Zuge einer einheitlichen Bewertung sinnvoll. Somit wird auch für das Radfahrerschutzbewertungsverfahren eine Basisgeschwindigkeit des Fahrzeuges von 40 km/h zugrunde gelegt (Abb. 2-11).

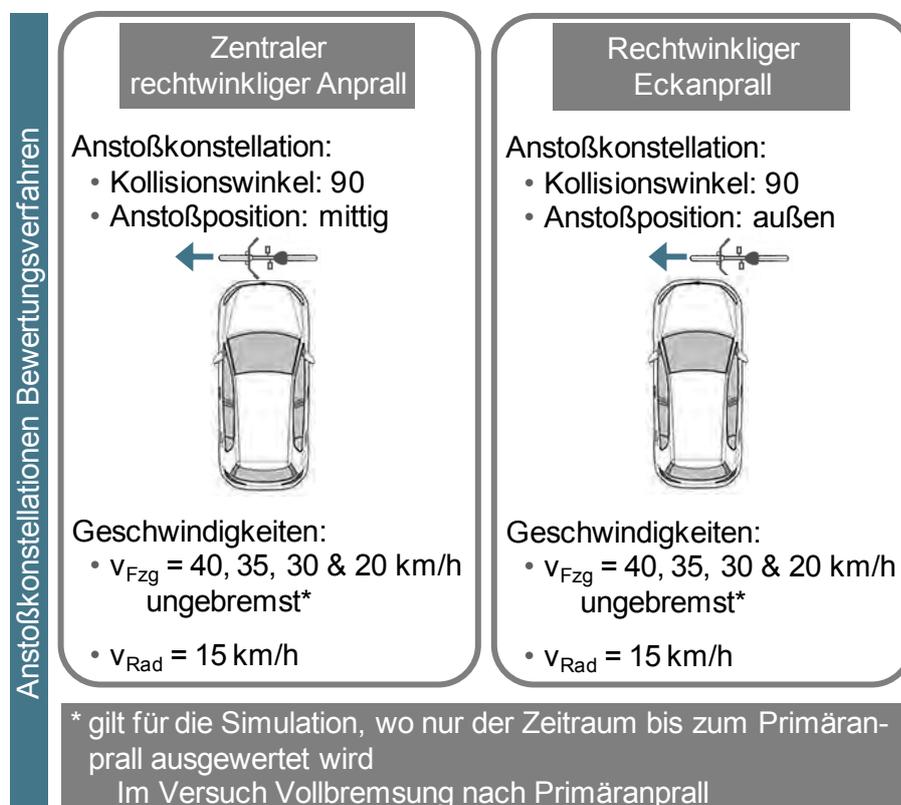


Abb. 2-11: Radfahrer-Anstoßkonstellationen für das Bewertungsverfahren

Ausgehend von dieser Basisgeschwindigkeit werden im Zuge der geschwindigkeitsabhängigen Indexberechnung (Kapitel 4.1.7) auch Fahrzeuggeschwindigkeiten von 35, 30 und 20 km/h zur Bewertung aktiver Systeme berücksichtigt, sodass die innerhalb der rechtwinkligen Radfahrerunfallkonstellationen definierte Fahrzeuggeschwindigkeit bei Bedarf jederzeit als Bewertungsgrundlage herangezogen werden könnte.

Eine Bewertung in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit setzt ein einheitliches Geschwindigkeitsniveau in den zugrunde liegenden Anstoßkonstellationen voraus, sodass ein

direkter, eindeutiger Bezug zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und berechnetem Indexwert besteht. Dies wäre bei Implementierung einer Anstoßkonstellation mit abweichender Fahrzeuggeschwindigkeit, wie dem Abbiegeszenario in Abb. 2-10, nicht der Fall, da so entsprechend niedrigere Kopfaufprallgeschwindigkeiten Eingang in die Bewertung finden würden. Aus diesem Grunde wird das Abbiegeszenario im Rahmen des Bewertungsverfahrens nicht berücksichtigt (Abb. 2-11). Allerdings wurde dieses im BASt-Projekt betrachtet, sodass die Daten prinzipiell verfügbar sind.

2.2 Verteilung der Kopfaufprallbereiche in Fahrzeiglängsrichtung

Neben der Definition geeigneter Anstoßkonstellationen umfasst die Unfallanalyse auch eine Betrachtung der eigentlichen Kollision und deren Auswirkungen auf den Radfahrer. Hier sollen mit Hinblick auf das Bewertungsverfahren Fragen bezüglich der relevanten Kopfaufprallbereiche sowie der Verletzungsschwere und -häufigkeit einzelner Körperregionen aber auch hinsichtlich der verletzungsverursachenden Fahrzeugteile geklärt werden.

Ein entscheidender Unterschied des Radfahrerunfalls gegenüber dem Fußgängerunfall liegt in der Verteilung der Kopfaufprallorte in Fahrzeiglängsrichtung, welche hier tendenziell weiter hinter zu finden sind. Ein Vergleich der Kopfabwickellängen (WAD, Wrap Around Distance) von 1414 Fußgänger- und 2262 Radfahrerunfällen mit Kraftfahrzeugen in [ZAN12] und [ZAN13] versucht diesen Effekt genauer zu quantifizieren (Abb. 2-12). Dabei handelt es sich um Fälle innerhalb der GIDAS-Datenbank, die einen Erstkontakt des ungeschützten Verkehrsteilnehmers im Bereich $-85 \text{ cm} \leq y_{0, \text{Fzg.}} \leq +85 \text{ cm}$ aufweisen. Der Versatz der jeweiligen S-Kurven macht die Rückverlagerung der Radfahrerkopfaufprallorte gegenüber denen der Fußgänger deutlich (Abb. 2-12 links).

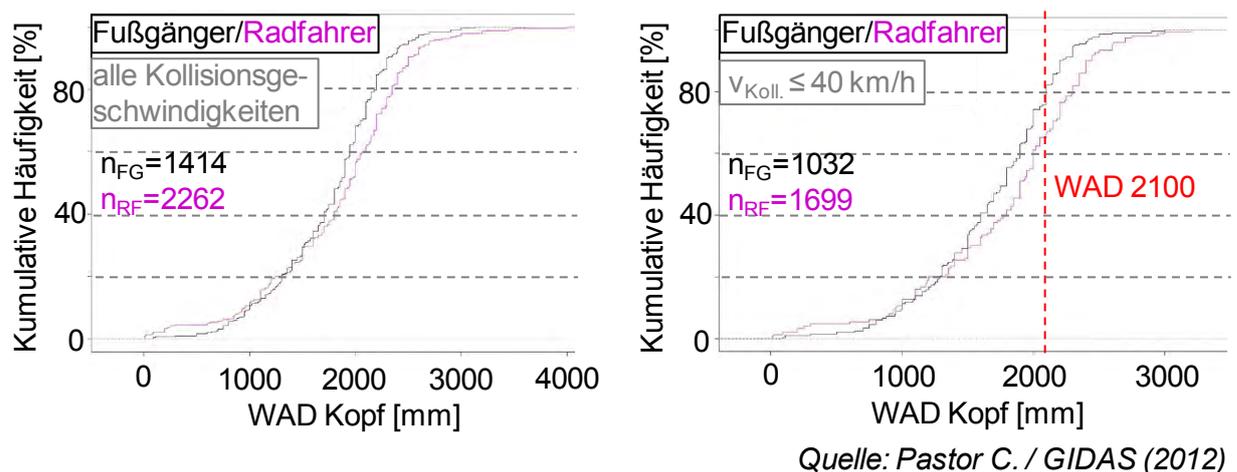


Abb. 2-12: Vergleich der Verteilung der Kopfabwickellängen (WAD) für Fußgänger und Radfahrer (GIDAS, $n_{\text{Fußgänger}}=1414$, $n_{\text{Radfahrer}}=2262$) [ZAN12] [ZAN13]

Grenzt man nun den Geschwindigkeitsbereich ein, sodass Kollisionsgeschwindigkeiten oberhalb von 40 km/h und damit oberhalb der Euro NCAP-Fußgängerschutzprüfgeschwindigkeit nicht betrachtet werden (Abb. 2-12 rechts), lässt sich eine Aussage darüber treffen, wie groß

der Anteil der Fußgänger und theoretisch auch der Radfahrer ist, die durch die verbraucher- schutzseitigen Prüfbedingungen adressiert werden. Als Kriterium dient hier die Größe des Euro NCAP-Prüfbereichs, welcher bei einer Abwickellänge von 2100 mm endet. Bestimmt man für diese Abwickellänge die zugehörige kumulative Häufigkeit, so zeigt sich, dass der Prüfbereich ca. 80% der Fußgänger- aber nur 65% der Radfahrer kopfaufprallorte im realen Unfallgeschehen abdeckt [ZAN12] [ZAN13].

Eine für Radfahrer gleiche Effektivität des Prüfbereichs wie im Fußgängerschutz, d.h. eine Abdeckung von 80% aller Kopfaufprallorte im Geschwindigkeitsbereich bis 40 km/h, kann gemäß Abb. 2-12 durch eine Ausdehnung bis zur einer WAD von 2300 mm erwartet werden [ZAN12] [ZAN13]. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Abwickellänge in GIDAS den jeweiligen Aufprallpunkten des ungeschützten Verkehrsteilnehmers folgend gemessen wird, also nicht ausschließlich in Längsrichtung wie in den gesetzlichen und verbraucher- schutzseitigen Prüfverfahren. Somit sollten im Vergleich dazu die Kopfaufprallpunkte in GIDAS bei gleichem Abwickellängenwert tendenziell etwas weiter vorne liegen.

Eine simulative Studie im Rahmen des APROSYS-Projekts vergleicht die Lage der Kopfauf- prallorte von Fußgängern und Radfahrern für vier generelle Fahrzeugfronten. Dies erfolgt je- weils für einen 50%-Mann in zentraler Anstoßposition mit zwei Schritt- bzw. Pedalstellungen und ohne eigene Geschwindigkeit. Der Radfahrer wird dabei einmal mit fahrzeugeitigem Bein oben und einmal mit fahrzeugeitigem Bein unten abgebildet. Die untersuchten Fahr- zeuggeschwindigkeiten betragen 5, 10 und 15 m/s. Abb. 2-13 zeigt die Kopfaufpralltrajek- torien für die Fahrzeugfronten Supermini und Large Family Car, Abb. 2-14 die für die Fahr- zeugfronten MPV (Multi-purpose Vehicle) und SUV (Sport Utility Vehicle) [WAT09].

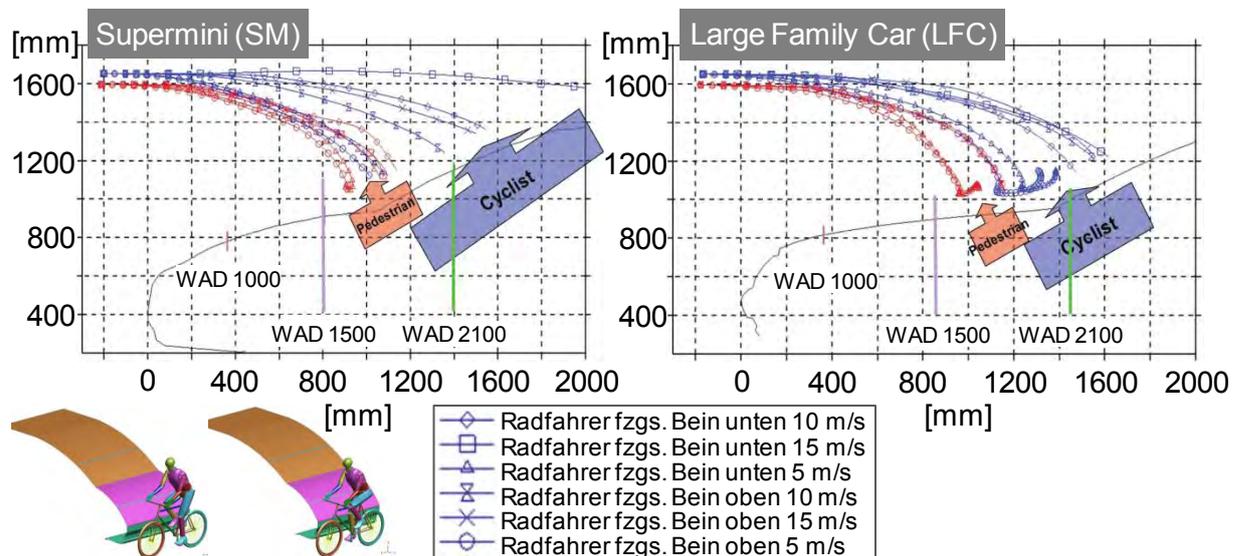


Abb. 2-13: Kopfaufpralltrajektorien der Fahrzeuge Supermini und Large Family Car [WAT09]

Beim Supermini und beim Large Family Car liegen die Radfahrer kopfaufprallorte, abgesehen von einem Dachaufprall beim Supermini für fahrzeugeitiges Bein unten und einer Fahrzeug- geschwindigkeit von 15 m/s, ausschließlich auf der Windschutzscheibe. Zudem befinden sie

sich, nimmt man die Simulationen mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 5 m/s aus, alle- samt jenseits der WAD 2100. Beim MPV erfolgt der Kopfaufprall des Radfahrers ebenfalls ausschließlich auf der Windschutzscheibe, hier allerdings generell unterhalb der WAD 2100-Grenze. Die hohe Haubenvorderkante des SUV verhindert ein „Aufrutschen“ des Radfahrers auf die Haube und führt zu einer signifikanten Vorverlagerung der Kopfaufprallorte, welche deutlich vor der WAD 2100 liegen, sodass hier der Unterschied zum Fußgänger weniger stark ausgeprägt ist als bei den anderen Fahrzeugfronten.

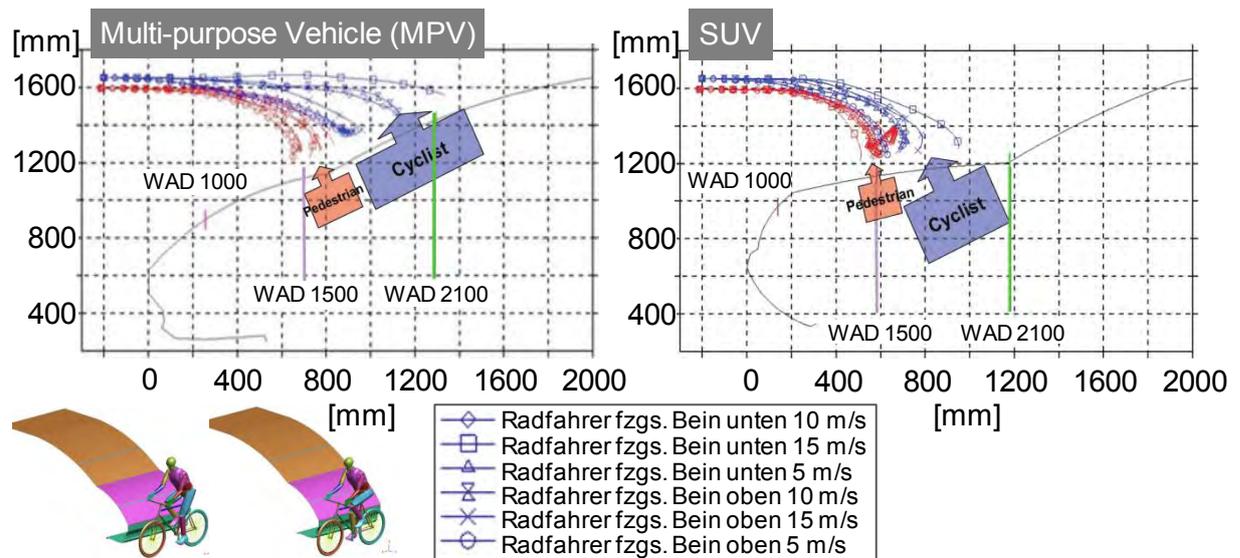


Abb. 2-14: Kopfaufpralltrajektorien der Fahrzeuge MPV und SUV [WAT09]

Allgemein weist die Konstellation „Fahrzeugseitiges Bein unten bei $v_{\text{Fahrzeug}} = 15 \text{ m/s}$ “ die längsten longitudinalen Trajektorien und die Konstellation „Fahrzeugseitiges Bein oben bei $v_{\text{Fahrzeug}} = 5 \text{ m/s}$ “ die kürzesten longitudinalen Trajektorien für alle vier Fahrzeugfronten auf. Die Kopfaufpralltrajektorien des Radfahrers liegen im Vergleich zum Fußgänger in longitudinaler Richtung weiter zur Windschutzscheibe und streuen über einen größeren Bereich.

Von Interesse mit Hinblick auf das Bewertungsverfahren ist in diesem Zusammenhang auch ein Blick auf die Kopfaufprallwinkel und -geschwindigkeiten. Bei den in Abb. 2-15 dargestellten Werten bleibt allerdings zu beachten, dass diese auf vereinfachte Fahrzeugmodelle ohne Pfeilung zurückgehen und für den Radfahrer, im Gegensatz zu den Simulationsergebnissen in Kapitel 3.6, keine eigene Geschwindigkeit definiert ist. Dadurch kommt es zu deutlichen Abweichungen. Hinsichtlich der Kopfaufprallwinkel ruft hier der SUV die höchsten Werte für Fußgänger und Radfahrer hervor. Beim Supermini sowie beim MPV sind die Radfahrerwinkel deutlich geringer als die Fußgängerwinkel. Abgesehen vom SUV liegen die Kopfaufprallwinkel des Radfahrers unterhalb des aktuellen gesetzlichen und verbraucher- schutzseitigen Erwachsenenprüfwinkels zum Fußgängerschutz.

Bei den Kopfaufprallgeschwindigkeiten ergeben sich für Supermini, MPV und SUV keine signifikanten Unterschiede zwischen Fußgänger und Radfahrer. Allerdings liegen beim LFC die Werte des Radfahrers deutlich höher. Generell ist bezüglich der Ergebnisse aus [WAT09]

auch zu beachten, dass hier nur der 50%-Mann betrachtet wird und somit Aussagen zum gesamten Radfahrergrößenspektrum nicht möglich sind. Des Weiteren wird nur eine zentrale Anstoßposition berücksichtigt und zudem auf die Abbildung einer waagerechten Pedalstellung verzichtet. Ähnliches gilt auch für eine simulative Studie im Rahmen des SaveCAP Projekts, dessen Inhalte und Ergebnisse in Kapitel 2.8 näher erläutert werden.

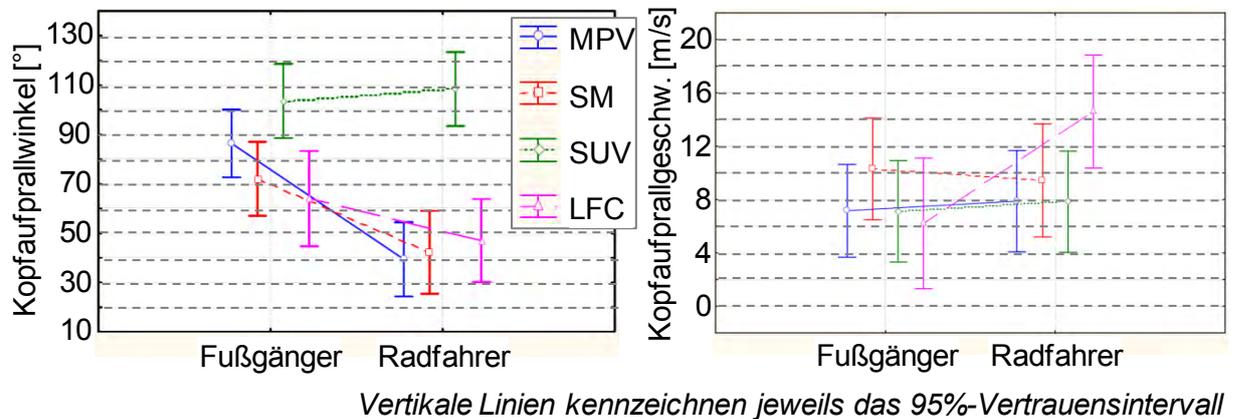


Abb. 2-15: Relative Kopfaufprallwinkel und -geschwindigkeiten pro Fahrzeugfront [WAT09]

Seitens der BASt durchgeführte Radfahrerversuche unter Verwendung eines HII-Dummys mit Stehbecken in zentraler Anstoßposition bestätigen die APROSYS-Ergebnisse bezüglich der Kopfaufprallorte eines 50%-Mannes (Abb. 2-16). Hier zeigt sich, dass der Kopfaufprallbereich des 50%-Mannes nur teilweise durch den aktuell beim Fußgängerschutz definierten Prüfbereich abgedeckt wird. In zwei Fällen (Test 1 und 2) liegen die Kopfaufprallorte deutlich jenseits der WAD 2100, in Test 3 knapp darüber [ZAN12].

Test	1	2	3	4	5
Kopfhöhe HII [cm]	180	181	176	177	174
WAD HII Kopf [mm]	> 2100	> 2100	> 2100	< 2100	≈ 2100
Kollisionsgeschw. [m/s]	11,1				

Abb. 2-16: Versuche mit verschiedenen Rahmen- und Radgrößen (HII Dummy, zentraler Anstoß, Golf V, $v_{\text{Fahrzeug}} = 40 \text{ km/h}$, $v_{\text{Fahrrad}} = 0 \text{ km/h}$) [ZAN12]

Die Tests im Rahmen des SaveCAP-Projekts untersuchen den Kopfaufprallbereich eines Polar-II Dummys für verschiedene Fußgänger- und Radfahreranstoßkonstellationen und zeigen dabei die gleiche Tendenz wie die BASt-Versuche. Die erzielten Abwickellängen liegen hier zwischen 2000 und 2500 mm (Kapitel 2.8) [SCH12a].

2.3 Verteilung der Erstkontaktstellen in Fahrzeugquerrichtung

Eine GIDAS-Auswertung in [MEI07] zeigt, dass Radfahrer nur geringfügig häufiger an der rechten als an der linken Seite des Fahrzeuges anprallen (Abb. 2-17). Auch der Unterschied zwischen der Erstkontaktstelle des Radfahrers und der Erstkontaktstelle des Fahrrads am Fahrzeug ist gering. Die Mitte der Fahrzeugfront ist dabei am Relevantesten, wobei hier die als unbekannt in der Datenbank eingetragenen Fälle ebenfalls zugeordnet werden. Es wird darüber hinaus jedoch auch deutlich, dass neben dem zentralen Anstoß ein Anprall an der Außenseite der Fahrzeugfront am Häufigsten vorkommt, wodurch die in Abb. 2-10 definierten Szenarien bestätigt werden.

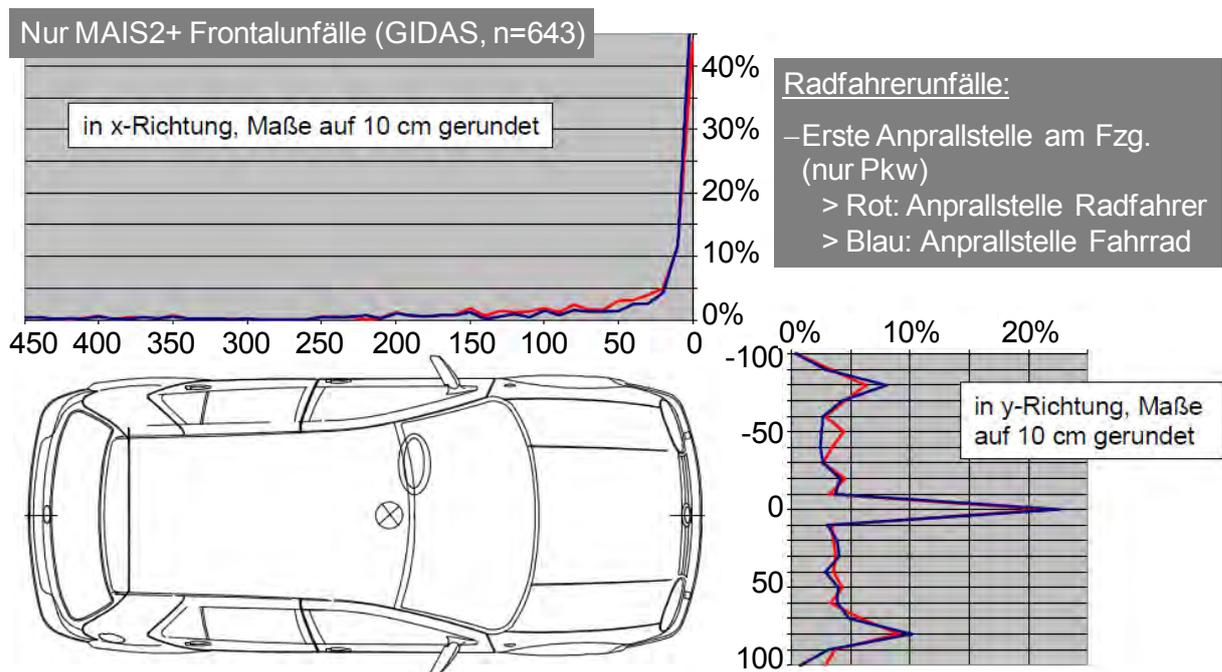


Abb. 2-17: Verteilung der Radfahrererstkontaktstellen in Fahrzeugquerrichtung [MEI07]

Die Unfallanalyse innerhalb des APROSYS-Projekts betrachtet die Verteilung der Erstanprallpunkte am gesamten Fahrzeug und greift diesbezüglich ebenfalls auf GIDAS-Daten ($n = 1266$, 1999-2004) sowie eine schwedische Untersuchung der Fahrzeugschäden in Radfahrerunfällen (STRADA, $n = 8415$, 1999-2004) zurück [CAR05]. In beiden Studien überwiegt der Anteil der Fahrzeugfront und hier vor allem der des zentralen Bereichs deutlich. Während in den GIDAS-Daten für die äußeren Anstoßpositionen die rechte Seite dominiert, ist in den schwedischen Daten der Anteil der Schäden an der linken Frontseite höher.

2.4 Verletzungsverursachende Teile der Fahrzeugfront

Der für eine Verletzung relevante Bereich der Fahrzeugfront ist abhängig vom betroffenen Körperteil sowie der Körpergröße, -haltung und Sitzposition des Radfahrers und letztlich natürlich von der Frontgeometrie des Pkw. In Abb. 2-18 werden die insgesamt 604 Kopf- und Gesichtsverletzungen der in [LIE11] ausgewerteten MAIS2+ Radfahrerfrontalunfälle den je-

weils verletzungsverursachenden Teilen der Fahrzeugfront zugewiesen. Dabei werden drei Verletzungsgrade unterschieden, wodurch die Anzahl der zuzuweisenden Verletzungen entsprechend eingeschränkt wird. Man erkennt, dass mit zunehmender Verletzungsschwere die Relevanz von Windschutzscheibenrahmen und Windschutzscheibe zunimmt. Allerdings geht aus [LIE11] nicht hervor, wie diese zueinander abgegrenzt sind. Des Weiteren ist der Sekundäraufprall sehr bedeutend im Hinblick auf Verletzungen des Kopfes und des Gesichts, wobei der Anteil gegenüber dem Primäranprall mit steigendem Verletzungsgrad abnimmt. Der Bereich des Frontend einschließlich der Haubenvorderkante ist erwartungsgemäß irrelevant für Kopfverletzungen.

<i>head/face injuries</i>	<i>AIS1+</i>	<i>AIS2+</i>	<i>AIS3+</i>
window frame / A-pillar	43,3	28,9	15,8
windscreen	131,5	74,4	21,9
bonnet	12,2	6,6	--
bonnet leading edge	0,5	0,5	--
fender	3,9	1,6	--
grill and headlamps	--	--	--
bumper	--	--	--
other veh. parts / front nfs. *	23,4	9,5	2,9
own bicycle / other / unknown **	10,4	0,5	--
ground impact	378,9	159,9	25,0
total	604,1	281,9	65,6

* incl. mirrors, B-pillar, doors, wheels, roof, glass etc.

** incl. body motion, all parts of the bicycle etc.

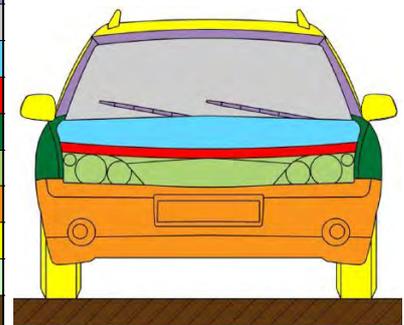


Abb. 2-18: Verletzungsverursachende Teile für Kopf-/Gesichtsverletzungen, n=604,1 (GIDAS, MAIS2+ Frontalunfälle, n=403) [LIE11]

Eine analoge Auswertung erfolgt in [LIE11] auch für Verletzungen der unteren Extremitäten inkl. Becken (Abb. 2-19, n = 493) sowie des Thorax.

<i>injuries on lower extremities</i>	<i>AIS1+</i>	<i>AIS2+</i>	<i>AIS3+</i>
window frame / A-pillar	1,4	0,5	--
windscreen	6,5	1,7	--
bonnet	22,7	5,9	1,1
bonnet leading edge	25,8	9,8	3,7
fender	27,0	8,6	0,9
grill and headlamps	8,1	3,9	0,5
bumper	118,3	70,7	14,1
other veh. parts / front nfs. *	34,8	12,1	3,1
own bicycle / other / unknown **	38,5	10,7	--
ground impact	210,1	49,8	7,9
total	493,1	173,8	31,3

* incl. mirrors, B-pillar, doors, wheels, roof, glass etc.

** incl. body motion, all parts of the bicycle etc.

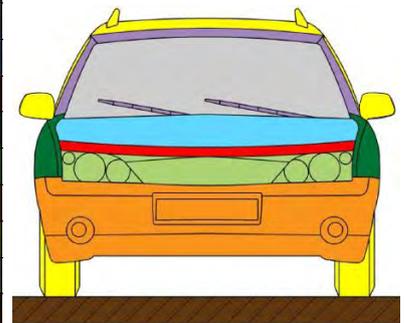


Abb. 2-19: Verletzungsverursachende Teile für Verletzungen der unteren Extremitäten (inkl. Becken), n=493,1 (GIDAS, MAIS2+ Frontalunfälle, n=403) [LIE11]

Die Verletzungen der unteren Extremitäten werden hauptsächlich durch den Stoßfänger verursacht, welcher oftmals erster Kontaktpunkt zwischen Radfahrer und Fahrzeug ist. Auch hier ist der Sekundäraufprall von hoher Relevanz, welche für höhere AIS-Grade erneut gegenüber dem Primäranprall deutlich abnimmt. Thoraxverletzungen (n = 113) werden hauptsächlich durch den Sekundäraufprall verursacht, gefolgt von der Windschutzscheibe, dem Windschutzscheibenrahmen und der Haube. Die Haubenvorderkante ist für AIS3+ Thoraxverletzungen nicht relevant [LIE11].

Eine weitere GIDAS-Untersuchung bezüglich der Verletzungsverursachenden Anprallbereiche ist im Rahmen des SaveCAP-Projekts für den Zeitraum von 1999 bis 2010 erfolgt und beinhaltet keine SUVs. Die Auswertung gibt für Radfahrer und Fußgänger den Anteil an AIS3+ Verletzungen je Körperregion und Fahrzeugbereich an (Abb. 2-20). Die Prozentwerte beziehen sich jeweils auf die Gesamtzahl der schwer verletzten Radfahrer und Fußgänger mit bekannter Verletzungsursache. Da eine Person in mehr als einer Körperregion schwere Verletzungen erleiden kann, ergeben die Werte aufsummiert über 100%. Die häufigste Kombination aus AIS3+ Verletzung und verursachendem Bereich ist für Radfahrer der Kopfanprall im Windschutzscheibenbereich (23%), gefolgt vom Beinanprall (inkl. Becken) an die Front (22%). Für Fußgänger verhält es sich ähnlich, allerdings ist hier der Beinanprall an die Front mit 41% deutlich häufiger Ursache schwerer Verletzungen während der Anteil des Kopfanpralls im Windschutzscheibenbereich bei 27% liegt. Die Aufprallkonstellationen „Brust gegen Haube (inkl. Oberseite Kotflügel)“, „Brust gegen Windschutzscheibenbereich“, wobei Brust auch Abdomen und Thorax umfasst, und „Kopf gegen Grund“ sind etwa gleich häufig für beide Gruppen. Alle anderen Kombinationen treten zu weniger als 10% auf [FRE12].

Radfahrer: n=139 (18 getötet), Fußgänger: n=191 (47 getötet)
Pro Opfer mehr als eine AIS3+ Verletzung möglich

	Bein	Arm	Brust	Nacken	Kopf
Frontend	22% (41%)*	0% (1%)	2% (5%)	1% (0%)	0% (1%)
Haubenvorderkante	1% (5%)	0% (0%)	0% (2%)	0% (0%)	0% (1%)
Haubenbereich	4% (7%)	2% (3%)	11% (13%)	0% (1%)	1% (5%)
WSS, A-Säulen & Dachvorderkante	1% (2%)	1% (1%)	11% (14%)	1% (3%)	23% (27%)
Boden	8% (5%)	4% (4%)	8% (9%)	1% (2%)	14% (14%)
Andere oder unbekannt	4% (3%)	0% (0%)	4% (3%)	1% (1%)	4% (2%)

5 häufigste Konstellationen fett hervorgehoben

Signifikanter Unterschied ($p < 0,05$) mit * gekennzeichnet

Abb. 2-20: Anteil AIS3+ Verletzungen nach verursachendem Bereich und betroffener Radfahrer- / Fußgänger- Körperregion (Fußgängerwerte in Klammern), GIDAS 1999-2010 [FRE12]

Eine genauere Untersuchung des Kopfanpralls im Windschutzscheibenbereich, bei der 27 der insgesamt 32 Konstellationen aus Abb. 2-20 berücksichtigt werden können, ergibt, dass der Kopf des Radfahrers in 74% der Fälle voll oder teilweise auf Strukturteile, d.h. Dachvorderkante, A-Säulen oder Instrumententafel bzw. unteren Windschutzscheibenrahmen, auftrifft, was in Abb. 2-21 nochmals anhand einer Prinzipskizze veranschaulicht wird [FRE12].

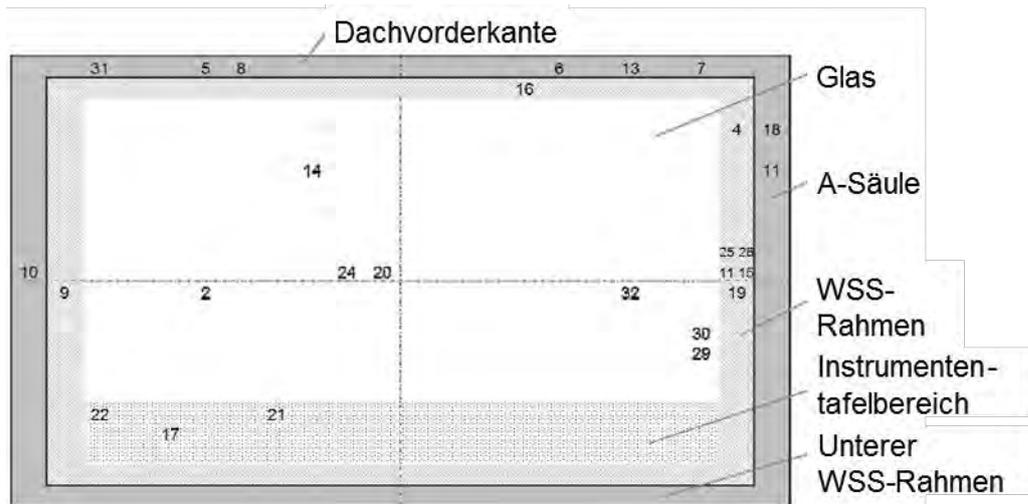


Abb. 2-21: Verteilung WSS-Radfahrerkopfaufprallorte mit AIS3+ Verletzung [FRE12]

Im Vergleich zu Fußgängern treffen Radfahrer den unteren Windschutzscheibenrahmen sowie die Instrumententafel innerhalb der untersuchten Daten seltener und die Dachkante häufiger [FRE12]. Die Unterschiede sind signifikant, wie aus Abb. 2-22 hervorgeht.

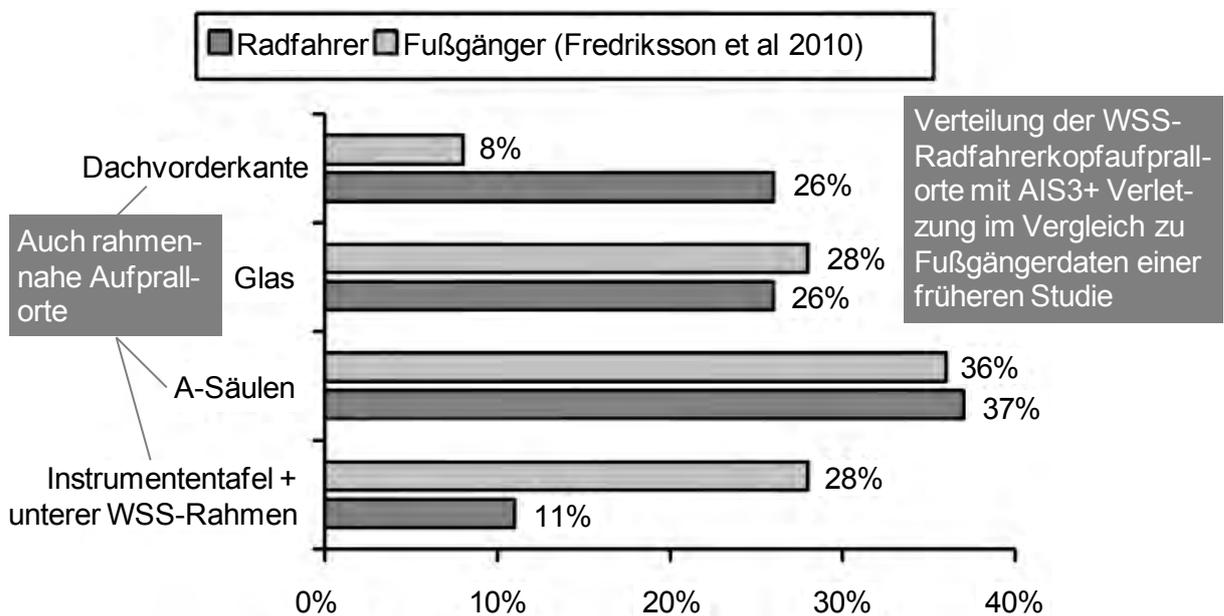


Abb. 2-22: Vergleich Kopfaufprallorte WSS-Bereich für Radfahrer und Fußgänger [FRE12]

Signifikant ist auch die gemäß Abb. 2-20 für Radfahrer im Vergleich zu Fußgängern geringere Verletzungsrelevanz hinsichtlich des Beinanpralls an die Front. Ein möglicher Grund könnte im höher gelegenen Körperschwerpunkt des Radfahrers liegen, in dessen Zuge auch die Beine in Relation zum Stoßfänger höher positioniert sind als beim Fußgänger. Zudem werden die Beine beim Fahrradfahren gebeugt, sodass sich die Knie teilweise oberhalb des

Stoßfängers befinden und die Wahrscheinlichkeit eines direkten Anpralls somit geringer ausfällt. Die Höhenposition des Knies relativ zum Stoßfänger ist von Bedeutung, da gerade das Knie oftmals schwere, langwierige Verletzungen erfährt und der Stoßfänger gleichzeitig das am weitesten vorstehende Teil der Front und damit häufig Erstkontaktstelle ist [FRE12]. Ein weiterer möglicher Grund für die geringere Verletzungsrelevanz beim Beinanprall könnte auch der Umstand sein, dass die Beine beim Radfahrer nicht gewichtsbelastet sind [SIM09].

2.5 Verletzungsschwere und -häufigkeit der jeweiligen Körperregionen

Betrachtet man zunächst alle Kollisionen mit Pkw und Radfahrern innerhalb der GIDAS-Datenbank, so erfährt die Mehrheit der Radfahrer leichte Verletzungen, d.h. MAIS1. In Abb. 2-23 wird die Verletzungsschwere für die in [BMW12] identifizierten Szenarien (Abb. 2-1) nochmals aufgeschlüsselt.

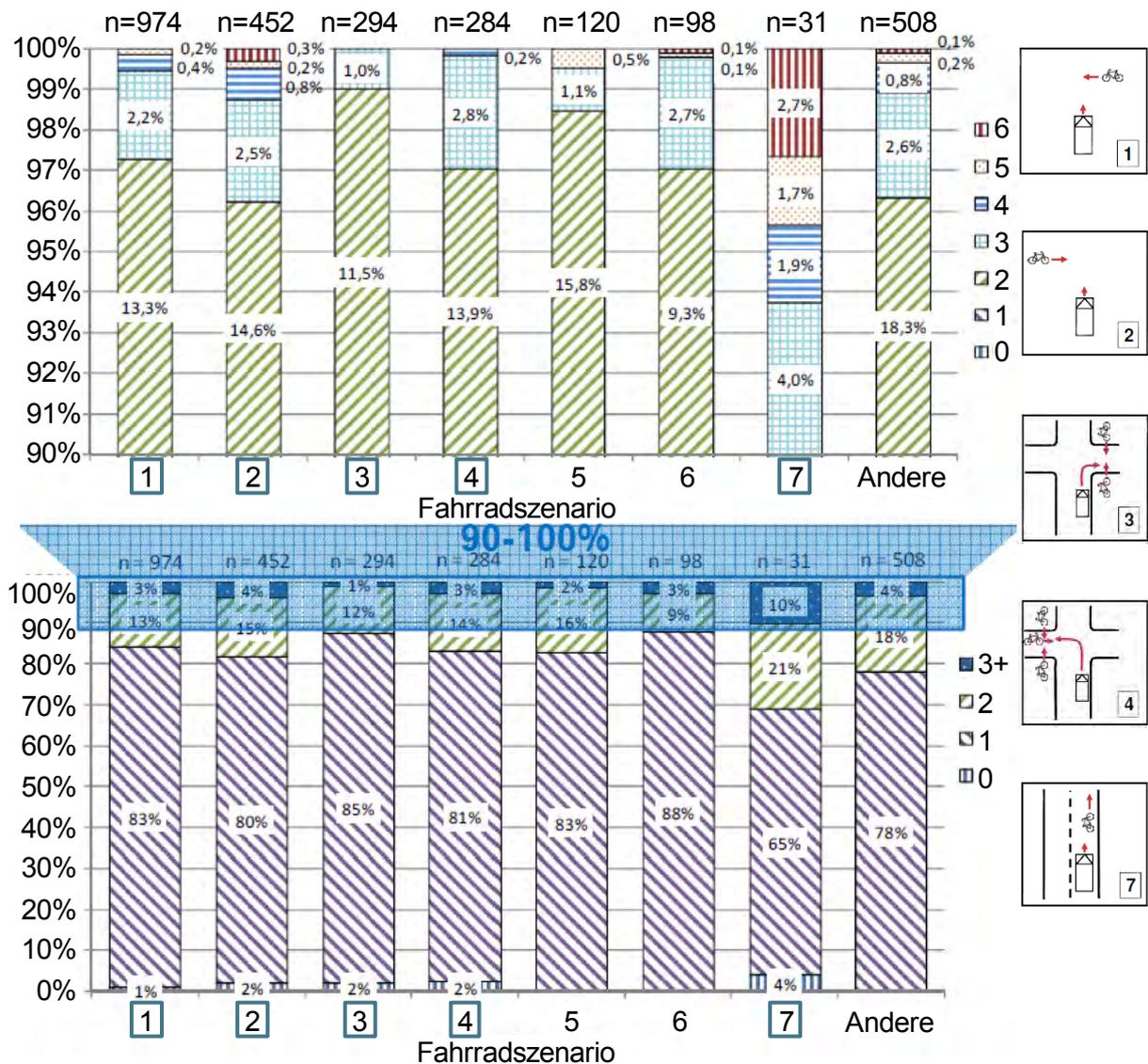


Abb. 2-23: MAIS-Verletzungsschwere der Radfahrer je Szenario (GIDAS, n=2840) [BMW12]

Es wird deutlich, dass der Anteil der leichten Verletzungen bei ca. 80% pro Szenario liegt. Wie in Kapitel 2.1 bereits angeführt, handelt es sich bei den Szenarien 5 und 6 um keine Frontalunfälle, sodass diese hier nicht weiter betrachtet werden. Schwere Verletzungen (MAIS3+) treten zu weniger als 5% pro Szenario auf. Die einzige Ausnahme bildet dabei Szenario 7, dessen Anteil schwerer Verletzungen ca. 10% beträgt. Die höhere Verletzungsschwere in diesem Szenario ist darauf zurückzuführen, dass hier ca. ein Drittel der Unfälle außerorts und damit bei höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten stattfindet [BMW12].

Der Anteil der im Rahmen der VUFO-Studie untersuchten MAIS2+ Fälle an der hinsichtlich der deutschen Unfallstatistik gewichteten Gesamtzahl der vollständig erfassten GIDAS Pkw-Radfahrer-Frontalunfälle ($n = 2099$) beträgt 19,2% ($n = 403,1$) und bestätigt somit die vorherigen Ausführungen. Somit erleiden vier von fünf frontal erfassten Radfahrern innerhalb der GIDAS-Datenbank lediglich MAIS1 Verletzungen. Von den 403 betrachteten MAIS2+ verletzten Radfahrern sind 135 leicht verletzt (Krankenhausaufenthalt < 24h), 260 schwer verletzt (Krankenhausaufenthalt > 24h) und 8 tödlich verletzt (innerhalb von 30 Tagen verstorben). Der Anteil MAIS3+ verletzter Radfahrer liegt bei 3,2% [LIE11].

Insgesamt erlitten die in den untersuchten MAIS2+ Frontalkollisionen verletzten Radfahrer 1749 Einzelverletzungen, wovon die meisten wiederum leichte Verletzungen sind (AIS1, 61%). Abb. 2-24 veranschaulicht, in Abhängigkeit der Verletzungsschwere, mit welcher Häufigkeit die verletzten Körperregionen betroffen sind.

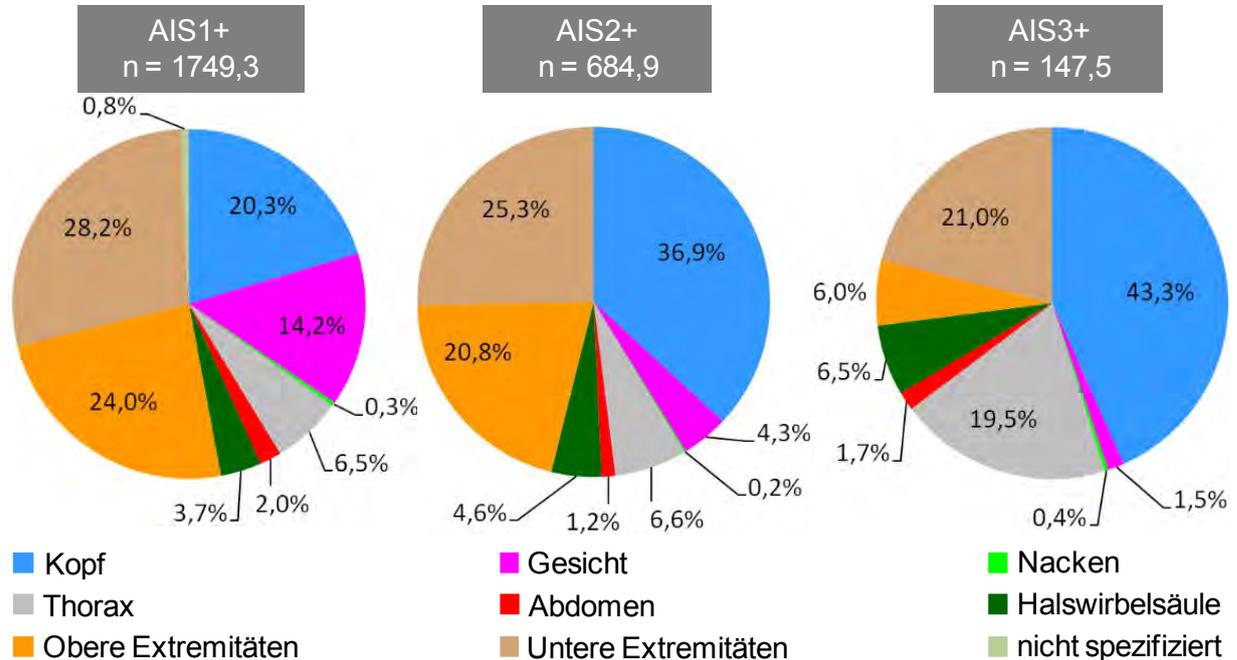


Abb. 2-24: Verletzungsschwere und -häufigkeit der jeweiligen Körperregionen der MAIS2+ verletzten Radfahrer (GIDAS, Frontalunfälle, $n=403$) [LIE11]

Zusammengenommen haben Kopf und Gesicht den höchsten Anteil bei den AIS1+ Verletzungen, gefolgt von den unteren und oberen Extremitäten. Mit zunehmender Verletzungsschwere...

schwere (AIS2+ AIS3+) erweist sich der Kopf als die mit Abstand am häufigsten verletzte Körperregion. Auch die Relevanz des Thorax nimmt wesentlich zu, während der Anteil der Verletzungen der unteren Extremitäten näherungsweise konstant bleibt. Demgegenüber verlieren Verletzungen der oberen Extremitäten sowie des Gesichts an Bedeutung. Es gibt fast keine AIS3+ Verletzungen in diesen Regionen [LIE11].

Eine Analyse der Verletzungsschwere und -häufigkeit der jeweiligen Körperregionen ist auch seitens der UDV erfolgt. Hierbei werden alle Frontalunfallszenarien mit kreuzendem Radfahrer (n = 210, vgl. Abb. 2-4) betrachtet. Die Ergebnisse sind wiederum für die Verletzungsschweregrade AIS1+, AIS2+ und AIS3+ in Abb. 2-25 dargestellt.

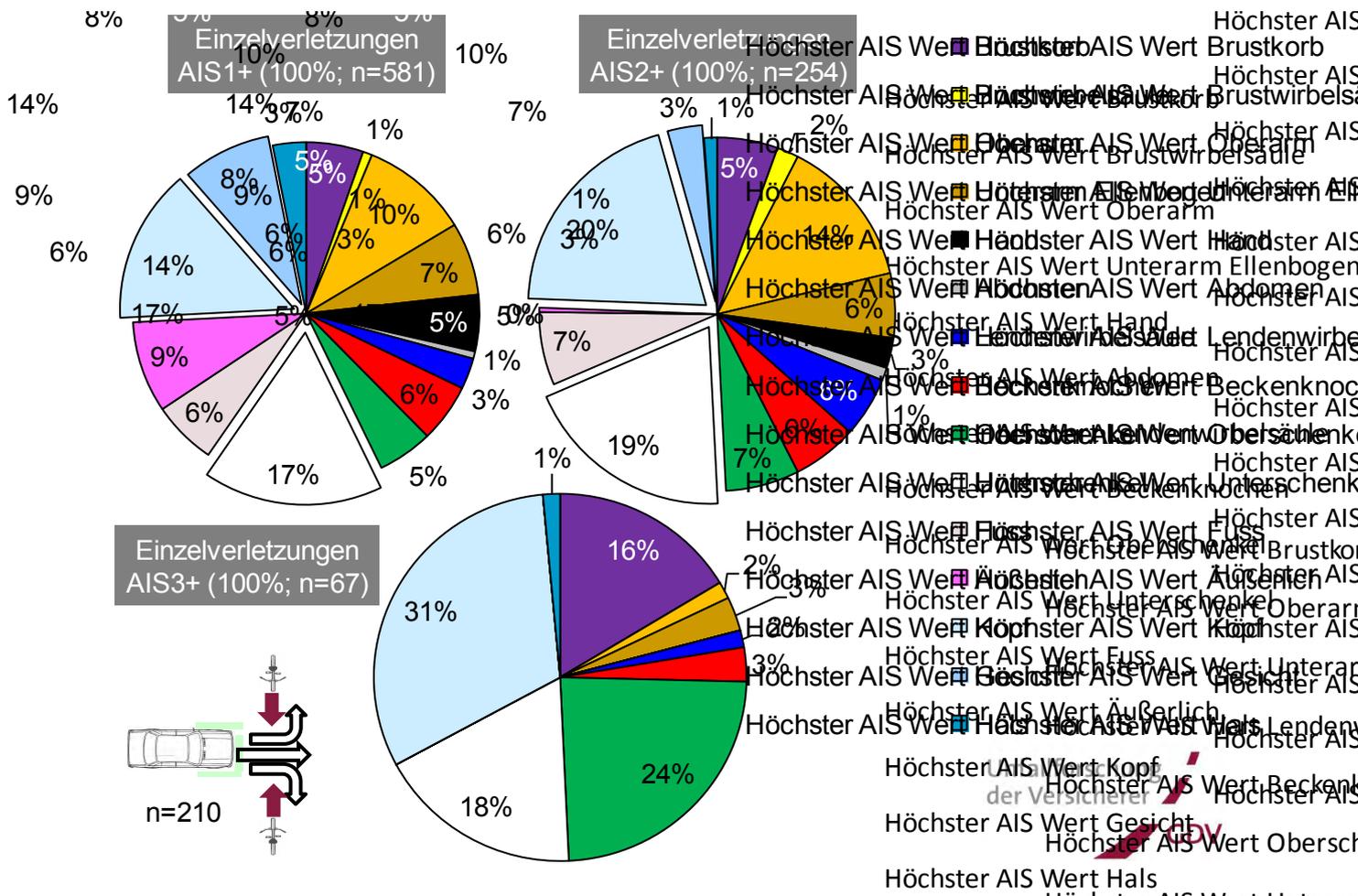


Abb. 2-25: Verletzungsschwere und -häufigkeit der jeweiligen Körperregionen bei MAIS1+ Frontalunfällen mit kreuzendem Radfahrer (UDV, n=210) [UDV13]

Insgesamt umfasst die Auswertung 581 Einzelverletzungen. Verletzungen des Kopfes und der unteren Extremitäten sind, ähnlich wie in den GIDAS-Daten (Abb. 2-24), am häufigsten und dominieren vor allem bei den schweren Verletzungen. Gegenüber GIDAS fällt der Anteil der unteren Extremitäten hier allerdings doppelt so hoch aus. Die Relevanz vom Thoraxbereich ist vergleichbar, sodass insgesamt Kopf, Thorax sowie untere Extremitäten die relevantesten Körperregionen in Bezug auf Verletzungsschwere und -häufigkeit bilden.

2.6 Alter und Größe verunglückter Radfahrer

Bemüht man zunächst wieder die GIDAS-Datenbank, so zeigt sich, dass vor allem sehr junge Radfahrer kaum in Unfälle verwickelt sind. Für die in [BMW12] identifizierten Szenarien (Abb. 2-1) beträgt das 5. Perzentil beim Alter der Radfahrer für die Szenarien mit geradeausfahrendem Fahrzeug (Szenario 1 & 2) 9 und für die Szenarien mit abbiegendem Fahrzeug (Szenario 3 & 4) 12 Jahre (Anhang, Abb. 9-3). Nur für Szenario 7 ergibt sich mit einem Alter von 6 Jahren eine deutlich geringere 5. Perzentile. Bei den älteren Radfahrern sind die Relationen umgekehrt. Hier beträgt das 95. Perzentil für die beiden Szenarien mit geradeausfahrendem Fahrzeug 74 und 75 Jahre und für die beiden Szenarien mit abbiegendem Fahrzeug 66 und 67 Jahre. Szenario 7 weist mit 84 Jahren hingegen den höchsten Alterswert auf. Das Geschlecht ist in den Szenarien ähnlich verteilt, mit einem leichten Überhang an Männern. Auffällig ist wiederum Szenario 7, wo der Anteil an Männern bei ca. 70% liegt [BMW12].

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei Einschränkung der Daten auf MAIS2+ Fälle. Für die 403 in [LIE11] ausgewerteten Fälle beträgt das Verhältnis von Männern zu Frauen 58% zu 42%. Im Gegensatz zu Fußgängern ist das Alter der Radfahrer gleichmäßiger verteilt, allerdings weisen die Daten weniger Kinder im Alter bis 10 Jahren auf (Abb. 2-26).

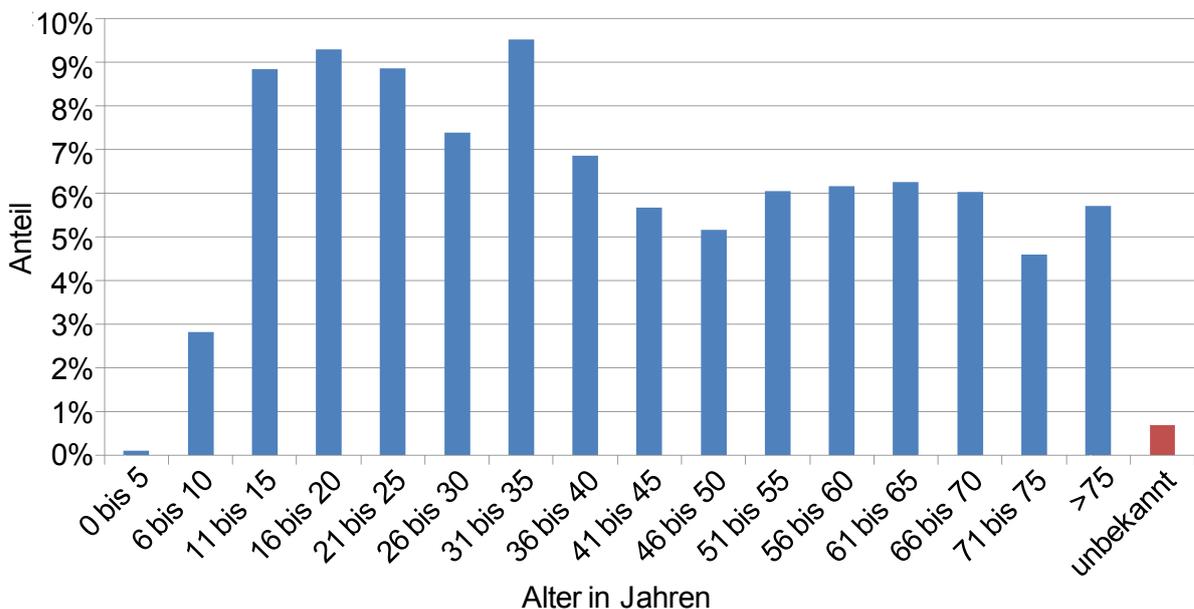


Abb. 2-26: Altersverteilung Radfahrer für MAIS2+ Frontalunfälle (GIDAS, n=403) [LIE11]

Dies macht sich auch in der Verteilung der Radfahrerkörpergrößen bemerkbar. Nennenswerte Anteile ergeben sich hier erst oberhalb einer Körpergröße von 150 cm (Abb. 2-27). Die Durchschnittsgröße beträgt 170,4 cm [LIE11].

In der UDV-Datenbank beträgt der Anteil von Kindern zwischen 6 und 12 Jahren für Frontalunfallszenarien mit kreuzendem Radfahrer (n = 210, vgl. Abb. 2-4) 5%. Auch hier gibt es keine Fälle mit Kindern jünger als 6 Jahren [UDV13].

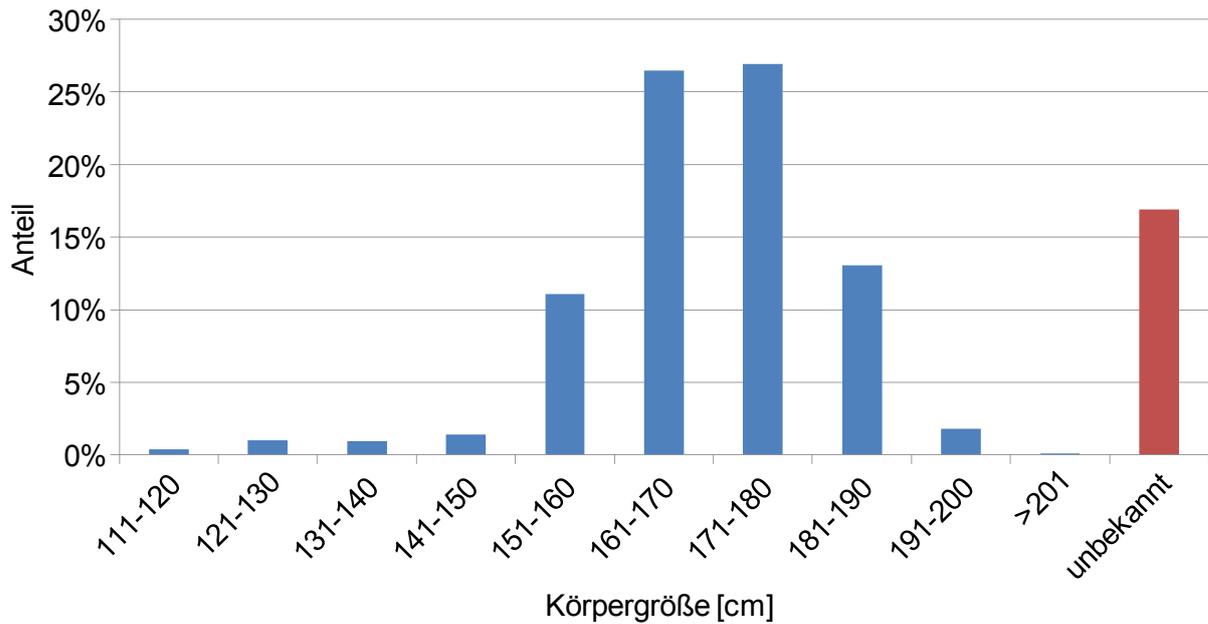


Abb. 2-27: Größenverteilung Radfahrer für MAIS2+ Frontalunfälle (GIDAS, n=403) [LIE11]

2.7 Radgrößen und Bauformen

Auf Basis von Rechercheergebnissen bezüglich gängiger Radgrößen, Bauformen und Sitzpositionen werden im Folgenden repräsentative Fahrradmodelle für die in der Simulation berücksichtigten Radfahrergrößen (Kapitel 3.1.2) hergeleitet und in einer CAD-Umgebung aufgebaut. Die Art und Häufigkeit der Fahrradnutzung ist stark länderspezifisch. Ähnliches gilt auch für die Häufigkeit der jeweiligen Modellgruppen.

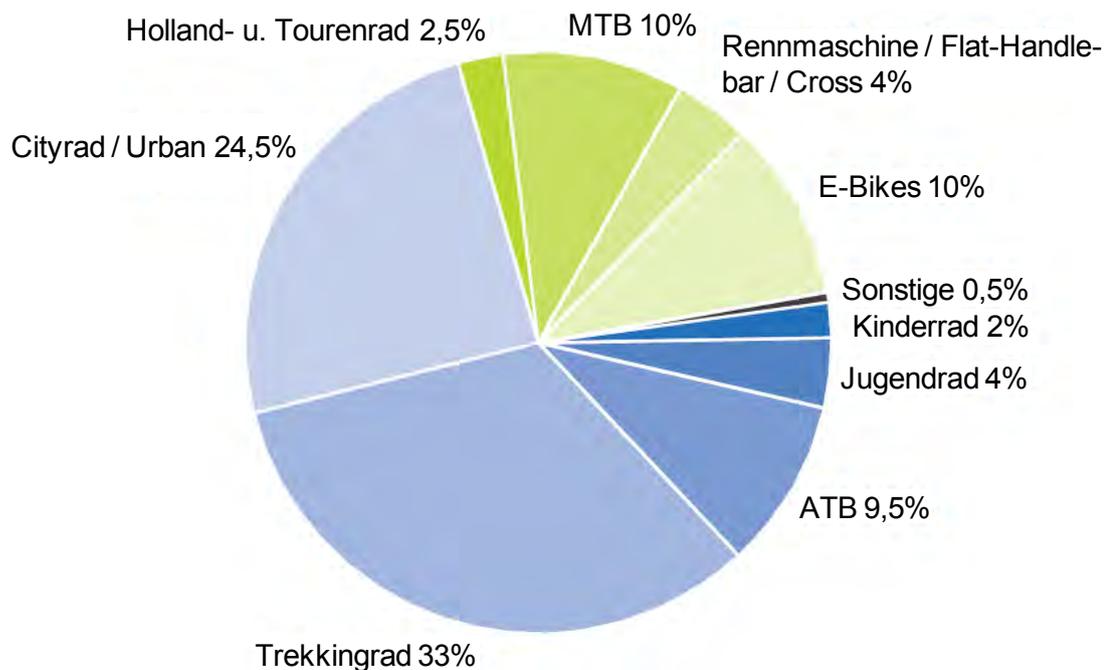


Abb. 2-28: Anteile der verschiedenen Modellgruppen in Deutschland [ZIV13]

In Frankreich sind beispielsweise Mountainbikes sehr beliebt und haben mit 46,5% den höchsten Anteil an den Fahrradverkäufen, gefolgt vom Trekkingrad mit 12% [COL13]. Demgegenüber zeigt sich in den Niederlanden ein völlig anderes Bild. Dort hat das Cityrad mit 55% die höchste Relevanz, wiederum gefolgt vom Trekkingrad mit 9% [COL12]. Der hohe Anteil des Cityrads erklärt sich dadurch, dass hierunter in [COL12] auch das klassische Hollandrad fällt, welches eine nochmals aufrechtere Sitzposition als das normale Cityrad aufweist und in erster Linie ein niederländisches Phänomen ist. In Deutschland spielt dieser Fahrradtyp mit 2,5% keine große Rolle (Abb. 2-28). Hier ist das Trekkingrad (33%) am beliebtesten, gefolgt vom Cityrad (24,5%).

Aufgrund seiner Relevanz, sowohl in Deutschland als auch im europäischen Ausland, sowie seiner alltagstauglichen Auslegung und durchschnittlichen Rahmengenometrie bildet das Trekkingrad die Basis für die Definition der Erwachsenenfahrradmodelle. Zudem sind die Unterschiede zum klassischen Cityrad, beispielsweise bei der Rahmengenometrie, marginal. Unterschiede ergeben sich hauptsächlich in der Ausstattung. Das Trekkingrad weist eine eher sportlichere Körperhaltung auf, wobei diese über Sattel- und Lenkerhöhe individuell einstellbar und somit auch stark radfahrerspezifisch ist. Je höher der Lenker im Vergleich zum Sattel positioniert ist, desto aufrechter wird die Sitzposition, die Abstimmung gilt dann als „komfortabel“. Als Grundlage beim Aufbau der jeweiligen Fahrradmodelle für die einzelnen Radfahrergrößen in der Simulation dienen die Regeln zur Wahl der richtigen Rahmenhöhe sowie Sitzposition. Neben den Rechercheergebnissen sind hierzu auch Experteninterviews beim Zweirad-Industrie-Verband e.V. (ZIV) sowie in lokalen Fahrradgeschäften durchgeführt worden. Gleiches gilt für die Definition der Rahmengenometrien, in deren Zuge geeignete Fahrradmodelle verschiedener Hersteller vermessen und in durchschnittliche Werte überführt worden sind. Abb. 2-29 veranschaulicht dies für den 50%-Mann, der Teil der „Ellipsoid Pedestrian Models“ Modellfamilie des Mehrkörpersimulationsprogramms MADYMO ist, welches zur Simulation der Unfallkonstellationen eingesetzt wird.

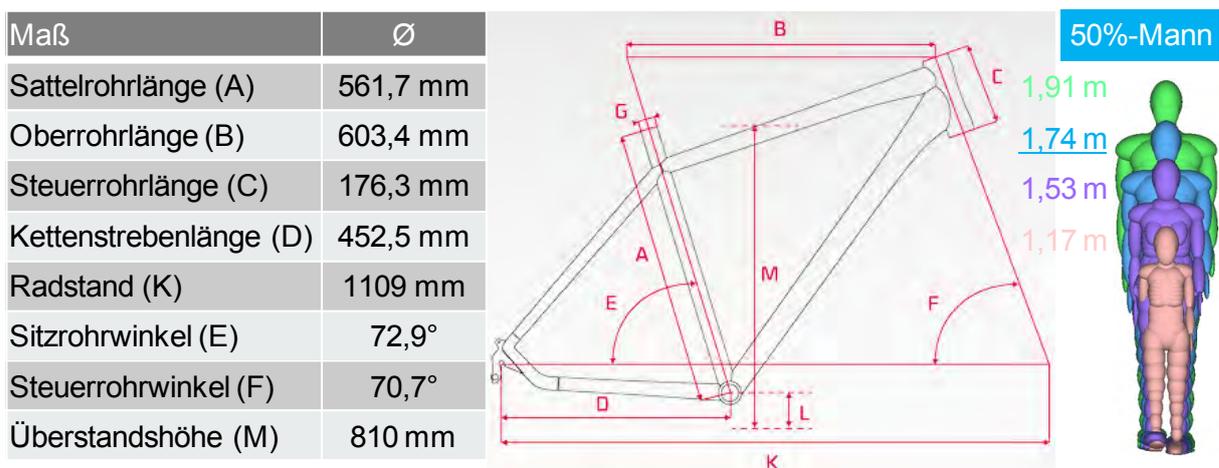


Abb. 2-29: Definition einer repräsentativen Fahrradrahmengenometrie für den 50%-Mann

Die ermittelten Werte basieren auf jeweils drei gängigen Modellen der Kategorien „Tour“ und „Sport“. Bei sportlicher Fahrweise wird ein kleinerer Rahmen, bei tourenorientierter Fahr-

weise ein größerer Rahmen empfohlen. Die dargestellten Werte repräsentieren somit ein hybrides Trekkingradmodell. Für die übrigen Radfahrergrößen sind die Werte in Kapitel 9.3 des Anhangs aufgeführt. Die Herrenräder (50% & 95%-Mann) verfügen jeweils über einen Diamantrahmen während das Damenrad der 5%-Frau einen Trapezrahmen hat. Die Rahmengenometrie des Kinderrads geht auf die Maße von einem 18" und drei 20" Kinderradrahmen zurück. Herstellerseitig werden Kinderräder in der Regel ab 20" Laufradgröße für den Straßenverkehr ausgelegt.

2.8 Aktuelle fahrzeugseitige Entwicklungen zur Radfahrersicherheit

Ein viel beachtetes Forschungsprojekt im Bereich der Radfahrersicherheit war SaveCAP, welches von September 2009 bis Ende 2012 lief, initiiert seitens des niederländischen Ministeriums für Infrastruktur und Umwelt sowie dem niederländischen Radfahrerbund. Vervollständigt wurde das Projektkonsortium durch TNO, Autoliv und eine niederländische Versicherungsgesellschaft. Ziel war es, die Potentiale eines Windschutzscheibenairbags sowie einer automatischen Notbremsung für Fußgänger und Radfahrer zu identifizieren und beide Schutzmaßnahmen entsprechend weiterzuentwickeln [SCH12b]. Neben einer Unfallanalyse und Simulationen zur Radfahrerkinematik wurden verschiedene Full-Scale-Tests mit und ohne Radfahrerrairbag (Prototyp) sowie ein Feldversuch zur Radfahrersensierung durchgeführt. Im Folgenden werden die definierten Randbedingungen sowie die gewonnenen Erkenntnisse in Simulation und Full-Scale-Testing kurz vorgestellt.

Im Rahmen der Simulationen werden ausschließlich Kollisionen mit seitlichem Anprall am Fahrrad betrachtet. Dabei wird der Kollisionswinkel zwischen -45° (Fahrradfahrer bewegt sich auf Fahrzeug zu), 0° und 45° (Fahrradfahrer bewegt sich vom Fahrzeug weg) variiert [SCH12a]. Die verwendeten Fahrzeug- und Radfahrermodelle sind in Abb. 2-30 dargestellt.

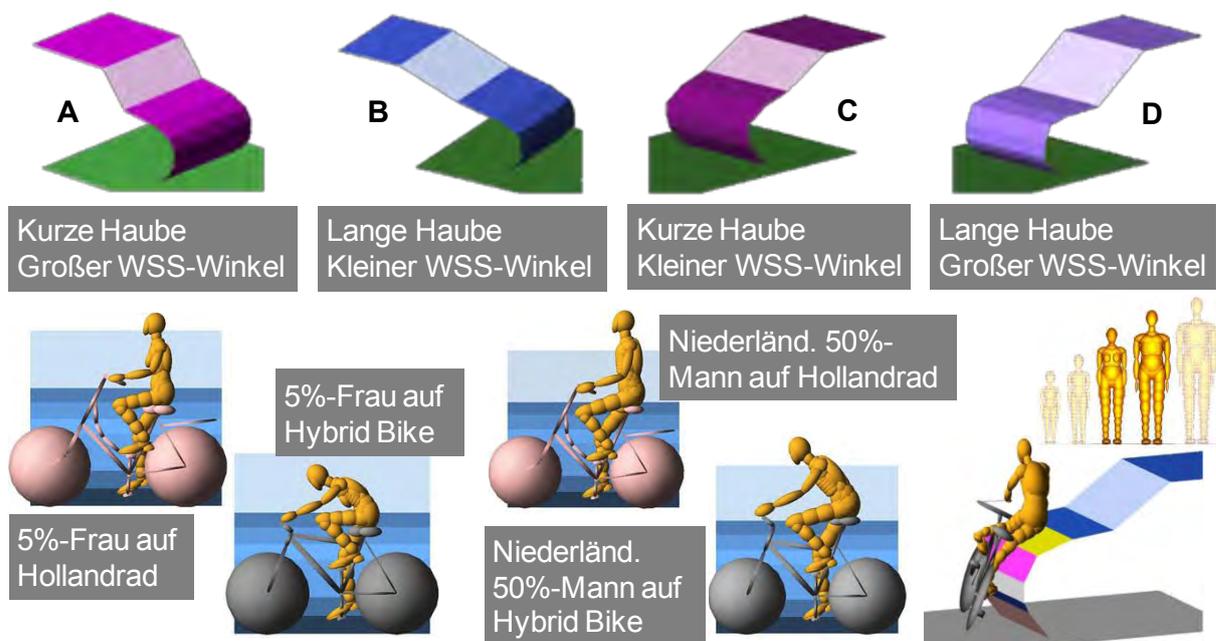


Abb. 2-30: Simulationsmodelle im Rahmen von SaveCAP [ROD12] [SCH12a]

Die Fahrzeuggeschwindigkeiten werden ebenfalls variiert und bewegen sich zwischen 30 und 80 km/h, jeweils in 10 km/h Schritten. Demgegenüber ist die Geschwindigkeit des Radfahrers mit 15 km/h konstant. Die Simulationen erfolgen mit vier vereinfachten Fahrzeugmodellen, welche auf Extrusion generischer Konturmittellinien entlang der Fahrzeugquerachse beruhen, die bezüglich der Haubenvorderkantenhöhe, der Haubenlänge sowie des Windschutzscheibenwinkels variiert werden (Abb. 9-7). Die Pfeilung der Karosserie bleibt dabei unberücksichtigt und beschränkt die Studie auf eine Analyse der mittleren Anstoßposition. Ferner werden auf Basis zweier Radfahrergrößen, einem niederländischen 50%-Mann und der MADYMO 5%-Frau, sowie zwei Fahrradmodellen, einem klassischen Hollandrad und einem Hybridfahrrad mit sportlicher Sitzposition, insgesamt vier Radfahrerkonfigurationen definiert [SCH12a].

Die Abbildung der Anthropometrie des niederländischen 50%-Mannes, welcher eine Körpergröße von 1,82 m und ein Körpergewicht von 83,7 kg aufweist, erfolgt durch entsprechende Skalierung des MADYMO 50%-Mannes. Die 5%-Frau hat eine Körpergröße von 1,53 m, bei einem Gewicht von 50,2 kg. Im Zuge der durchgeführten Unfallanalyse ist im Rahmen von SaveCAP beschlossen worden, sich ausschließlich auf die Gruppe der Erwachsenen zu konzentrieren und Kindergrößen nicht zu betrachten. Bei der Modellierung der Fahrräder ist der Rahmen starr ausgeführt während Reifen und Frontgabel Steifigkeiten zugewiesen werden. Eine Lenkbewegung ist möglich. Für beide Radfahrergrößen werden die gleichen Fahrradmodelle verwendet. Es werden lediglich die Sattel- und Lenkerhöhen angepasst, welche jeweils in Abb. 9-8 im Anhang aufgeführt sind. Die Masse des Hollandrades beläuft sich auf 19,7 kg, die des Hybridrades auf 16,3 kg [SCH12a]. Abb. 2-31 zeigt für die untersuchten Radfahrerkonfigurationen die Verteilung der Kopfaufprallorte auf die jeweiligen Bereiche der vier Fahrzeugmodelle. Die Anteile umfassen dabei sämtliche in den durchgeführten Simulationen berücksichtigten Kollisionswinkel und -geschwindigkeiten.

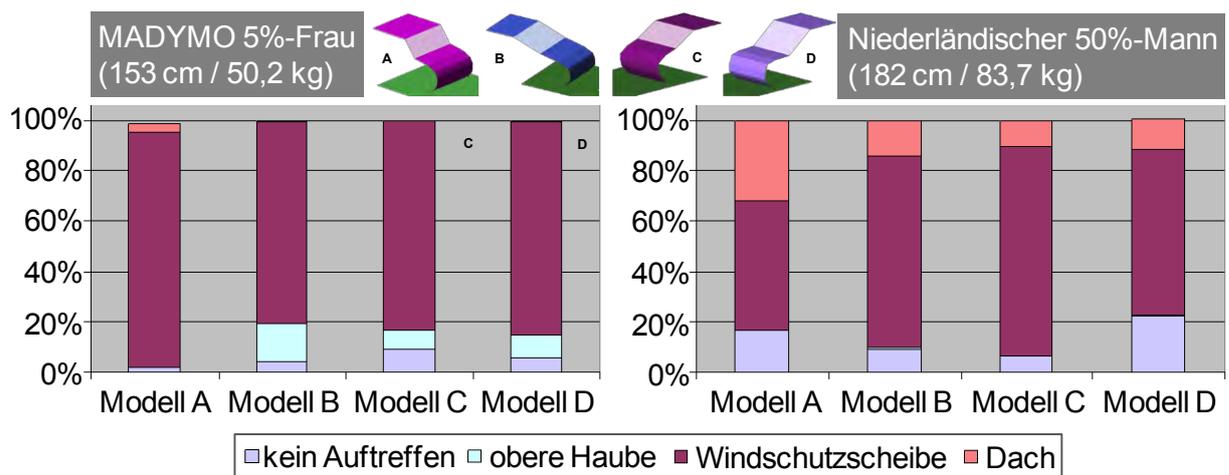


Abb. 2-31: Verteilung der Kopfaufprallorte innerhalb der SaveCAP-Simulationen [SCH12a]

Es wird deutlich, dass der Kopfaufprall hauptsächlich im Bereich der Windschutzscheibe stattfindet. Darüber hinaus gibt es vor allem für den 50%-Mann einen signifikanten Anteil an

Kopfaufprallorten auf dem Dach, was sicherlich auf den bis 80 km/h reichenden Geschwindigkeitsbereich zurückzuführen ist.

Die Verteilung der Torsoaufprallorte geht aus Abb. 2-32 hervor. Für den 50%-Mann bildet die Windschutzscheibe auch hier den Hauptaufprallbereich, während es bei der 5%-Frau in einer signifikanten Zahl der Fälle zu keinem Aufprall des Torsos kommt. Zu den Rückschlüssen, die aus den SaveCAP-Simulationen gezogen werden, gehört des Weiteren, dass Radfahrer im Vergleich zu Fußgängern höher aufkommen. Große oder aufrecht sitzende Radfahrer treffen dabei in der Regel höher auf der Fahrzeugstruktur auf als kleine oder gebeugt sitzende Radfahrer. Höhere Aufprallpositionen werden auch für steigende Fahrzeuggeschwindigkeiten sowie für abnehmende Radfahrerorientierungen (Radfahrer bewegt sich zum Fahrzeug hin) beobachtet. Die gleiche Beziehung ergibt sich erwartungsgemäß auch hinsichtlich der Zunahme der Verletzungen. Ferner erfährt die 5%-Frau auf dem Hybridfahrrad eine höhere Beschleunigung als der 50%-Mann auf dem Hollandrad, wobei eine niedrigere Haubenvorderkante generell niedrigere Becken- und Kopfbeschleunigungen hervorruft [SCH12a].

Insgesamt wird festgehalten, dass der Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeiten, Fahrradorientierungen und Fahrrad-Radfahrer-Kombinationen auf die Simulationsergebnisse signifikanter ist als der Einfluss der Fahrzeuggeometrie [SCH12a]. Hier ist allerdings zu beachten, dass es sich bei den untersuchten Fahrzeugfronten um vereinfachte Modelle handelt.

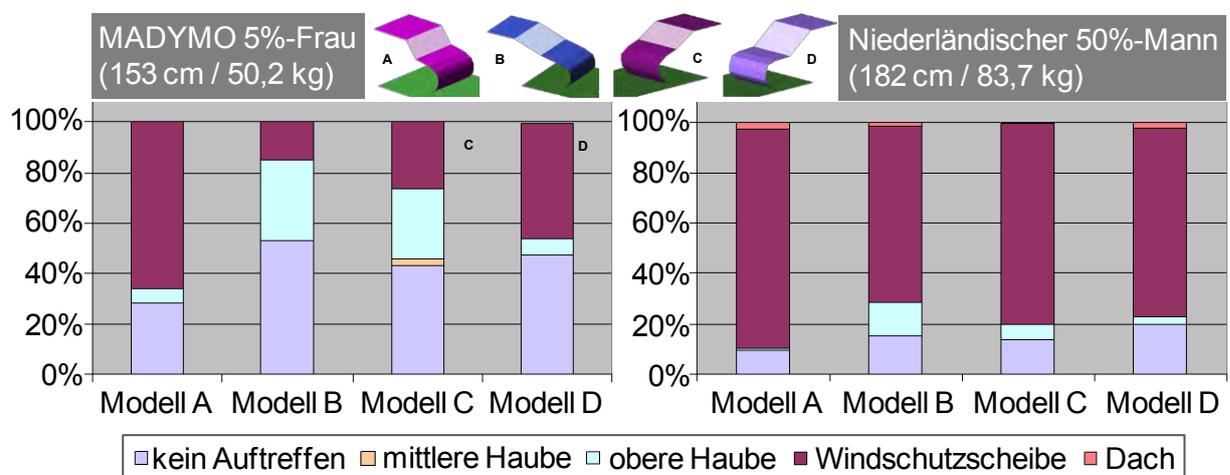


Abb. 2-32: Verteilung der Torsoaufprallorte innerhalb der SaveCAP-Simulationen [SCH12a]

Konkreter als die veröffentlichten Simulationsergebnisse sind die Erkenntnisse aus den innerhalb der ersten Projektphase durchgeführten Full-Scale-Tests zur Unfallrekonstruktion (Abb. 2-33). Hier werden vier Radfahrer- und zwei Fußgängerkonstellationen in Versuchen mit dem Polar-II Dummy betrachtet. Dieser wird im Falle der Radfahrerkonstellationen auf einem Standard 28“ Herrenrad (711 mm Raddurchmesser) positioniert. Die eingestellten Höhen für Sattel und Lenker von 100 bzw. 110 cm beruhen auf entsprechenden Felddaten einer niederländischen Studie, in der 400 Fahrräder auf einem Stellplatz vermessen wurden [SCH12a]. Die hier ermittelten Durchschnittswerte sind in Abb. 9-9 des Anhangs aufgeführt.

Test	Anprall am Rad	Fahrradgeschw.	Anprallposition am Fzg.	Fzg.geschw.
1	rechte Seite	15 km/h	links außen	40 km/h
2	rechte Seite	15 km/h	links von der Mitte	40 km/h
3	rechte Seite	15 km/h	rechts von der Mitte	40 km/h
4	hinten	0 km/h	rechts außen (Höhe A-Säule)	40 km/h

Abb. 2-33: SaveCAP-Testszenarien [SCH12a]

Die Radfahrertests sehen drei Konstellationen mit seitlichem Anprall (Test 1-3) und eine mit rückseitigem Anprall (Test 4) vor. In den Tests mit seitlichem Anprall kommt der Radfahrer von links mit einer Geschwindigkeit von 15 km/h und fahrzeugseitigem Bein unten, d.h. das rechte Pedal befindet sich in niedrigster Position. Die entsprechenden Koordinaten des Dummys gehen aus Abb. 9-10 hervor. Beim rückseitigen Anprall wird dem Radfahrer keine Geschwindigkeit aufgegeben und beide Pedale sind auf gleicher Höhe, mit rechtem Pedal voraus. In beiden Fußgängertests wird der Dummy mit rechtem Bein nach hinten positioniert (Abb. 9-11) und ohne eigene Bewegung einmal mittig sowie rechts außen von der Fahrzeugfront erfasst. Für alle Versuche beträgt die Geschwindigkeit des eingesetzten Volvo V70 (Modelljahr 2011) 40 km/h. Eine automatische Bremsung erfolgt 250 ms nach dem Erstanprall [SCH12a].

Betrachtet man die Kopfaufprallorte für die durchgeführten Tests, so wird der Einfluss der relativ hohen Eigengeschwindigkeit beim seitlichen Anprall des Radfahrers deutlich, welche eine diagonale Bewegung des Dummys über die Haubenfläche hinweg hervorruft. Dadurch liegt der Kopfaufprall in Fahrzeugquerrichtung deutlich versetzt zum Beinprall. Die höchsten Kopfaufprallorte werden für die rückseitige und die äußere linke seitliche Radfahrerankonstellation (beide WAD = 2500 mm) sowie den Aufprall des Fußgängers an der rechten A-Säule (WAD = 2430 mm) erzielt [SCH12a]. Die zugehörigen Testresultate sind in Abb. 9-12 aufgeführt.

Bei den Konstellationen mit seitlichem Anprall des Radfahrers erfolgt zunächst eine translatorische Bewegung des Oberkörpers bevor dieser sich beugt. Der Kopf bleibt bis zum Schulteranprall, wo er durch den Nacken nach unten gezogen wird, hinter dem Oberkörper zurück. Beim rückseitigen Anprall ist die translatorische Bewegung des Oberkörpers und damit die aufrechte Phase länger. Die Kopfaufprallgeschwindigkeit ist hier am höchsten und beträgt 58,7 km/h. Für den seitlichen Anprall liegen die Kopfaufprallgeschwindigkeiten (Test 1 ohne Messwert) zwischen 34,9 km/h (Test 3) und 53,3 km/h (Test 2) und fallen höher aus als in den entsprechenden Fußgängertests, wo die Kopfaufprallgeschwindigkeiten mit 27 km/h und 29,2 km/h in beiden Fällen unterhalb der Kollisionsgeschwindigkeit liegen [SCH12a].

Der im Rahmen von SaveCAP entwickelte Radfahrerairbag hat ein Volumen von 190 Litern und deckt den Windlauf, den unteren Windschutzscheibenrahmen sowie die A-Säulen des Versuchsfahrzeuges vollständig ab. Er basiert auf dem bestehenden Fußgängerairbagkon-

zept des Volvo V40 und befindet sich unterhalb der Haube nahe der Windschutzscheibe [OLS12]. Während bei gleicher Anstoßkonstellation ohne Airbag ein HIC-Wert deutlich oberhalb von 2000 erreicht wird, reduziert sich dieser durch den Einsatz des Airbags auf 627 [SCH12b].

Ein wesentliches Fazit des SaveCAP-Projekts lautet, dass durch einen Radfahrerairbag und ein automatisches Notbremssystem mit zuverlässiger Radfahrererkennung die Zahl der getöteten und (schwer) verletzten Radfahrer signifikant reduziert werden kann. Dies gilt vor allem für eine Kombination beider Schutzmaßnahmen [SCH12b].

Auf Seiten der aktiven Sicherheit erfolgt 2018 mit Einführung eines erweiterten AEB VRU Protokolls (Autonomous Emergency Braking systems for vulnerable road users) erstmals eine direkte Adressierung von Radfahrern im Rahmen von Euro NCAP. Dabei werden radfahrerspezifische Testszenarien Bestandteil der Prüfung automatischer Notbremssysteme. Diese werden heute bereits auf die Detektion von Radfahrern auslegt. So wurde 2013 von Volvo erstmals ein System mit Radfahrererkennung und automatischer Vollbremsung eingeführt.

Nicht nur die Radfahrererkennung sondern auch eine möglichst effektive Fahrerwarnung sind Gegenstand aktueller Entwicklungsarbeiten. Jaguar arbeitet zurzeit an einem kamerabasierten Warnsystem, das den Fahrer über intuitive haptische, akustische und optische Anzeigen zu erhöhter Aufmerksamkeit anhalten soll. Nähert sich ein Fahrrad dem Pkw, lässt das System den typischen Klingelton ertönen, und zwar aus dem Lautsprecher, der der Richtung des Herannahenden entspricht. Handelt es sich um ein Motorrad, imitiert das System eine typische Hupe. Setzt der Radfahrer dann zum Überholen an, bläst sich ein kleines Kissen in der Rücksitzlehne auf, ebenfalls an der entsprechenden Seite. Seitens Jaguars wird der Effekt als Tippen auf die Schulter beschrieben. Zusätzlich tauchen LEDs die A-Säule und den oberen Teil der Türinnenverkleidung in farbiges Licht [VKU15].

In der ersten Warnstufe leuchtet es gelb, beim Passieren des Zweirads verfärbt es sich zu Rot, ist die Gefahr vorüber wird es grün und erlischt anschließend. Darüber hinaus warnt der Assistent auch beim Öffnen der Türen vor herannahenden Zweirädern. Droht eine Kollision, vibriert der Türgriff und wird rot hinterleuchtet. Ein Serieneinsatz könnte in fünf bis acht Jahren erfolgen [VKU15].

3 Numerische Simulation von Fahrzeug-Radfahrer-Kollisionen

Zur Untersuchung der Unfallkinematik für die beiden in Abb. 2-11 beschriebenen Anstoßkonstellationen wird ein breites Spektrum an Fahrzeug-Radfahrer-Kollisionen mit dem Mehrkörpersimulationsprogramm MADYMO simuliert.

3.1 Modellaufbau

In einem ersten Schritt ist zunächst der Aufbau repräsentativer Fahrzeug- und Fahrradmodelle erforderlich, sodass sowohl der Einfluss der Fahrzeugfrontgeometrie als auch der Radfahrergröße möglichst umfassend berücksichtigt werden kann.

3.1.1 Fahrzeugmodelle

Zur Abbildung der verschiedenen Fahrzeugfronten im realen Unfallgeschehen werden insgesamt sechs Fahrzeugmodelle verwendet, welche jeweils die Klassen Limousine, Kompakt, Van, SUV, OneBox und Sportwagen der im Vorgängerprojekt [HAM10] entwickelten Fahrzeugkategorisierung repräsentieren (Abb. 3-1). Diese beruht allein auf der Frontgeometrie eines Fahrzeuges und nutzt charakteristische Parameter wie die Höhe der Haubenvorderkante, den Haubenwinkel sowie die Abwickellänge bis zur Haubenhinterkante. Die Geometrieparameter der dargestellten Klassenvertreter gehen aus Abb. 9-13 im Anhang hervor.

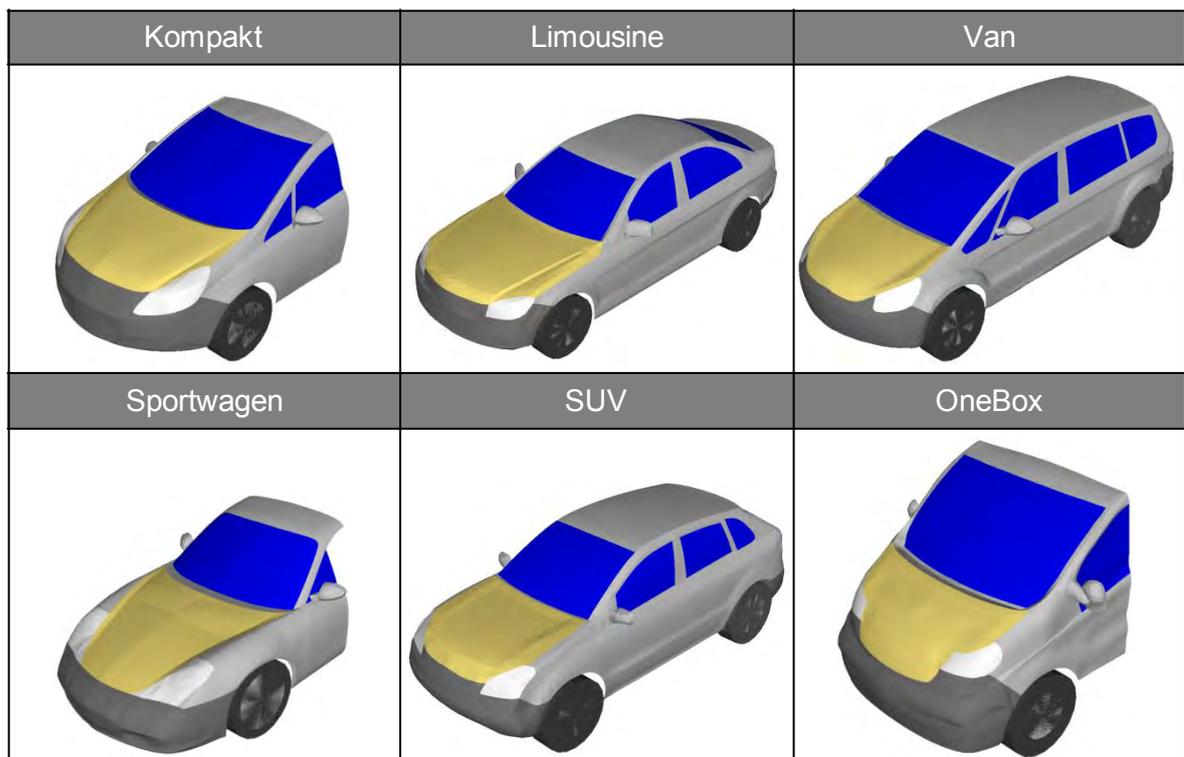


Abb. 3-1: Generische Fahrzeugmodelle [HAM10]

Zusätzlich zu den im Rahmen der Kinematikanalyse eingesetzten Fahrzeugmodellen zählt auch ein Simulationsmodell des im Projekt vorgesehenen Versuchsfahrzeugs zum abgebil-

deten Fahrzeugspektrum. Dieses dient der Versuchsauslegung sowie -vorbereitung und ist in Abb. 9-14 des Anhangs abgebildet.

Allgemein werden in der Mehrkörpersimulation reale Mehrkörpersysteme durch unverformbare Körper abgebildet. Diese Starrkörper sind über ihre Masse, Schwerpunktlage und Trägheiten definiert. Idealisierte kinematische Gelenke bilden dabei die Freiheitsgrade zwischen verbundenen Körpern ab. Bei Kontakt zwischen zwei Starrkörpern werden die resultierenden Kräfte anhand von vorgegebenen Kontaktsteifigkeiten berechnet. Für die verschiedenen Bereiche der als Starrkörper definierten Fahrzeugfront müssen daher entsprechende Kontaktsteifigkeiten definiert werden. Die Kontaktsteifigkeiten sind in Form von Kraft-Weg-Verläufen vorgegeben, die den Widerstand gegen das Eindringen eines auftreffenden Körpers beschreiben. Abhängig von der Eindringtiefe wird dabei eine Gegenkraft aufgebaut, die den Kontakt charakterisiert. Eine Darstellung struktureller Verformungen ist für Mehrkörpersimulationen nicht möglich. Abb. 3-2 verdeutlicht am Beispiel des Fahrzeugmodells Kompakt die Gliederung der Front in die einzelnen Steifigkeitsbereiche sowie die jeweils zugewiesenen Kraft-Weg-Verläufe.

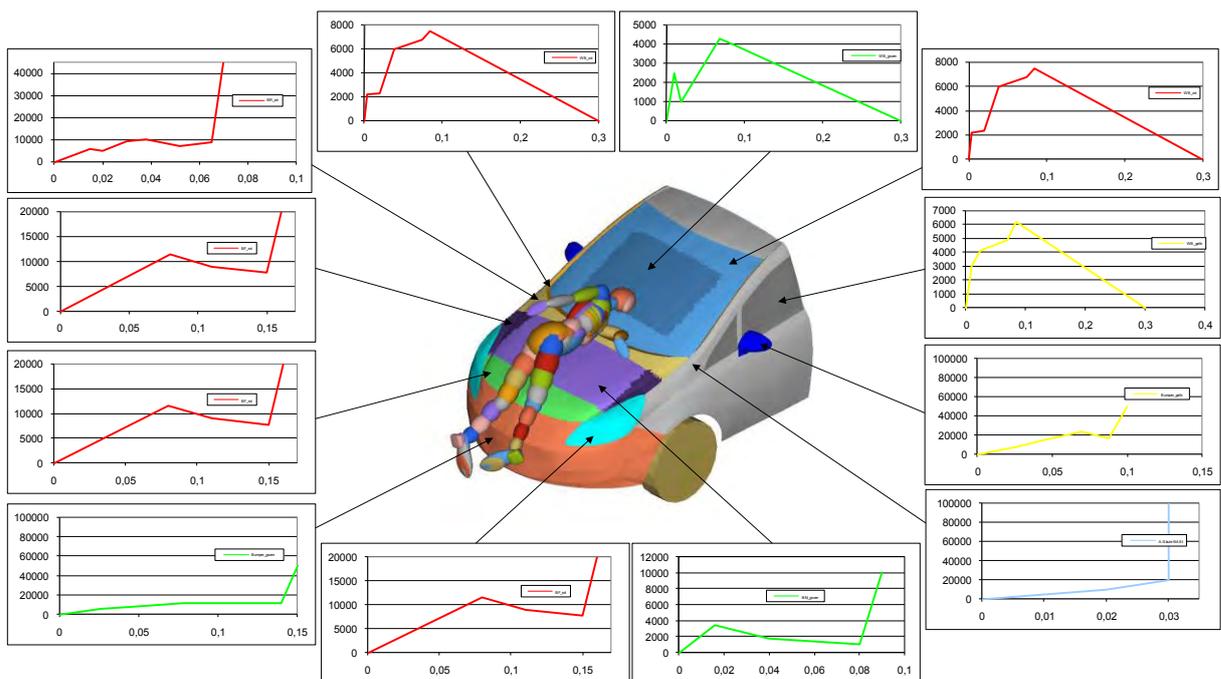


Abb. 3-2: Zuweisung der Kontaktsteifigkeiten ($[N]$ über $[m]$) [HAM10]

Die in den jeweiligen Bereichen zugewiesenen Steifigkeiten stammen aus dem APROSYS-Projekt und beruhen auf den in [MAR06] hergeleiteten Steifigkeitskorridoren. Grundlage für die Kraft-Weg-Verläufe bildet die Analyse von 425 im Rahmen von Euro NCAP durchgeführten Impaktortests. Für relevante Bereiche der Front werden dabei Steifigkeiten gemäß der charakteristischen Euro NCAP-Farbcodierung vorgegeben. Lediglich für den A-Säulen-Bereich wird auf den entsprechenden Verlauf aus [WAL07] (hellblau eingefärbt) zurückgegriffen, da dieser nicht Teil der APROSYS-Untersuchung war. Die Deformationscharakteristik

Die CAD-Flächendaten werden anschließend, analog zum Aufbau der Fahrzeugmodelle, mit finiten Elementen vernetzt, welche direkt in MADYMO überführt werden. Dies hat den Vorteil, dass die Oberflächen der Fahrradkomponenten homogen sind und nicht über einzelne klassische Mehrkörpergeometrien abgebildet werden müssen. Lediglich für die Reifen werden zwei Ellipsoide definiert.

Parameterstudien, die im Vorfeld der eigentlichen Simulationen durchgeführt worden sind, zeigen, dass die Pedalstellung des Radfahrers entscheidenden Einfluss auf die Unfallkinematik hat. Um diesen Einfluss ausreichend zu berücksichtigen, werden insgesamt vier Pedalstellungen definiert und in der Simulation umgesetzt: fahrzeugseitiges Bein unten bzw. oben und Pedale auf gleicher Höhe mit fahrzeugseitigem Bein voraus bzw. zurück. Abb. 3-5 gibt einen Überblick über die Radfahrerkonstellationen, die sich jeweils aus den vier Radfahrergrößen, den vier zugehörigen Fahrradmodellen sowie den vier Pedalstellungen ergeben. Darüber hinaus sind auch die Massen der jeweiligen Fahrradmodelle angegeben.

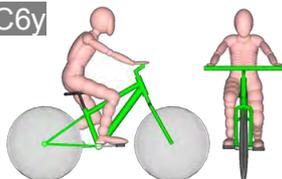
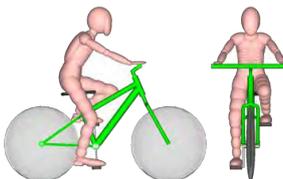
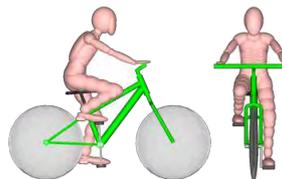
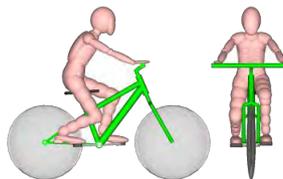
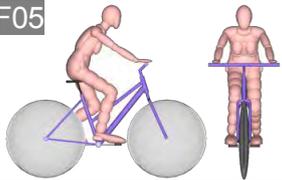
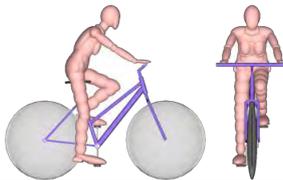
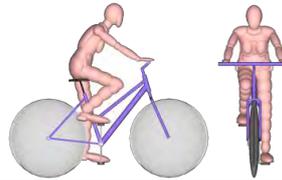
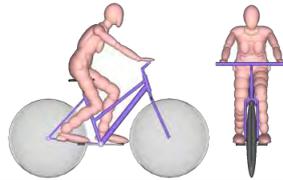
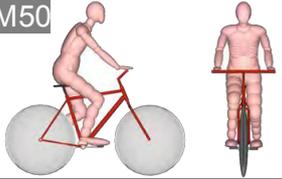
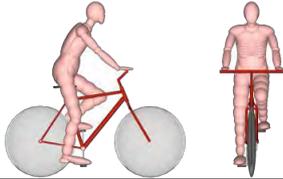
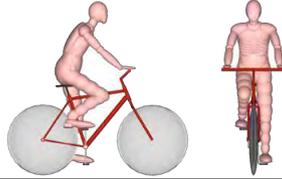
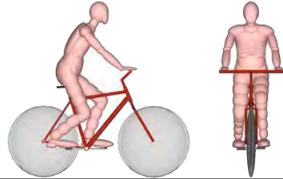
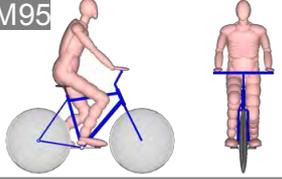
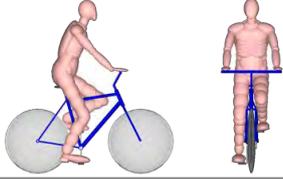
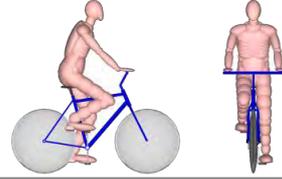
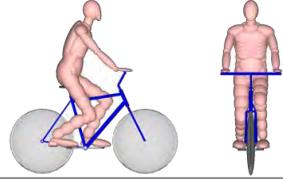
	Fzgs. Bein hinten	Fzgs. Bein oben	Fzgs. Bein unten	Fzgs. Bein vorne
C6y				
F05				
M50				
M95				
	C6y-Kinderfahrrad	F05-Fahrrad	M50-Fahrrad	M95-Fahrrad
Masse [kg]	12,6	15,1	16,8	17,3

Abb. 3-5: Radfahrerkonstellationen in der Simulation

Der Fahrradrahmen, die lenkbare Gabel und die Pedalerie verhalten sich, bedingt durch die Art der Kontaktgenerierung in der Simulation, beim Fahrzeuganprall ideal steif, sodass ausschließlich die Steifigkeiten der Fahrzeugfront zum Tragen kommen. Für die Reifen und den Sattel wird das Hysterese-Kontaktmodell der Schuhsohle des Radfahrers verwendet.

3.1.3 Abbildung einer aktiven Haube

Passive Schutzsysteme verbessern in erster Linie die Struktureigenschaften im abgedeckten Schutzbereich, haben aber in der Regel auch Einfluss auf die Unfallkinematik. Um diesen Einfluss für die Ausstattung eines Fahrzeuges mit aktiver Haube und gegebenenfalls zusätzlichem Windschutzscheibenairbag generell bewerten zu können, wird die Haube bei allen generischen Fahrzeugmodellen in der Simulation hinten jeweils um 100 mm angehoben (Abb. 3-6). Diese Position ist starr, d.h. die Haube senkt sich beim Aufprall des Radfahrer- bzw. Fußgängermodells nicht ab. Die Modellierung entspricht damit einem sogenannten „Locking System“, welches über eine Arretierungsfunktion verfügt, und trifft auch auf den Fall zu, dass die Haube durch eine Airbagentfaltung aufgestellt und abgestützt wird.

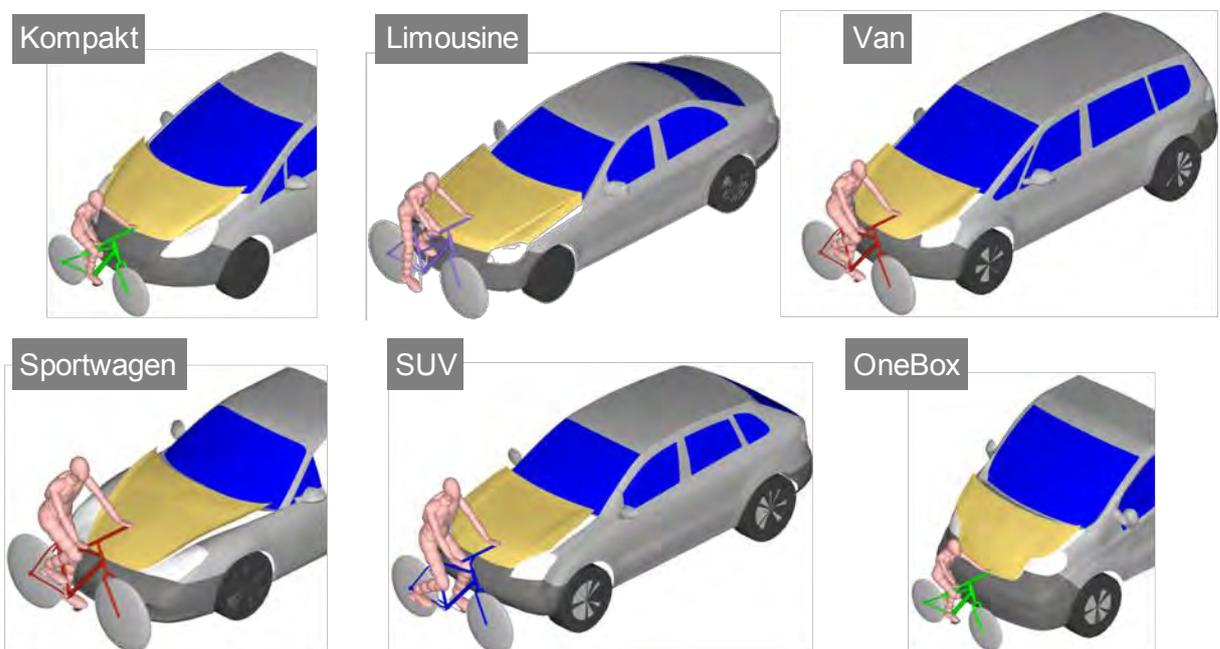


Abb. 3-6: Abbildung einer aktiven Haube in der Simulation

Die Abbildung eines Einfederungs- oder Nachschwingverhaltens erfordert die Durchführung gekoppelter Simulationen, in denen ein detailliertes FE-Fahrzeugmodell mit einem Mehrkörperfußgänger- bzw. Radfahrermodell kombiniert wird. Für die Anwendung des Bewertungsverfahrens würde ein solcher Ansatz die Einbindung des jeweiligen OEMs bedeuten, welcher die entsprechenden Daten zur Verfügung stellen müsste. Hier wäre ein ähnliches Modell wie beim Euro NCAP-Grid (Kapitel 4.1.2) denkbar, wo die Daten durch den OEM ermittelt und seitens Euro NCAP abgeprüft werden.

3.2 Anstoßkonstellationen und Simulationsparameter

Die in der Simulation abzubildenden Anstoßkonstellationen sowie die entsprechende Positionierung des Radfahrers gehen aus Kapitel 2.1.3 hervor. Abb. 3-7 veranschaulicht die Umsetzung am Beispiel einer Konstellation mit dem Fahrzeugmodell Kompakt und dem Radfahrer-

modell des 50%-Mannes. Die Fahrzeuggeschwindigkeit bei den rechtwinkligen Anstoßkonstellationen beträgt gemäß Abb. 2-11 40 km/h. Zusätzlich werden für das Basisfahrzeug auch die Geschwindigkeiten 35, 30 und 20 km/h abgebildet. Die Kollisionen erfolgen jeweils ungebremst. Die Geschwindigkeit des Radfahrers beträgt immer 15 km/h.

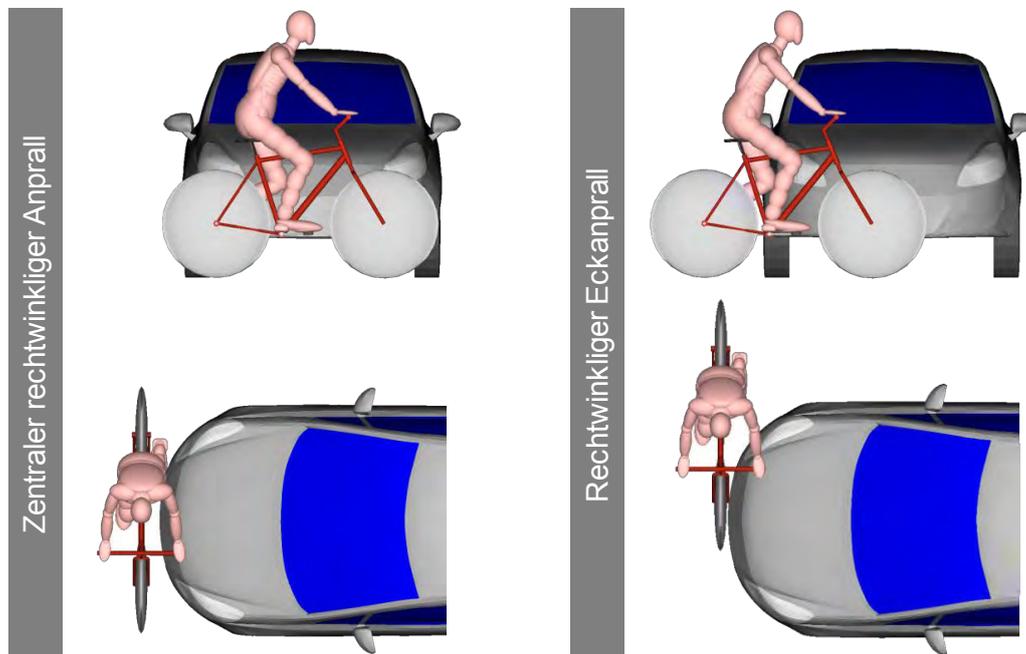


Abb. 3-7: Anstoßkonstellationen

Neben den Kontaktsteifigkeiten sind auch Reibwerte für sämtliche Kontaktpaarungen im Zeitfenster bis zum Primäranprall zu definieren. Diese werden in Abb. 3-8 zusammengefasst.

Reibpaarung	Reibkoeffizient
Körper Radfahrer – Arme Radfahrer	0,3
Radfahrer – Fahrrad	0,3
Radfahrer – Fahrzeug	0,2
Radfahrer – Räder Fahrzeug & Fahrrad	0,6
Fahrrad – Fahrzeug	0,2
Fahrrad Räder – Fahrzeug	0,6
Fahrrad Räder – Fahrzeug Räder	0,7

Abb. 3-8: Reibwerte für den Primäranprall

3.3 Simulationsmatrix

Die Anzahl der berücksichtigten Fahrzeug- und Radfahrermodelle sowie der Anstoßkonstellationen und Pedalstellungen führt im Zuge der vier betrachteten Fahrzeuggeschwindigkeiten und zuzüglich aktiver Haube zu einer Anzahl von insgesamt 960 Simulationen (Abb. 3-9).

Simulationsmatrix	
6 Fahrzeugmodelle	Kompakt, Limousine, Van, SUV, OneBox & Sportwagen
4 Radfahrermodelle	6-jähriges Kind, 5%-Frau, 50% & 95%-Mann
2 Anstoßkonstellationen	Radfahrer von rechts kreuzend, rechtwinklig zentral & außen
4 Pedalstellungen	fahrzeugseitiges Bein unten, oben, vorne & hinten
4 Fzg.-Geschwindigkeiten	40 km/h, 35 km/h, 30 km/h & 20 km/h
+ Aktive Haube	40 km/h
1 Radfahrergeschwindigkeit	15 km/h
$6 \times 4 \times 2 \times 4 \times 5 \times 1$	960 Simulationen

Abb. 3-9: Simulationsmatrix

Im parallel durchgeführten BAST-Radfahrerprojekt ist mit 35 km/h nur eine Fahrzeuggeschwindigkeit für die rechtwinkligen Anstoßkonstellationen berücksichtigt worden. Allerdings erfolgt hier zusätzlich die Abbildung des Abbiegeszenarios mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 25 km/h gemäß Abb. 2-10 (96 Simulationen). Desweiteren werden noch verschiedene Simulationsstudien durchgeführt, im GDV-Projekt zum Einfluss der erhöhten Masse eines Pedelecs auf den Primäranprall (Kapitel 3.6.8) sowie zur Kinematik beim Sekundäraufprall (Kapitel 3.6.9) und im BAST-Projekt hinsichtlich der Kontaktsteifigkeiten im Stoßfänger und vorderen Haubenbereich. Hinzu kommen zahlreiche Simulationen im Rahmen der Modellvalidierung (Kapitel 3.5) sowie zur Versuchsauslegung (Kapitel 5.1). Somit umfasst die Untersuchung der Radfahrerunfallkinematik in beiden Projekten insgesamt weit über 1000 Simulationen.

3.4 Simulationsauswertung

Kopfverletzungen haben laut Kapitel 2.5 die höchste Relevanz in AIS3+ Radfahrerfrontalunfällen und sind entscheidend vom Aufprallort abhängig. Auch Thoraxverletzungen weisen für Radfahrer, wie beim Fußgänger, eine hohe Relevanz auf. Dennoch sind für das erarbeitete Bewertungsverfahren, analog zum Fußgängerschutzverfahren, keine Prüfungen zur Thoraxbelastung vorgesehen, zumal ein entsprechender Impaktor und damit Eingangsdaten aus Prüfungen fehlen. Der Fokus bei der Auswertung der Simulationen liegt daher hauptsächlich auf dem Kopfaufprall. Betrachtet werden die Parameter Kopfaufprallzeit, -ort, -geschwindigkeit und -winkel, welche im Folgenden näher beschrieben werden. Auswertungen zum Beinprall sind im Rahmen der Simulationen innerhalb dieses Projektes ebenfalls nicht vorgesehen, sind aber Bestandteil des BAST-Projektes und stehen somit prinzipiell zur Verfügung. Eine kurze Zusammenfassung wird entsprechend in Kapitel 3.6.10 gegeben.

Die Kopfaufprallzeit (HIT) beschreibt die Zeit zwischen dem Erstkontakt der Front mit dem Radfahrer und dem Primäraufprall des Kopfes auf das Fahrzeug und liefert somit Erkenntnisse über den zur Verfügung stehenden Sensier- und Auslösezeitraum von aktiven Schutzsystemen der passiven Fahrzeugsicherheit. Da die Radfahrermodelle innerhalb der Simula-

tionen unmittelbar vor der Fahrzeugfront platziert sind, kann die Simulationsdauer bis zum Kopfanprall mit der Kopfaufprallzeit gleichgesetzt werden.

Der Kopfaufprallort markiert den Berührungspunkt des Kopfes mit der Fahrzeugoberfläche zum Zeitpunkt des Erstkontaktes und wird über die entsprechende Abwickellänge beschrieben. Im Rahmen der Auswertung kommen fahrzeugspezifische WAD-Rasterlinien mit einem Abstand von jeweils 50 mm zum Einsatz (Abb. 3-10), welche eine direkte Bestimmung der Kopfabwickellänge innerhalb der Animation ermöglichen.

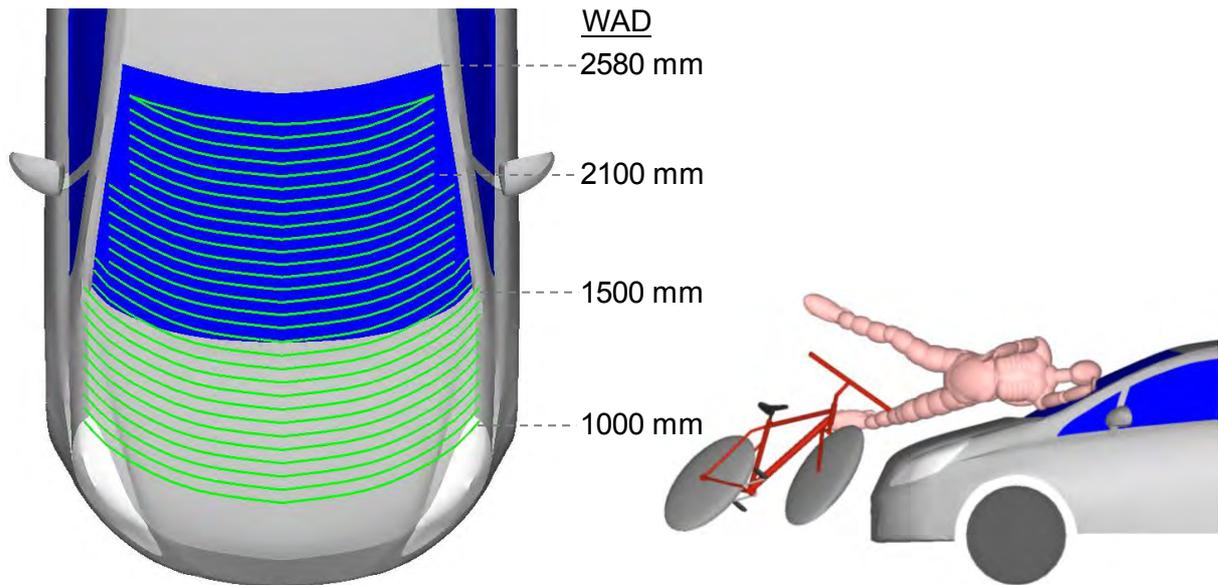


Abb. 3-10: Auswertungsraster zum Kopfaufprall

Trifft der Kopf nicht direkt auf der Fahrzeugoberfläche sondern im Zuge der Gesamtkinematik auf dem Arm des Radfahrers auf, so wird auch dieser Kopfaufprall ausgewertet und fließt in die Bewertung ein. Der Kopfaufprallort wird dann entsprechend auf die darunterliegende Fahrzeugfläche projiziert. Im Rahmen der Dokumentation werden diese Simulationen gesondert markiert. Gleiches gilt für ein vorheriges Streifen des Armes.

Als Kopfaufprallgeschwindigkeit ist die Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Schwerpunkt des Fußgängerkopfes zum Zeitpunkt des Kopfaufpralls definiert. Der Vektor der Relativgeschwindigkeit des Kopfes $v_{\text{rel,Kopf}}$ berechnet sich über Gl. 3-1. Die entsprechenden Komponenten werden über die gesamte Simulationsdauer aufgezeichnet.

$$|\vec{v}_{\text{rel,Kopf}}| = \sqrt{(v_{\text{Kopf,x}} - v_{\text{Fzg,x}})^2 + v_{\text{Kopf,y}}^2 + v_{\text{Kopf,z}}^2} \quad \text{Gl. 3-1}$$

Im Gegensatz zur Relativgeschwindigkeit erfolgt die Berechnung des Kopfanflug- bzw. Aufprallwinkels α_{Kopf} in der x-z-Ebene. Dieser ergibt sich gemäß Abb. 3-11 aus dem Winkel zwischen dem Vektor der Relativgeschwindigkeit des Kopfes in x-z-Richtung und der Horizontalen. Die Berechnung erfolgt nach Gl. 3-2. Der Kopfaufprallwinkel wird, wie die Kopfaufprallgeschwindigkeit, zum Zeitpunkt des Erstkontaktes von Radfahrerkopf und Fahrzeug ermittelt.

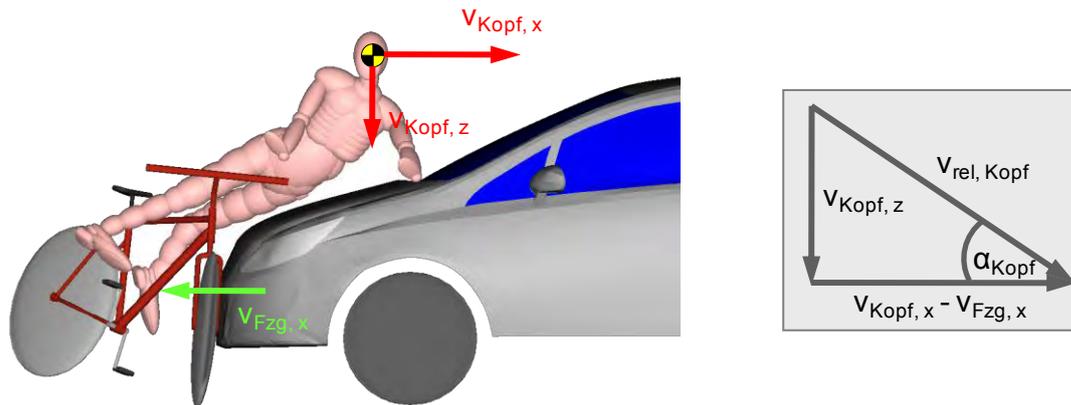


Abb. 3-11: Berechnung des Kopfaufprallwinkels

$$\alpha_{\text{Kopf}} = \arctan\left(\frac{v_{\text{Kopf},z}}{v_{\text{Kopf},x} - v_{\text{Fzg},x}}\right) \quad \text{Gl. 3-2}$$

Die beschriebenen Kinematikparameter werden für jedes Fahrzeugmodell, gegliedert hinsichtlich der jeweiligen Anstoßkonstellationen und Pedalstellungen, in einer Excel-Tabelle dokumentiert und ausgewertet.

3.5 Modellvalidierung mittels Rekonstruktion eines Realunfalls

Die im Rahmen der Simulation definierten Parameter werden im Folgenden anhand eines Realunfalls aus der GIDAS-Datenbank validiert. Die Daten dürfen nur innerhalb dieses Projektes genutzt werden und sind somit nicht öffentlich. Die Randbedingungen der zu rekonstruierenden Anstoßkonstellation sowie die Radfahreranthropometrie beschreibt Abb. 3-12.

Unfalldaten			
Unfalljahr	2010		
Unfalltyp	Kreuzen - Bevorrechtigter von rechts u. geradeaus		
Verletzungsschwere	schwer (MAIS3)		
Zweirad überrollt	Nein		
Anstoß am Zweirad	9 Uhr		
Kollisionswinkel	-81°		
Pkw	Opel Corsa D (Zulassung 2007)		
Pkw-Ausgangsgeschwindigkeit	40 km/h	Daten Radfahrer	
Kollisionsgeschwindigkeit Pkw	35 km/h	Geschlecht	männlich
Mittlere Bremsverzögerung Pkw	5 m/s ²	Alter	70
Rad-Ausgangsgeschwindigkeit	13 km/h	Größe	168 cm
Kollisionsgeschwindigkeit Rad	13 km/h	Gewicht	74 kg



Abbildung durch 50%-Mann

Abb. 3-12: Parameter des Realunfalls (Quelle: GIDAS, nicht öffentlich)

Der Radfahrer wird im Rahmen der Unfallrekonstruktion durch das Modell des MADYMO-50%-Mannes (174 cm, 75,7 kg) abgebildet. Auch wenn dieses etwas von der Anthropometrie des realen Radfahrers abweicht, wird hier auf eine Skalierung verzichtet. So kann die Validierung der Simulationsparameter anhand eines Modells erfolgen, welches auch in den späteren Simulationen zur Unfallkinematik eingesetzt wird. Dabei wird in Kauf genommen, dass aufgrund des 6 cm größeren Simulationsmodells die Lage des Kopfaufprallortes in der Rekonstruktion etwas höher ausfallen wird als im Realunfall. Hierbei handelt es sich um ein Szenario, bei dem der Fahrer des mit 40 km/h geradeausfahrenden Pkw den von rechts kommenden und vorfahrtberechtigten Radfahrer übersieht und dieser im Zuge der sich daraus ergebenden Kollision mit dem Kopf auf die Windschutzscheibe auftrifft und anschließend nach vorne abgeworfen wird. Anhand der Unfallskizze lässt sich für den Radfahrer in Bezug auf den Blutfleck eine Längswurfweite von ca. 10,4 m ermitteln. Die Längswurfweite des Fahrrads, welches an einem Bordstein liegen bleibt, beträgt ca. 8,5 m.

Das Unfallfahrzeug entspricht dem Simulationsmodell Kompakt, sodass im Zuge der Unfallrekonstruktion kein weiteres Fahrzeugmodell aufgebaut werden muss. Anders verhält es sich hinsichtlich des Fahrradmodells. Da der Radfahrer auf einem für seine Statur zu großem Fahrrad unterwegs gewesen ist, kann das bestehende Fahrradmodell des 50%-Mannes nicht verwendet werden, zumal auch die Lenkergeometrie nicht übereinstimmt. Für die Rekonstruktion des Unfalls wird daher ein separates Modell gemäß der vorhandenen Daten aufgebaut (Abb. 3-13). Das Gewicht des am Unfallfahrrad unterhalb des Sattels mitgeführten Fahrradschlösses ist darin ebenfalls berücksichtigt. Hierzu wird das Rahmengewicht erhöht und die Schwerpunktlage entsprechend verschoben.



Abb. 3-13: Rekonstruktion des Unfallfahrrads

Trotz der bekannten Randbedingungen ergibt sich eine Vielzahl möglicher Konstellationen. So sind weder die genauen fahrzeug- und fahrradseitigen Erstkontaktstellen noch die Pedalstellung des Radfahrers sowie der Nickwinkel des Fahrzeuges bekannt. Allesamt haben entscheidenden Einfluss auf die Unfallkinematik, welche im Rahmen der Rekonstruktion auch den Sekundäraufprall mit einschließt. Die sich daraus ergebene Anzahl an Parametervariationen bedingt eine relativ große Anzahl an Simulationen, die innerhalb eines iterativen Prozesses bis zur realitätsnahen Abbildung der Realunfalldaten durchgeführt werden müssen. Zur Gewährleistung einer schnellen Auswertung werden das Schadensbild des Fahrzeuges

(Abb. 3-14) sowie die Längswurfweite des Radfahrers mit dem Simulationsmodell überlagert, sodass die Realitätsnähe direkt innerhalb der Animation bewertet werden kann.

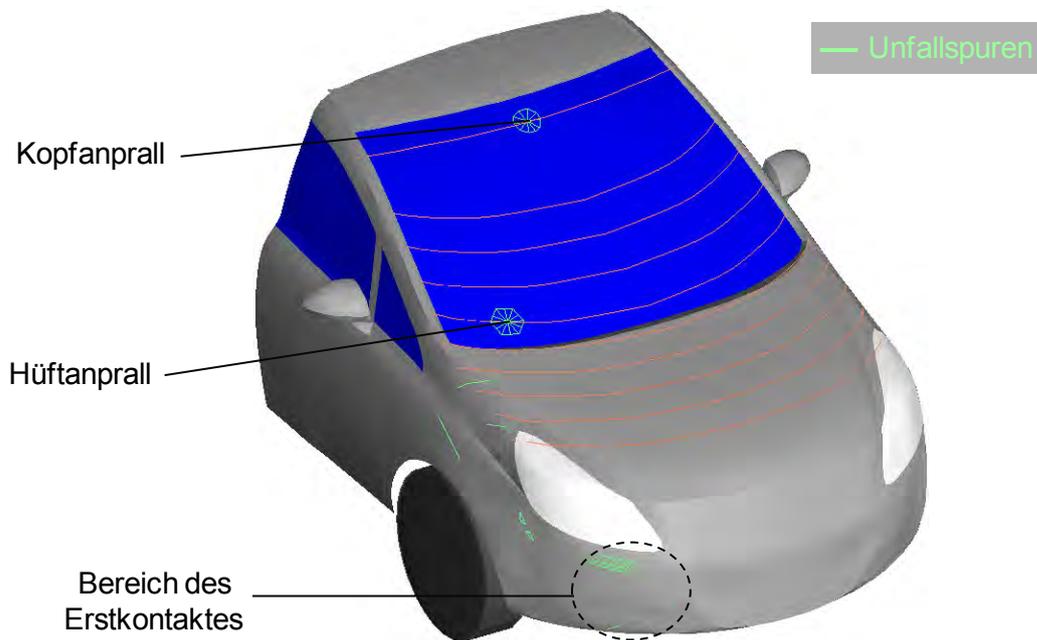


Abb. 3-14: Überlagerung des Schadensbildes mit dem Fahrzeugmodell

Im Zuge der durchgeführten Parametervariationen werden zahlreiche Anstoßkonstellationen simuliert und mit den fahrzeugseitigen Unfallspuren sowie der ermittelten Längswurfweite verglichen. Abb. 3-15 zeigt eine Konstellation, welche den Realunfalldaten sehr nahe kommt. Die Aufprallorte für Hüft- und Kopfaufprall werden genau getroffen, d.h. der sich hier aufgrund der Eigengeschwindigkeit des Radfahrers ergebene Versatz in y-Richtung kann in der Simulation realitätsgetreu abgebildet werden. Die erwartete Rückverlagerung des Kopfaufpralls in Fahrzeuglängsrichtung entspricht mit ca. 6 cm dem Größenunterschied zwischen 50%-Mann und realem Radfahrer und ist somit realistisch. Eine Übereinstimmung mit den Unfallspuren an der rechten Frontseite kann neben dem Bein- und Pedalanprall im Bereich unterhalb des Scheinwerfers auch für den Kontakt des linken Radfahrerschuhs mit der Oberkante des Kotflügels erzielt werden. Einzig die Unfallspuren im seitlichen Bereich des Kotflügels werden in der Simulation nicht wiedergegeben. Bezüglich der Endlage des Radfahrers ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit der anhand des Blutflecks auf der Straße ermittelten Längswurfweite, zumal der reale Radfahrer etwas leichter als der 50%-Mann ist.

In den Simulationen zeigt sich, dass u.a. die Pedalstellung erheblichen Einfluss auf die Längswurfweite hat. In der abgebildeten Konstellation ist das fahrzeugseitige Bein vorne, wobei die Pedale nicht genau waagrecht sind. Das fahrzeugseitige Pedal befindet sich etwas höher als das fahrzeugabgewandte Pedal. Ändert man diese Pedalstellung lediglich um ein paar Grad, sodass das fahrzeugseitige Pedal etwas tiefer liegt als das fahrzeugabgewandte Pedal, so befindet sich der Radfahrer in Endlage genau auf der als Markierung dienenden grünen Linie. Dabei ist er fast parallel zu dieser ausgerichtet, mit dem Kopf unmittelbar hinter

der Linie. Allerdings erfolgt dann der Hüftaufprall durch die geänderte Pedalstellung nicht mehr im Bereich des unteren Windschutzscheibenrahmens sondern auf der Haubenhinterkante, sodass eine wesentliche Randbedingung des Realunfalls nicht mehr erfüllt ist. Dieses Beispiel verdeutlicht wie sensitiv die einzelnen Einflussparameter sind.

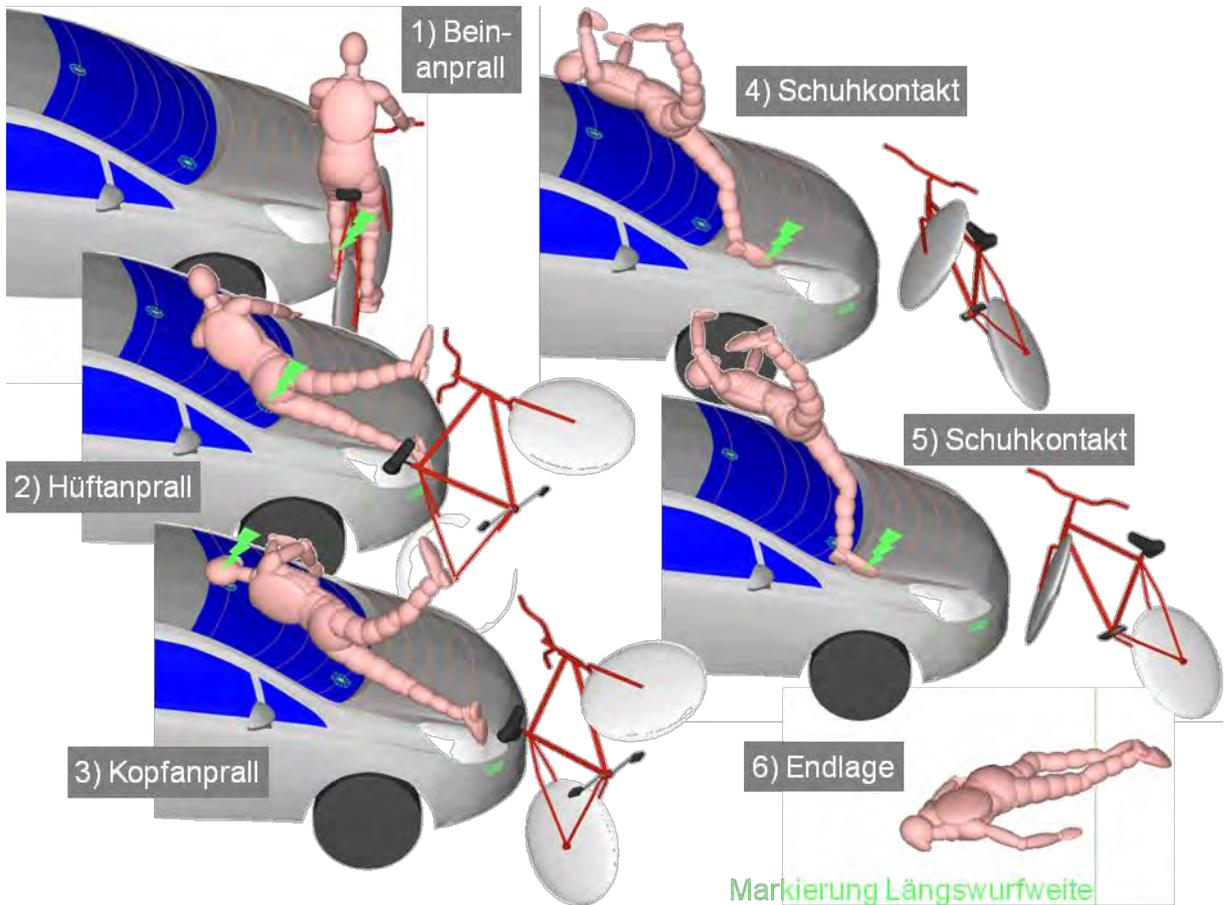


Abb. 3-15: Unfallrekonstruktion anhand fahrzeugseitiger Kontaktstellen und Längswurfweite

Für die in Abb. 3-15 gezeigte Simulation ist zur Berücksichtigung des Bremsnickens eine Neigung der Fahrzeugfront von $1,5^\circ$ definiert. Das Radfahrermodell wird gemäß des Kollisionswinkels im Realunfall aus der rechtwinkligen Anstoßkonstellation heraus 9° um die Hochachse vom Fahrzeug weggedreht. Die Mitte des Kurbeltretlagers befindet sich in y-Richtung 679 mm von der Fahrzeuglängsachse entfernt. Ergänzend zu den Reibwerten in Abb. 3-8 beträgt der für den Kontakt zwischen Radfahrer und Straße definierte Reibwert 0,6. Die durchgeführte Unfallrekonstruktion bestätigt die Definition der Reibwerte, welche sich zum einen an entsprechenden Parametern aus APROSYS orientieren und zum anderen auf Erfahrungen aus dem Vorgängerprojekt beruhen.

3.6 Simulationsergebnisse

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse der einzelnen Fahrzeugmodelle für die Basissgeschwindigkeit von 40 km/h zusammenfassend vorgestellt. Dabei werden die erzielten

Kopfaufprallgeschwindigkeiten und -winkel über der Kopfabwickellänge aufgetragen, wobei sämtliche Radfahrergrößen und Pedalstellungen aus Abb. 3-5 berücksichtigt werden.

3.6.1 Kompakt

Für das Fahrzeugmodell Kompakt gehen die Verteilungen der Kopfaufprallgeschwindigkeiten und -winkel aus Abb. 3-16 und Abb. 3-17 hervor. Der 95%-Mann trifft in drei Eckanprallsimulationen mit WAD-Werten größer 2700 mm jenseits der Dachvorderkante auf. Den minimalen Wert erzielt das 6-jährige Kind mit 1080 mm, sodass der gesamte Frontbereich relevant ist.

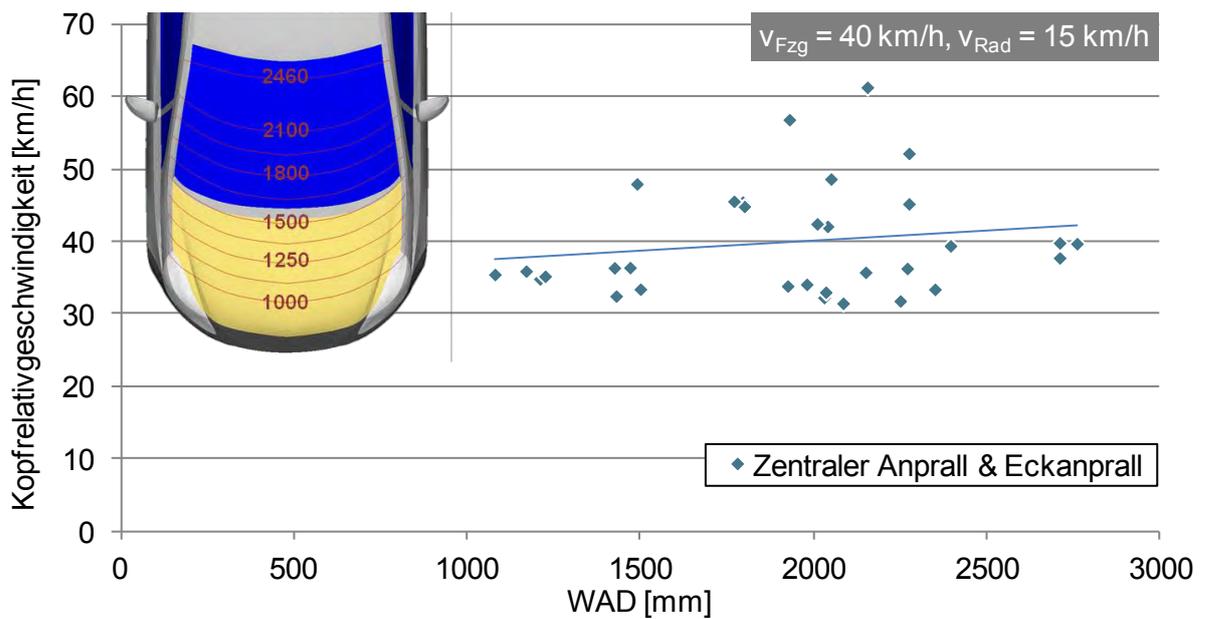


Abb. 3-16: Kompakt - Kopfaufprallgeschwindigkeit über WAD (n = 32)

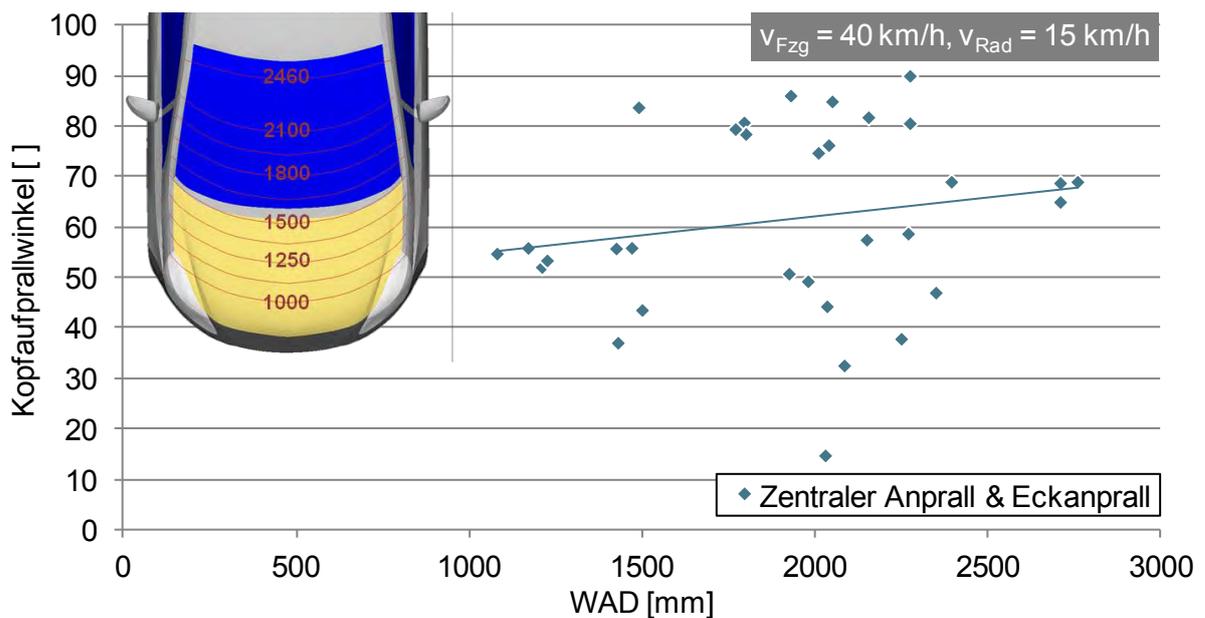


Abb. 3-17: Kompakt - Kopfaufprallwinkel über WAD (n = 32)

Insgesamt zeigt sich für beide Kinematikparameter eine breite Streuung. Bei den Kopfaufprallgeschwindigkeiten werden oftmals Werte oberhalb der Kollisionsgeschwindigkeit erzielt, die Spanne reicht von 32 bis 61 km/h ($\bar{\Delta}$ 40 km/h). Die Streuung der Winkel ist, auch bedingt durch vorherige Armkontakte, nochmals größer. Die Werte reichen von 15° bis 90° ($\bar{\Delta}$ 62°).

3.6.2 Limousine

Die Ergebnisse der Limousine sind in Abb. 3-18 und Abb. 3-19 aufgeführt. Der relevante WAD-Bereich erstreckt sich von 1160 mm bis hinter die Dachvorderkante bei 2865 mm.

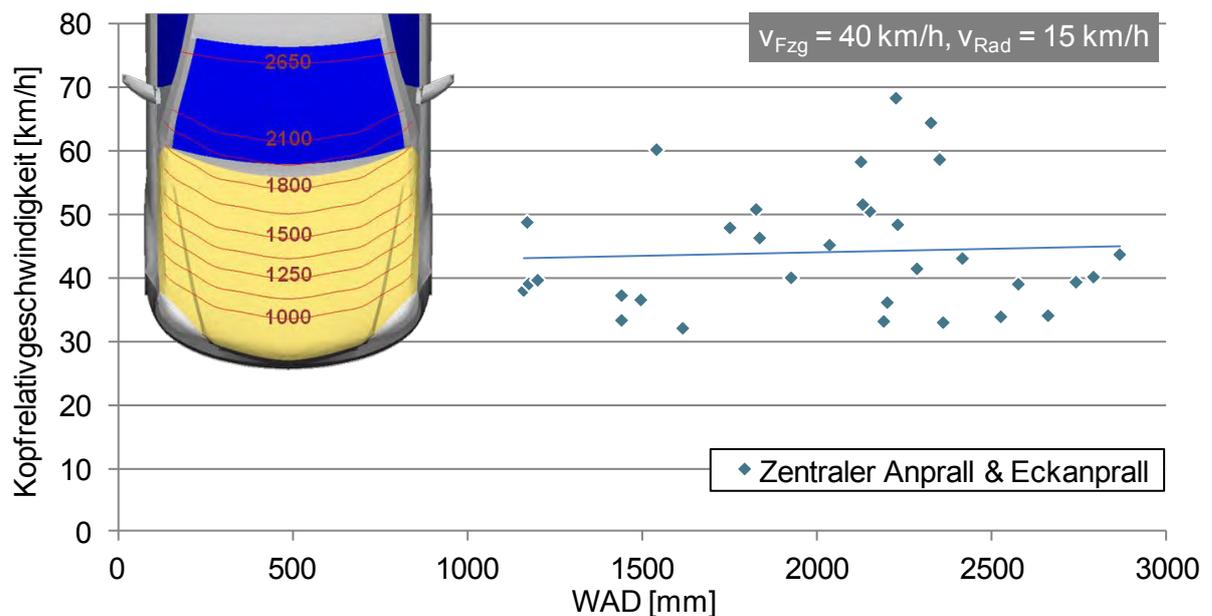


Abb. 3-18: Limousine - Kopfaufprallgeschwindigkeit über WAD (n = 32)

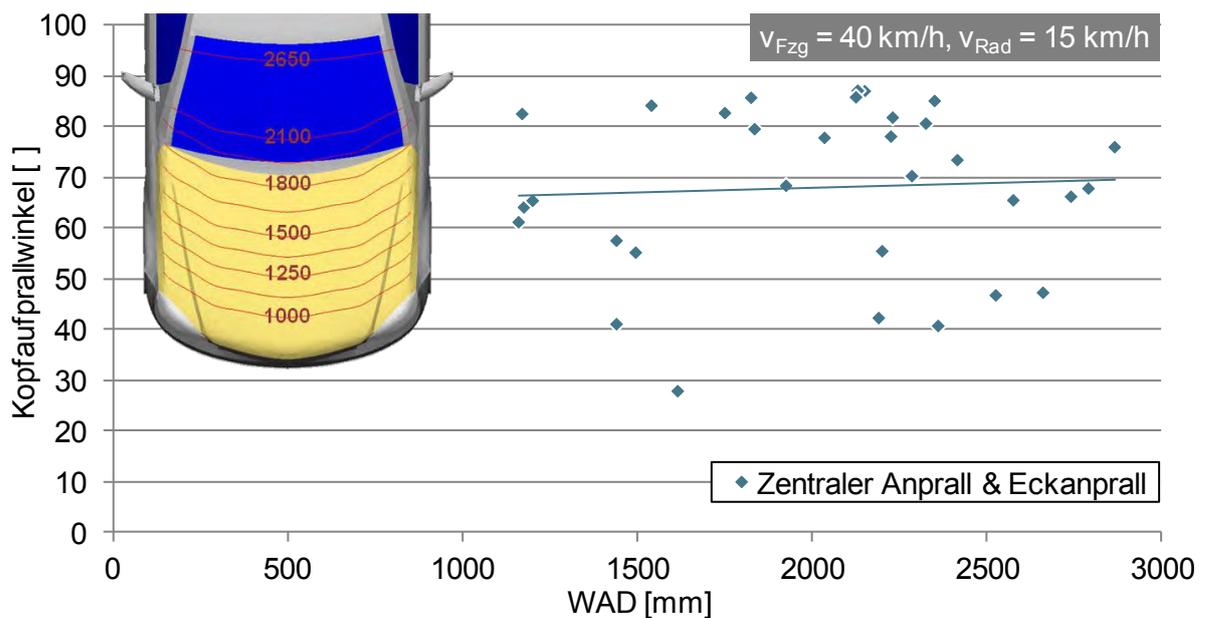


Abb. 3-19: Limousine - Kopfaufprallwinkel über WAD (n = 32)

Dabei kommt der 50%-Mann in einer und der 95%-Mann in drei Eckanprallsimulationen im Bereich der Dachvorderkante auf. Die durchschnittliche Kopfaufprallgeschwindigkeit ist hoch und beträgt 44 km/h, bei Werten zwischen 32 km/h und 68 km/h. Die Streuung der Winkel fällt mit Werten zwischen 28° und 87° (σ 68°) etwas geringer aus als beim Modell Kompakt.

3.6.3 Van

Abb. 3-20 und Abb. 3-21 geben einen Überblick über die Werte des Vans. Die WAD-Spanne fällt mit 1080 bis 2385 mm deutlich kleiner aus als bei den beiden vorherigen Fronten.

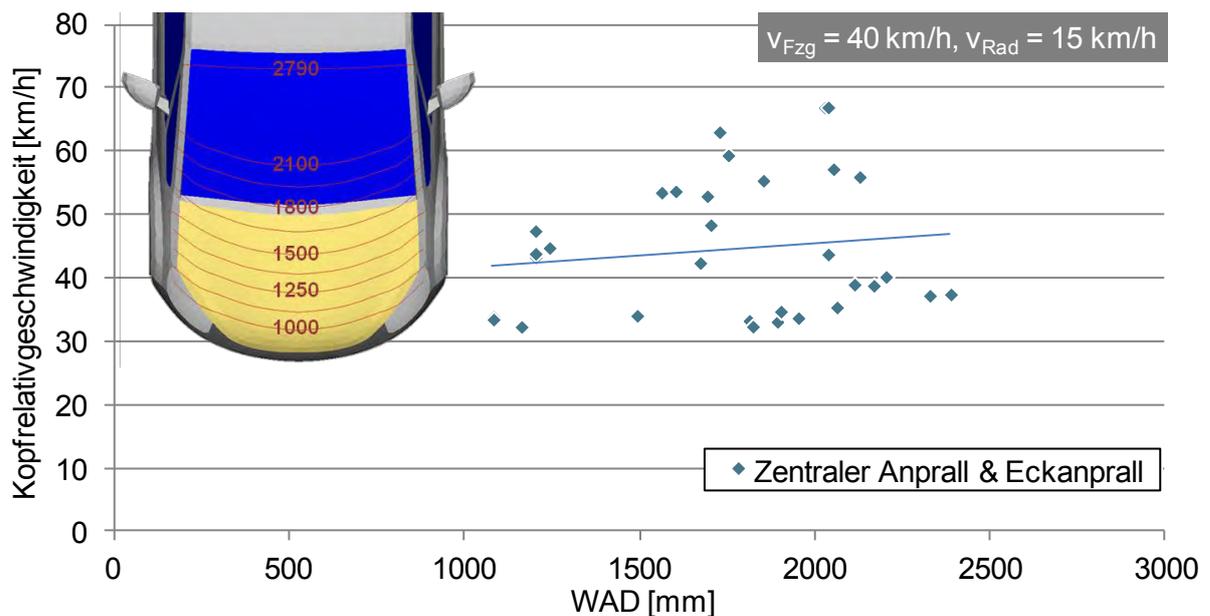


Abb. 3-20: Van - Kopfaufprallgeschwindigkeit über WAD (n = 32)

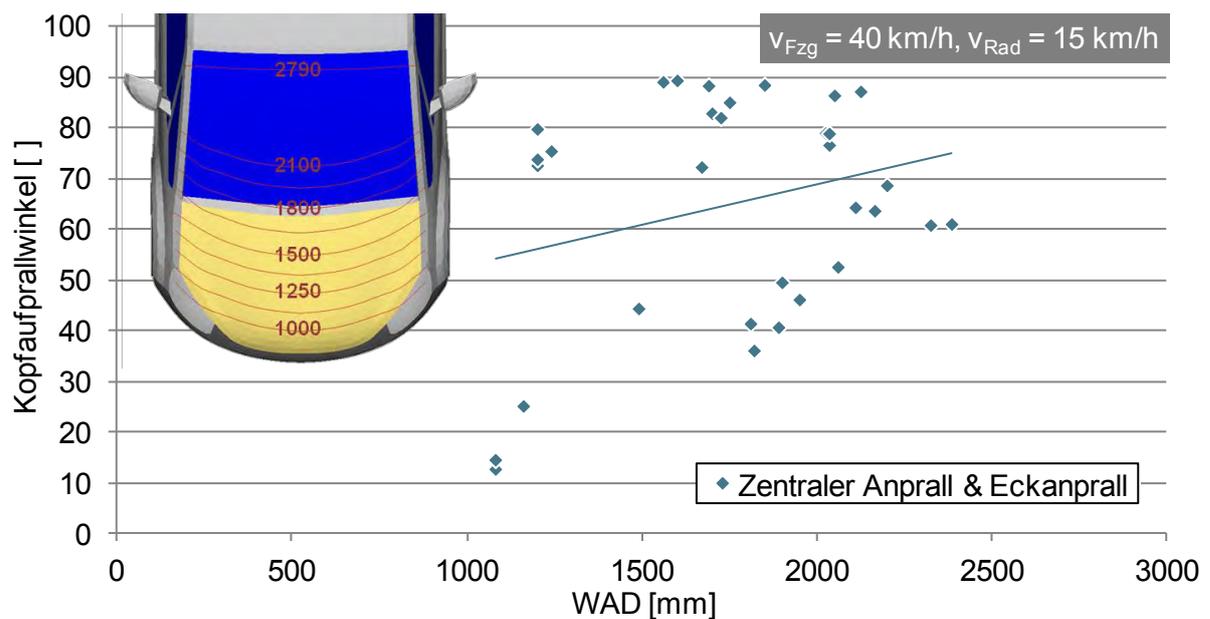


Abb. 3-21: Van - Kopfaufprallwinkel über WAD (n = 32)

Es kommt zu keinem Kopfanprall im Bereich der Dachvorderkante. Die durchschnittliche Aufprallgeschwindigkeit liegt mit 44,5 km/h erneut oberhalb der Kollisionsgeschwindigkeit. Die Werte reichen dabei, ähnlich wie bei der Limousine, von 32 km/h bis 67 km/h. Die Winkelstreuung ist bei Werten zwischen 13° und 89° (Ø 65°) wiederum groß.

3.6.4 SUV

Beim SUV (Abb. 3-22 und Abb. 3-23) ergibt sich im Zuge der hohen Haubenvorderkante ebenfalls ein kürzerer WAD-Bereich, welcher von 1075 mm bis 2375 mm reicht.

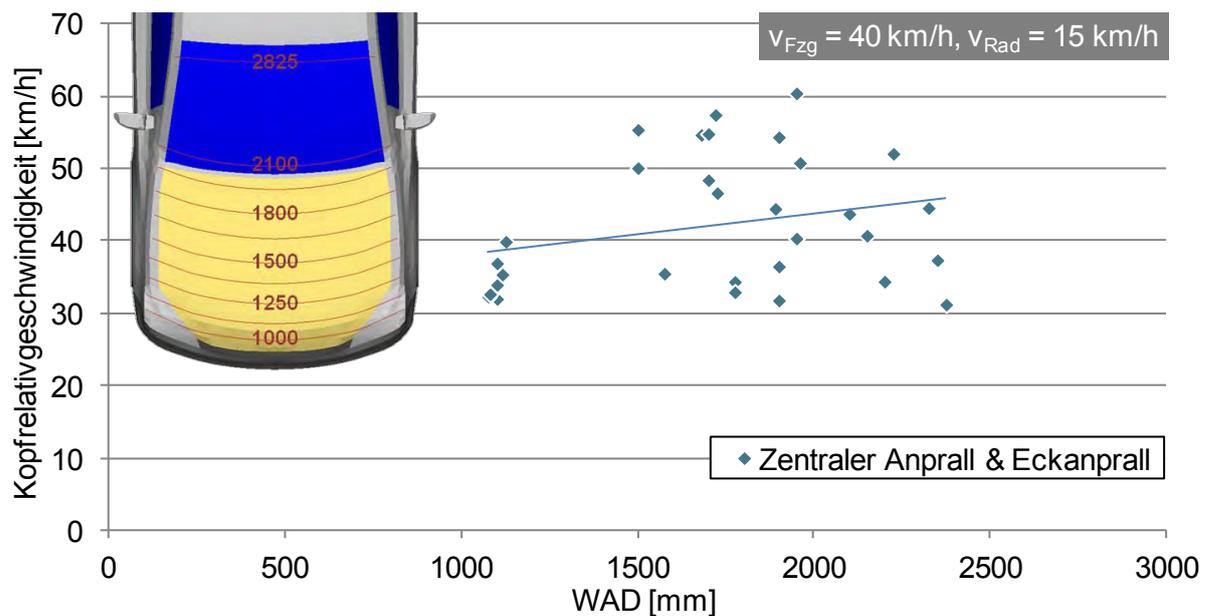


Abb. 3-22: SUV - Kopfaufprallgeschwindigkeit über WAD (n = 32)

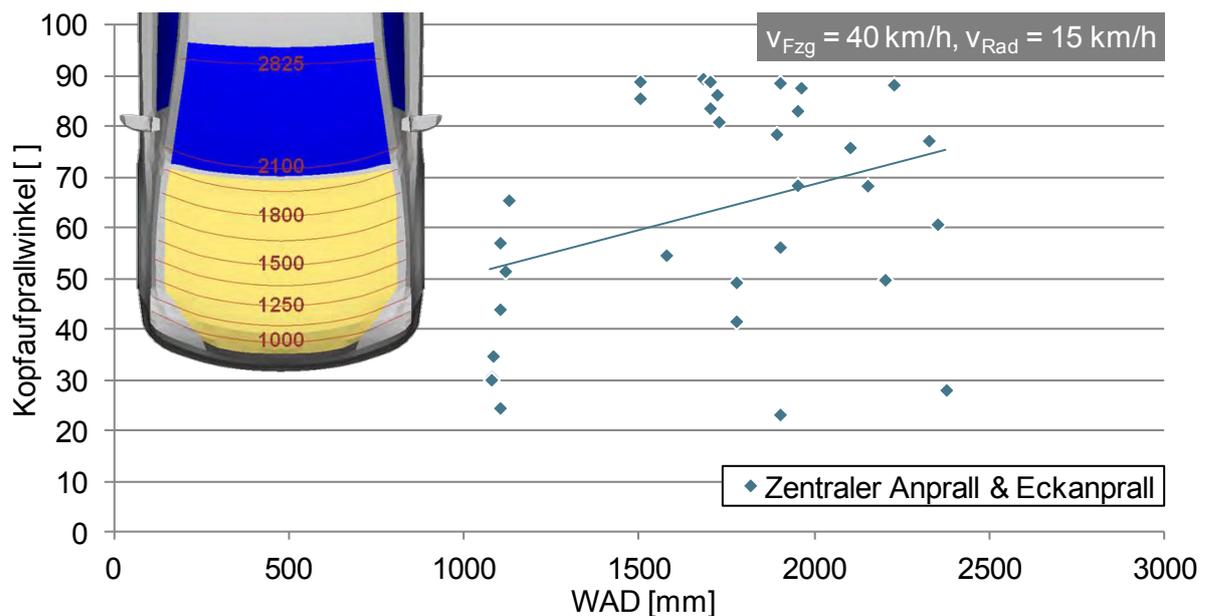


Abb. 3-23: SUV - Kopfaufprallwinkel über WAD (n = 32)

Die Kopfaufprallorte gehen somit nicht über die Mitte der Windschutzscheibe hinaus. Die Aufprallgeschwindigkeiten sind etwas niedriger als bei der Limousine und dem Van. Der Durchschnittswert liegt mit 42 km/h aber erneut oberhalb der Kollisionsgeschwindigkeit. Die Streuung der Aufprallwinkel ist ähnlich wie zuvor (23° bis 89° , \varnothing 63°).

3.6.5 OneBox

Das OneBox-Fahrzeug weist aufgrund der hohen und steilen Front als einziges Modell keine Kopfaufprallorte jenseits der WAD 2100-Grenze auf (Abb. 3-24 und Abb. 3-25).

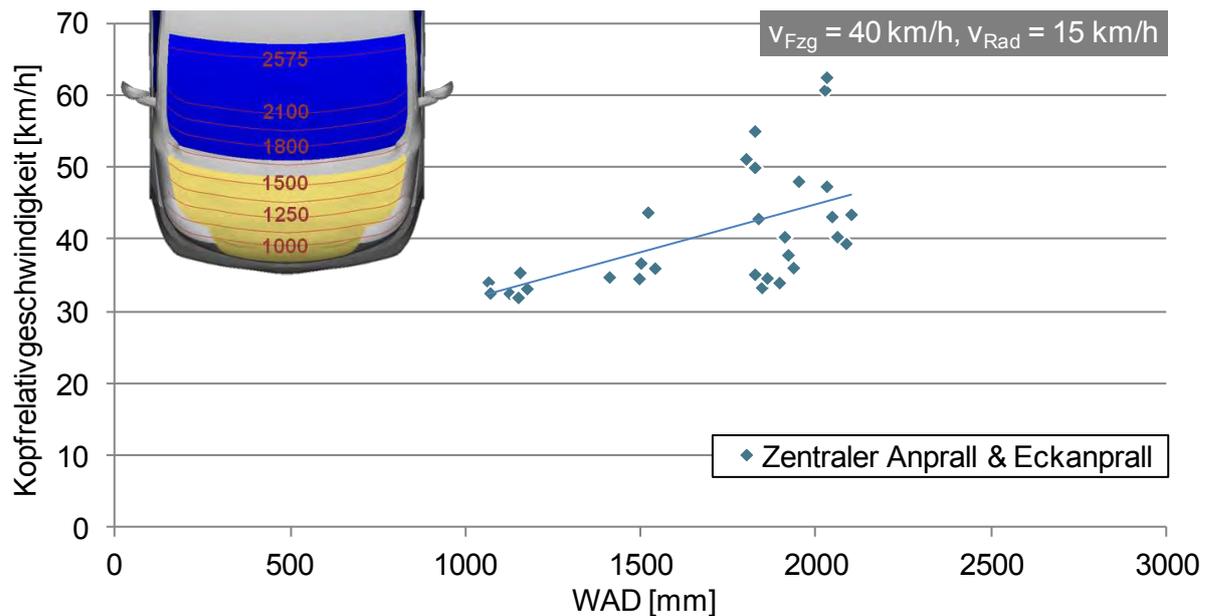


Abb. 3-24: OneBox - Kopfaufprallgeschwindigkeit über WAD (n = 32)

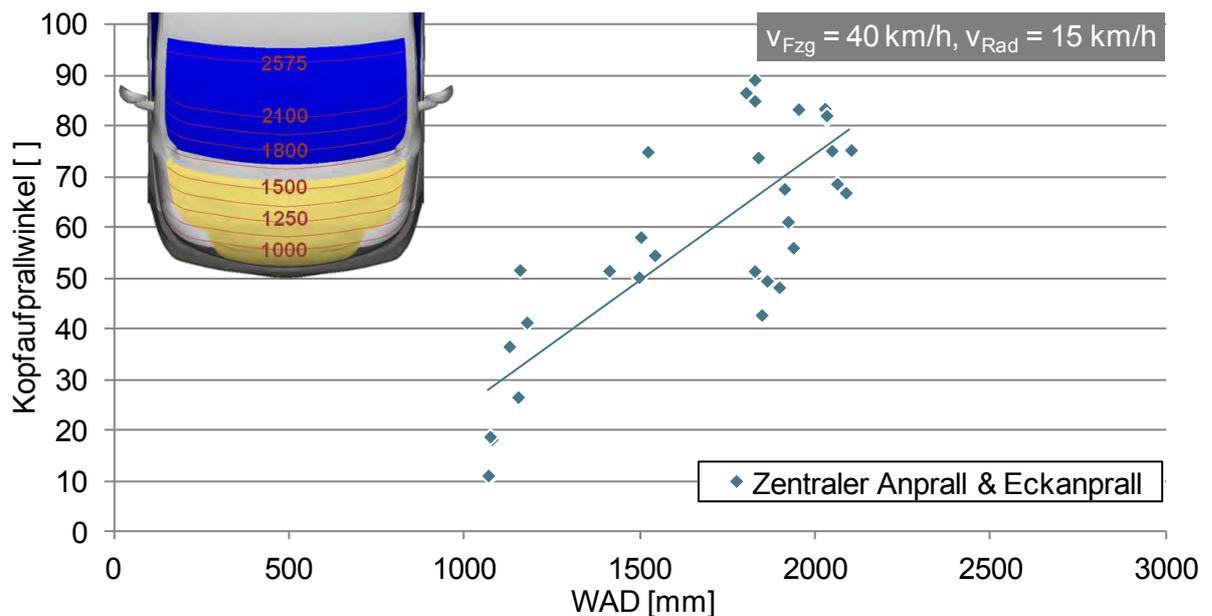


Abb. 3-25: OneBox - Kopfaufprallwinkel über WAD (n = 32)

Die Kopfaufprallgeschwindigkeiten liegen zwischen 32 km/h und 63 km/h, mit einem Durchschnittswert entsprechend der Kollisionsgeschwindigkeit. Das OneBox-Fahrzeug zeigt für die Winkelwerte ($\varnothing 57^\circ$) den steilsten Anstieg der Regressionsgeraden. Im vorderen Haubenbereich ergeben sich Werte zwischen 11° und 52° und auf der Windschutzscheibe bis zu 89° .

3.6.6 Sportwagen

Der Sportwagen weist den größten Kopfaufprallbereich auf (Abb. 3-26, Abb. 3-27). Dieser erstreckt sich von WAD 1095 mm bis 2880 mm, umfasst also auch den vorderen Dachbereich.

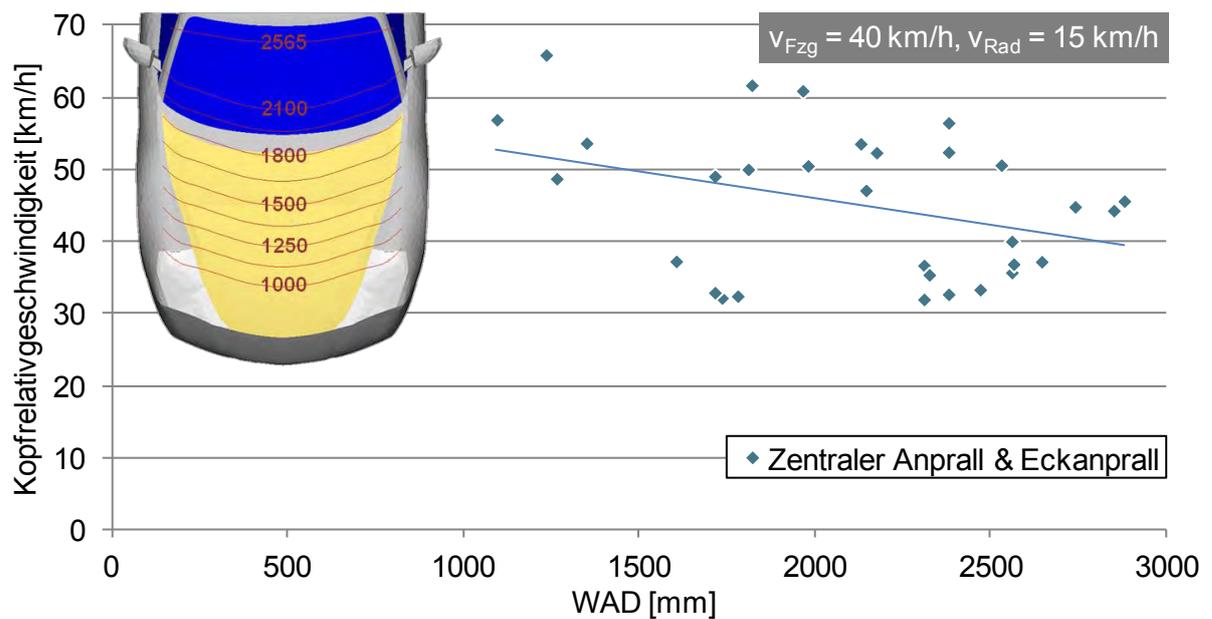


Abb. 3-26: Sportwagen - Kopfaufprallgeschwindigkeit über WAD (n = 31)

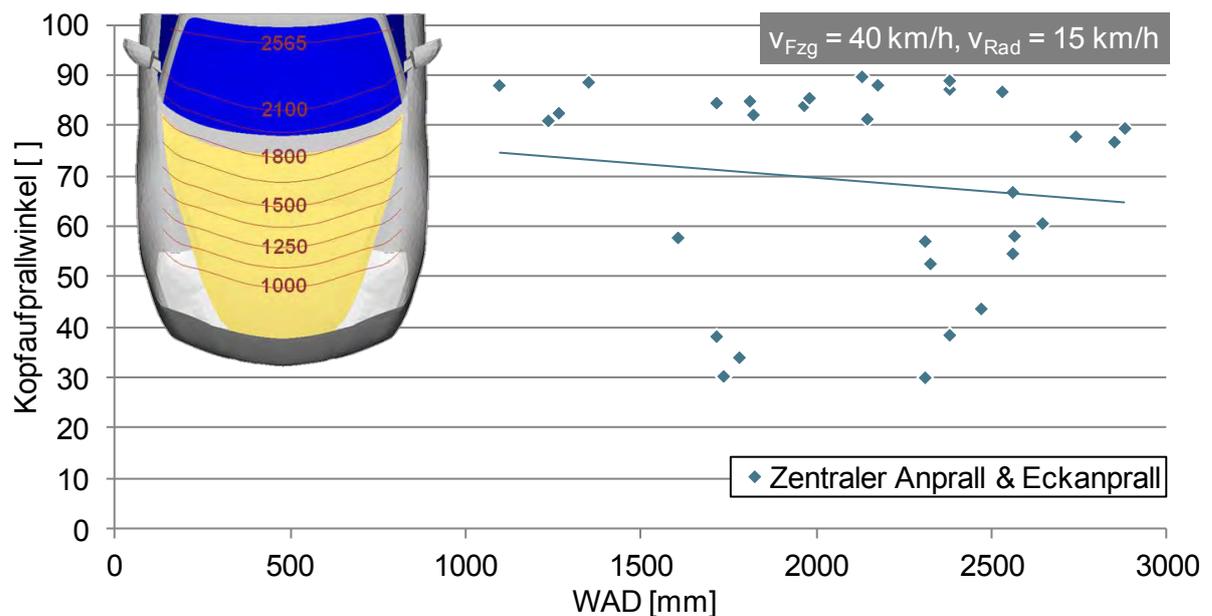


Abb. 3-27: Sportwagen - Kopfaufprallwinkel über WAD (n = 31)

Der 95%-Mann kommt in drei Eckenprallsimulationen mit dem Kopf auf dem Dach auf, während er bei der vierten Eckenprallsimulation mit Pedalstellung fahrzeugseitiges Bein oben die Dachvorderkante trifft. Abgesehen von dieser Pedalstellung trifft der 50%-Mann in den Eckenprallsimulationen knapp unterhalb der Dachvorderkante auf.

Beim Fahrzeugmodell Sportwagen kommt es in einer Simulation zum zentralen Anprall der 5%-Frau aufgrund der kinematischen Gegebenheiten zu keinem Kopfaufprall, sodass in Abb. 3-26 und Abb. 3-27 nur 31 statt 32 Simulationen Gegenstand der Auswertung sind. Der tiefe fahrzeugseitige Anstoßpunkt und die damit verbundene hohe Rotationsgeschwindigkeit des Radfahrers führen zu hohen Kopfaufprallgeschwindigkeiten zwischen 32 und 66 km/h, welche mit 45 km/h den höchsten Durchschnittswert der betrachteten Fahrzeugmodelle ergeben. Der Sportwagen erzielt auch bei den Kopfaufprallwinkeln den höchsten Durchschnittswert ($\bar{\theta}$ 69°), bei einer Spanne von 30° bis 90°. Zudem weist der Sportwagen als einziges Fahrzeug eine fallende Regressionsgerade bei den Kopfaufprallgeschwindigkeiten und -winkeln auf, d.h. mit zunehmender Abwickellänge nehmen die Werte tendenziell ab.

3.6.7 Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit

Eine reduzierte Fahrzeug- bzw. Kollisionsgeschwindigkeit führt innerhalb der Simulationen bei allen Fahrzeugmodellen zu einer Vorverlagerung der Kopfaufprallorte, d.h. die Kopfabwickellängen nehmen mit der Kollisionsgeschwindigkeit ab. Dieser Effekt ist bei Fronten mit einer hohen Haubenvorderkante, wie im Falle des SUV und OneBox-Fahrzeuges, weniger stark ausgeprägt.

Abb. 3-28 veranschaulicht für die verschiedenen Fahrzeug- sowie Radfahrermodelle den Einfluss der Kollisionsgeschwindigkeit auf die Kopfaufprallgeschwindigkeit. Dabei werden alle vier definierten Pedalstellungen (Abb. 3-5) berücksichtigt, sodass pro Radfahrer und Fahrzeug der sich daraus ergebene Durchschnittswert der Kopfaufprallgeschwindigkeit jeweils in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit angegeben wird. Es wird deutlich, dass die durchschnittliche Kopfaufprallgeschwindigkeit für die größeren Radfahrermodelle, also 50%- und 95%-Mann, stets oberhalb der Kollisionsgeschwindigkeit liegt während dies für die kleineren Größen, repräsentiert durch das 6-jährige Kind und die 5%-Frau, abhängig von der Fahrzeugfrontgeometrie ist.

Im Falle des 6-jährigen Kindes ist der Sportwagen das einzige Fahrzeug, wo die durchschnittliche Kopfaufprallgeschwindigkeit die Kollisionsgeschwindigkeit in allen Simulationen übersteigt. Der Grund liegt in dem bereits angeführten tiefen fahrzeugseitigen Anstoßpunkt und der damit verbundenen hohen Rotationsgeschwindigkeit des Radfahrers. Dies ruft für alle Radfahrermodelle hohe Kopfaufprallgeschwindigkeiten hervor. Die 5%-Frau zeigt für 20 und 30 km/h durchschnittliche Kopfaufprallgeschwindigkeiten oberhalb oder gleich der Kollisionsgeschwindigkeit. Betrachtet man hier Kollisionsgeschwindigkeiten von 35 und 40 km/h, so erzielen die Modelle Kompakt und OneBox niedrigere durchschnittliche Kopfaufprallgeschwindigkeiten während Limousine und Sportwagen für alle Simulationen mit der 5%-Frau Werte oberhalb der Kollisionsgeschwindigkeit hervorrufen.

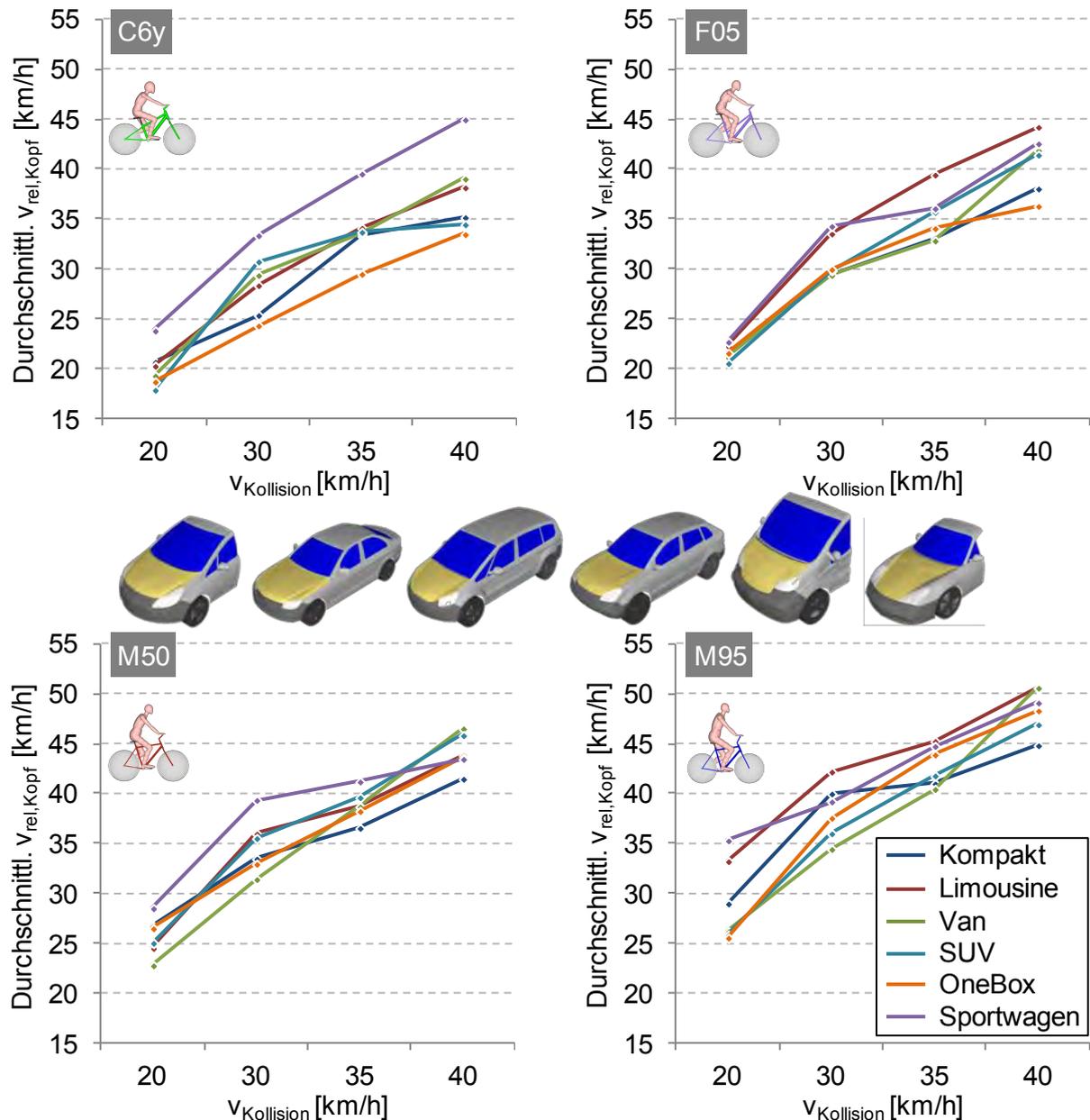


Abb. 3-28: Durchschnittliche Kopfaufprallgeschwindigkeit über der Kollisionsgeschwindigkeit differenziert nach Fahrzeug- & Radfahrermodell (Zentraler Anprall & Eckanprall)

Vor allem für den 50%- und 95%-Mann zeigen die Simulationen mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h, welche ja in Verbindung mit einer rechtwinkligen Anstoßkonstellation auch die Grundlage der Euro NCAP-Prüfungen zum Fußgängerschutz darstellt, sehr hohe durchschnittliche Kopfaufprallgeschwindigkeiten. Schaut man sich die erreichten Maximalwerte für die verschiedenen Fahrzeugmodelle an (Kapitel 3.6.1 bis 3.6.6), so wird offensichtlich, dass das Geschwindigkeitsniveau beim Kopfaufprall eines Radfahrers deutlich höher ausfallen kann als das bestehende Prüfniveau im Fußgängerschutz. Dieser Aspekt ist auch im Rahmen der Weiterentwicklung des Bewertungsverfahrens (Kapitel 4) zu berücksichtigen.

3.6.8 Einfluss der erhöhten Masse eines Pedelecs auf den Primäranprall

Vor dem Hintergrund einer steigenden Relevanz von Pedelecs im Straßenverkehr sind für den 50%-Mann exemplarisch Simulationen zur Untersuchung des Einflusses der erhöhten Masse eines Pedelecs auf den Primäranprall durchgeführt worden. Das zu diesem Zwecke aufgebaute Fahrradmodell zeigt Abb. 3-29.

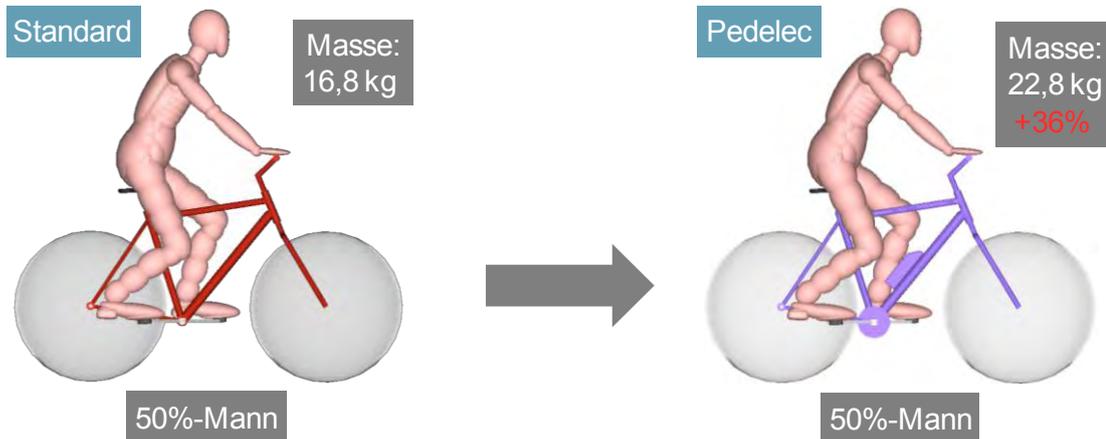


Abb. 3-29: Pedelec-Radfahrermodell für den 50%-Mann

Recherchen und Befragungen lokaler Fahrradhändler in Aachen haben einen Tretlagerantrieb mit einem am Unterrohr angebrachten Akku als relevanteste Pedelec-Konfiguration ergeben, welche für das Simulationsmodell entsprechend umgesetzt wird. Dabei ist für die Antriebseinheit ein Gewicht von 3,5 kg und für den Akku ein Gewicht von 2,5 kg definiert. Die Masse und Schwerpunktlage des Fahrradmodells wird gemäß diesen Vorgaben angepasst, sodass das Pedelec-Modell ein Gewicht von 22,8 kg aufweist und damit 36% schwerer als das Standardfahrradmodell des 50%-Mannes ist. Die Radfahrgeschwindigkeit bleibt unverändert.

Die Simulationsstudie beschränkt sich auf den zentralen rechtwinkligen Anstoß (Abb. 3-7) des 50%-Mannes bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h. Da hierbei alle Pedalstellungen betrachtet werden, ergeben sich insgesamt vier Pedelec-Simulationen pro Fahrzeugmodell. In Abb. 3-30 wird für jedes Fahrzeugmodell jeweils die Konfiguration mit den größten Abweichungen zwischen Standard- und Pedelec-Radfahrermodell überlagert. Dabei repräsentiert der grün eingefärbte Dummy den Standardradfahrer.

In der Regel führt das erhöhte Gewicht des Pedelecs zu etwas geringeren Abwickellängen beim Kopfaufprall. Die Differenz der Kopfaufprallgeschwindigkeiten zwischen Pedelec und Standardfahrrad ist von der Pedalstellung sowie der Fahrzeugfrontgeometrie abhängig. Es gibt sowohl Konstellationen mit erhöhter als auch mit reduzierter Kopfaufprallgeschwindigkeit. Dabei kommen Fälle mit reduzierter Kopfaufprallgeschwindigkeit tendenziell etwas häufiger vor und weisen zudem höhere Differenzbeträge auf. Die deutlichsten Abweichungen ergeben sich hier für die Fahrzeugmodelle Van und OneBox. Insgesamt sind die Unterschiede in der Kinematik bei gleicher Radfahrgeschwindigkeit aber eher gering.

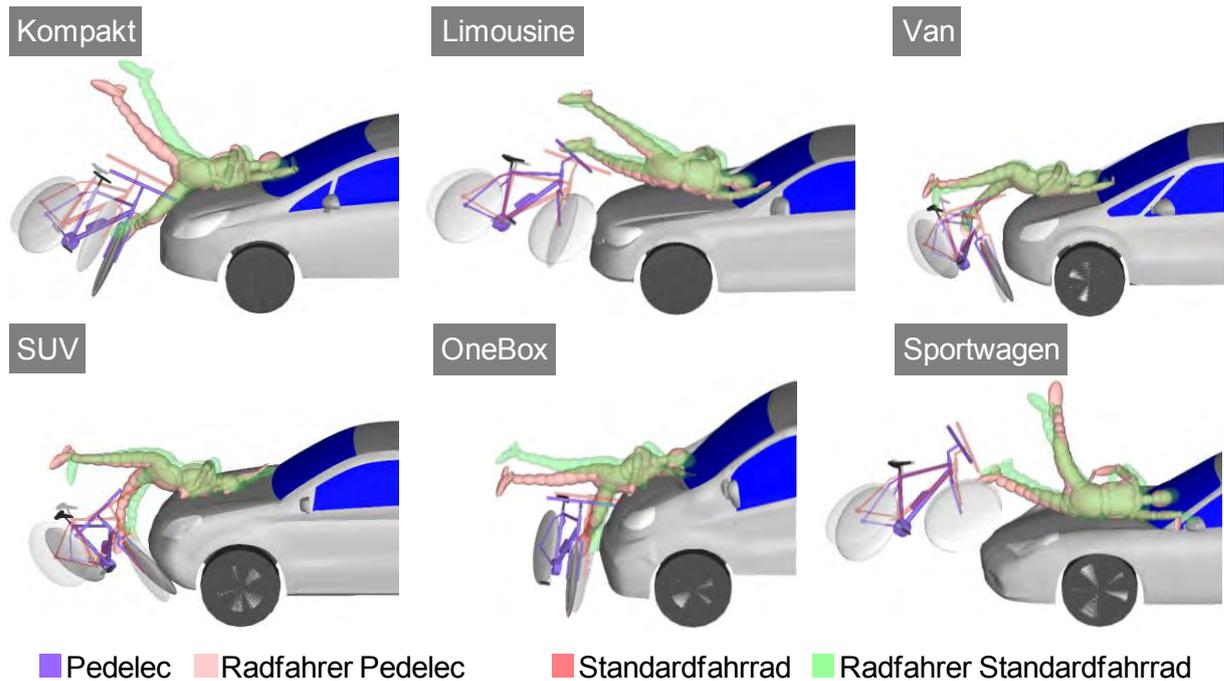


Abb. 3-30: Überlagerung von Standard- und Pedelec-Simulation

3.6.9 Sekundäraufprall

Eine weitere innerhalb des Projektes durchgeführte Simulationsstudie widmet sich dem Sekundäraufprall. Sie beschränkt sich wiederum auf den 50%-Mann, umfasst aber mit 40, 30 und 20 km/h drei Fahrzeuggeschwindigkeiten sowie eine andere Anstoßposition in Quer- bzw. y-Richtung (Abb. 3-31). Diese entspricht etwa der Mitte der beiden zuvor betrachteten Anstoßkonstellationen und ist hinsichtlich der Ausrichtung des Radfahrers identisch. Dadurch soll vor dem Hintergrund der im Rahmen der Studie definierten Fahrzeugverzögerung gewährleistet sein, dass auch für eine Geschwindigkeit von 20 km/h ein primärer Kopfanprall am Fahrzeug stattfindet, der Radfahrer also aufgrund seiner relativ hohen Eigengeschwindigkeit mit dem Kopf nicht bereits jenseits der Front ist.

Simulationsmatrix	
6 Fahrzeugmodelle	Bremsnicken: 1,5°, Verzögerung: 7 m/s ²
1 Radfahrermodell	50%-Mann
1 Anstoßkonstellation	Radfahrer von rechts kreuzend y = -0,5 m
4 Pedalstellungen	Fzgs. Bein unten, oben, vorne & hinten
3 Fahrzeuggeschw.	40 km/h, 30 km/h & 20 km/h
1 Radfahrergeschw.	15 km/h
6 x 1 x 1 x 4 x 3 x 1	72 Simulationen

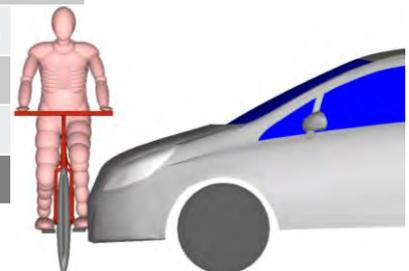


Abb. 3-31: Simulationsmatrix zur Untersuchung des Sekundäraufpralls

Die Definition einer Fahrzeugverzögerung ist zur Untersuchung des Sekundäraufpralls sinnvoll, da hier eine deutlich längere Zeitspanne als in den Simulationen zum Primäranprall abgedeckt werden muss, in der entsprechend von einer Verzögerung des Fahrzeuges, spätestens nach dem Primäranprall, auszugehen ist. Zudem stellt sich so fahrzeugseitig ein nach vorne gerichtetes Abwurfverhalten des Radfahrers ein. Die Höhe der Verzögerung beträgt 7 m/s^2 . Zur Abbildung des Bremsnicken der Front wird diese um $1,5^\circ$ entsprechend der Realunfallrekonstruktion (Kapitel 3.5) geneigt. Diese Konstellation repräsentiert einen Unfall, in dem die Bremsung vor dem Erstkontakt eingeleitet wird. In Abb. 3-32 wird für jedes der sechs Fahrzeugmodelle (Abb. 3-1) die Kinematik des 50%-Mannes bis zum Sekundäraufprall des Kopfes veranschaulicht. Die zugrunde liegende Fahrzeuggeschwindigkeit sowie Pedalstellung sind jeweils einheitlich. Der primäre und sekundäre Kopfaufprall werden mit einem grünen Blitzsymbol markiert.



Abb. 3-32: Kinematik bei $v_{\text{Fzg.}} = 40 \text{ km/h}$ & Pedalstellung fzgs. Bein hinten

Aufgrund seiner Eigengeschwindigkeit von 15 km/h trifft der Radfahrer links vom Fahrzeug auf dem Boden auf. Je nach Frontgeometrie und der damit verbundenen Längswurfweite befindet sich das Fahrzeug zum Zeitpunkt des sekundären Kopfaufpralls hinter oder neben dem Radfahrer. Es zeigt sich zudem ein signifikanter Einfluss der Pedalstellung auf die Sekundäraufprallkinematik.

In Fällen wo der Kopf den ersten Kontakt mit der Fahrbahn hat, liegt die Kopfaufprallgeschwindigkeit in der Regel deutlich über der beim Primäranprall. Ein Drittel der Simulationen

weist einen solchen Erstkontakt des Kopfes beim Sekundäraufprall auf. Selbst bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 20 km/h sind hierbei Aufprallgeschwindigkeiten über 40 km/h möglich. Doch auch ohne Erstkontakt des Kopfes liegen die Kopfaufprallgeschwindigkeiten beim Sekundäraufprall teils deutlich höher als beim Primäranprall. Maximalwerte ergeben sich in Bezug auf eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h für das OneBox-Modell bei Pedalstellung fahrzeugseitiges Bein hinten mit 65 km/h ($v_{\text{Primär}} = 48 \text{ km/h}$) und bei fahrzeugseitigem Bein vorne mit 64 km/h ($v_{\text{Primär}} = 39,5 \text{ km/h}$). Auch das Fahrzeugmodell Kompakt erreicht für die Pedalstellung fahrzeugseitiges Bein hinten eine Kopfaufprallgeschwindigkeit beim Sekundäraufprall von 65 km/h ($v_{\text{Primär}} = 39,8 \text{ km/h}$). Für alle Klassen beträgt der Anteil der Fälle mit einer niedrigeren Kopfaufprallgeschwindigkeit beim Sekundäraufprall aber mindestens ein Viertel. Dabei weisen die Fahrzeuge SUV und Sportwagen die höchsten Anteile auf.

Die Realversuche in Kapitel 5 bestätigen das hohe Verletzungsrisiko beim Sekundäraufprall. Der Dummy weist hier eine deutlich höhere Kopfbelastung als beim Primäranprall auf. Generell bleibt bei den Ergebnissen der vorgestellten Simulationsstudie allerdings zu beachten, dass die Radfahrermodelle für die Untersuchung des Sekundäraufpralls weder ausgelegt noch validiert sind.

3.6.10 Beinanprall

Im Rahmen der Simulationen werden, wie auch später im Versuch, die beim Primäranprall im Bereich des Oberschenkels (Femur) und des Schienbeins (Tibia) auftretenden Beschleunigungen, Kräfte und Momente erfasst. Die Auswertung der Beinbelastungswerte ist dabei zwangsläufig stark von der jeweiligen Messposition am Bein abhängig. Die in der Simulation erzielten Beschleunigungswerte sollten die reale Belastung tendenziell widerspiegeln während Werte bezüglich der Kraft- und Momenteneinwirkung stark von den definierten Steifigkeiten abhängig sind.

Aufgrund der definierten Pedalstellungen und der Interaktion des Radfahrers mit dem Fahrrad ist der Beinanprall des Radfahrers nochmals komplexer als beim Fußgänger. So haben die Pedalstellung, die Höhe der Haubenvorderkante sowie die Höhe des Erstkontaktes, d.h. Erstkontakt unterhalb, oberhalb oder genau auf Höhe des Knies, großen Einfluss auf die jeweiligen Belastungswerte. In Abb. 3-33 werden bezüglich der zentralen rechtwinkligen Anstoßkonstellation (Abb. 3-7) jeweils die Bereiche des Erstkontaktes am fahrzeugseitigen Bein des 50%-Mannes für die verschiedenen Fahrzeugmodelle und Pedalstellungen veranschaulicht. Zusätzlich ist zum Vergleich der Erstkontakt beim entsprechenden Fußgänger für die im Vorgängerprojekt definierte Schrittstellung mit fahrzeugseitigem Bein hinten dargestellt.

Signifikant ist auch der Einfluss des Fahrrads, wiederum in Abhängigkeit der Pedalstellung und Fahrzeuggeometrie. So werden die Höchstwerte für Tibia-Beschleunigung, Kraft und Biegemoment oftmals nicht beim Erstkontakt mit der Fahrzeugfront erreicht, sondern beim unmittelbar folgenden Kontakt mit dem Fahrrad, welches beim 50%-Mann eine Masse von 16,8 kg aufweist. Dies ist für die Tibia-Beschleunigung vor allem bei der Pedalstellung fahr-

zeugseitiges Bein unten der Fall. Bei der resultierenden Kraft gilt dies sogar für drei Pedalstellungen (fahrzeugseitiges Bein unten, oben und hinten), bezüglich des Biegemoments in erster Linie für fahrzeugseitiges Bein oben.

Erstkontakt	Zentraler rechtwinkliger Anprall				
	Fzgs. Bein unten	Fzgs. Bein oben	Fzgs. Bein vorne	Fzgs. Bein hinten	Fußgänger
Kompakt					
Limousine					
Van					
SUV					
OneBox					
Sportwagen					

Abb. 3-33: Erstkontakt am fahrzeugseitigen Bein des 50%-Mannes in Abhängigkeit von Pedalstellung & Fahrzeugfront (übrige Körperregionen & Fahrrad ausgeblendet)

4 Anpassung der Bewertungsmethodik

Das im Vorgängerprojekt erarbeitete Bewertungsverfahren zeichnet sich durch einen modularen Aufbau aus, welcher hinsichtlich der zur Bewertung herangezogenen Eingangsgrößen gegliedert ist. Generell können die einzelnen Module unabhängig voneinander weiterentwickelt oder ausgetauscht werden, wodurch das Verfahren jederzeit an aktuelle Entwicklungen bzw. neue Daten anpassbar ist. Diese Eigenschaft wurde sich im Rahmen des aktuellen Projektes zunutze gemacht, indem die einzelnen Module sowohl hinsichtlich der zugrunde liegenden Daten als auch hinsichtlich der Bewertung von Radfahrern aktualisiert bzw. erweitert und angepasst worden sind. Die einzelnen Anpassungen werden im Folgenden beschrieben.

4.1 Module & Anpassungen

Da für die Anwendung des Bewertungsverfahrens verschiedene Eingangsgrößen zur Charakterisierung der Fahrzeugeigenschaften erforderlich sind, erfolgt eine Gliederung in einen fahrzeugspezifischen sowie einen Bewertungsteil, welche jeweils drei Module umfassen (Abb. 4-1).

1	Fahrzeug-Einordnung & Einteilung	Fahrzeug- eigenschaften
2	Simulation & Unfallkinematik	
3	Struktureigenschaften & crashaktive Systeme	
4	Gewichtung & Anpassung der Struktureigenschaften	Bewertung
5	Indexberechnung	
6	Bewertung von Systemen der aktiven Sicherheit	

Abb. 4-1: Module des Bewertungsverfahrens

Die einzelnen Module des Bewertungsverfahrens können weitestgehend unabhängig voneinander weiterentwickelt oder ausgetauscht werden. Die Module des Bewertungsteils bauen jeweils aufeinander auf und greifen dabei auf die Daten der fahrzeugspezifischen Module zurück.

4.1.1 Übersicht

Die Module sind Bestandteil einer Bewertungsmethodik, welche in Abb. 4-2 veranschaulicht wird. Zur Gewährleistung einer integrierten Bewertung durchlaufen sowohl Maßnahmen der passiven als auch der aktiven Sicherheit den gleichen Prozess, was in Abb. 4-2 entsprechend durch die grau und blau gefärbten Pfeile angedeutet wird. Dadurch lassen sich sämtliche fahrzeugseitigen Maßnahmen auf einer gemeinsamen Skala bewerten. Das Kriterium zur Bewertung aktiver Systeme ist dabei die erreichbare Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit und die damit verbundene Änderung der Unfallkinematik. Die gestrichelten orangen Pfeile verdeutlichen die generelle Abfolge im fahrzeugspezifischen Bewertungsteil. In

Abb. 4-2 ist die Radfahrerschutzbewertungsmethodik dargestellt, die im Fokus dieses Projektes steht. Die Bewertung des Fußgängerschutzes erfolgt analog, aber mit entsprechend anderer Datenbasis, welche auf den Arbeiten im Vorgängerprojekt beruht. Alle in den weiteren Kapiteln beschriebenen Anpassungen innerhalb der Module werden in gleicherweise auch auf das Fußgängerschutzverfahren appliziert, sodass am Ende vergleichbare Indexwerte für beide Gruppen berechnet werden können (Kapitel 4.2 und Kapitel 4.3).

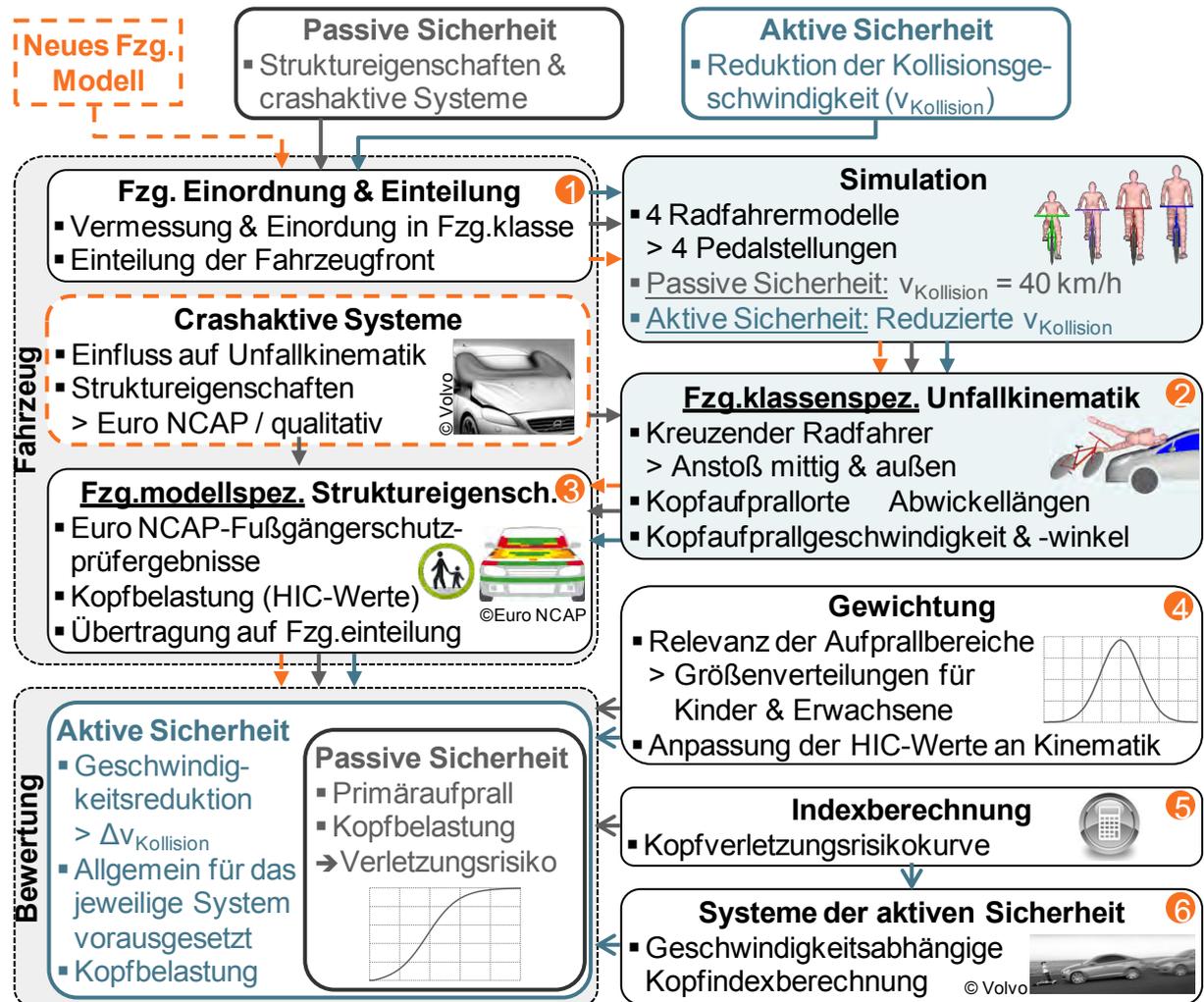


Abb. 4-2: Bewertungsmethodik zum Radfahrerschutz

Der fahrzeugspezifische Bewertungsteil beginnt mit Modul 1 und der Einordnung eines neuen Fahrzeugmodells in eine der sechs Fahrzeugklassen aus [HAM10], welche jeweils durch die sechs generischen Modelle in Abb. 3-1 repräsentiert werden. Zur Charakterisierung wichtiger Eingangsgrößen des Bewertungsverfahrens, wie Struktureigenschaften, Aufwurfverhalten und Kopfanprallkinematik, ist eine Einteilung der jeweiligen Frontgeometrien in definierte Bereiche notwendig. Die Fahrzeugfronteinteilung bildet die Ausgangsbasis der Bewertung und muss somit kompatibel zu den Eingangsdaten in den nachfolgenden Modulen sein. Dort werden die entsprechenden Werte jeweils für jedes Feld der Einteilung bestimmt. Den Anfang macht die Radfahrerkinematik in Modul 2.

Im Rahmen des Bewertungsverfahrens erfolgt die Berücksichtigung der Unfallkinematik fahrzeugklassenspezifisch, d.h. dass für jede Klasse die Kinematik des zugehörigen generischen Fahrzeugmodells hinterlegt ist. Dies ermöglicht eine einfache und schnelle Anwendung des Verfahrens, ohne dass auf externe Hilfe bzw. Daten zurückgegriffen werden muss. Auf Basis der in Kapitel 3 vorgestellten Simulationsdaten werden den einzelnen Feldern verschiedene Kinematikparameter, wie beispielsweise die Kopfaufprallgeschwindigkeit, zugeordnet. Aspekte der aktiven Sicherheit werden durch die Simulationen mit reduzierter Kollisionsgeschwindigkeit berücksichtigt. Da die Bewertung getrennt für Kinder und Erwachsene erfolgt, decken die verwendeten Radfahrermodelle (Kapitel 3.1.2) ein entsprechend breites Größenspektrum ab.

Die Euro NCAP-Fußgängerschutzprüfergebnisse zum Kopfanprall bilden die Eingangsgrößen im Modul 3. Hier werden die HIC-Werte aus den Kopfanpralltests auf die Fahrzeug-einteilung übertragen, sodass für alle Felder neben den relevanten Kinematikparametern auch die zugehörigen Struktureigenschaften vorliegen. Eine Ausstattung des zu bewertenden Fahrzeuges mit einem crashaktiven System, wie beispielsweise einer aktiven Haube, spiegelt sich sowohl in den Struktureigenschaften als auch, aufgrund der entsprechenden Simulationen (Kapitel 3.1.3), in den Kinematikparametern wider und wird durch das Verfahren somit umfassend berücksichtigt.

Nach Ermittlung aller notwendigen fahrzeugspezifischen Daten wird in den folgenden drei Modulen die eigentliche Bewertung durchgeführt. In Modul 4 werden die einzelnen Aufprallbereiche mittels entsprechender Faktoren hinsichtlich ihrer Relevanz gewichtet, sodass neben der Struktureigenschaft eines Fahrzeugfeldes auch die generelle Wahrscheinlichkeit für einen Kopfaufprall des Radfahrers in die Bewertung einfließt. Die Aufprallkinematik findet Berücksichtigung, indem die seitens Euro NCAP unter standardisierten Bedingungen ermittelten HIC-Werte, wiederum über Faktoren, gezielt an die fahrzeugklassenspezifischen Unfallkinematik aus der Simulation angepasst werden.

Die eigentliche Indexberechnung erfolgt dann in Modul 5. Hier wird auf Basis einer Risikofunktion die Wahrscheinlichkeit einer schweren Kopfverletzung mittels eines Indexwertes berechnet. In diese Berechnung fließen sämtliche Daten aus den vorangegangenen Modulen mit ein. Zur Bewertung von Systemen der aktiven Sicherheit (Modul 6) wird keine separate Bewertungsmethodik verwendet, vielmehr werden die Kopfindexwerte geschwindigkeitsabhängig berechnet. Die genauen Systemspezifikationen sind dabei irrelevant. Es wird eine allgemein für das jeweilige aktive System vorausgesetzte Geschwindigkeitsreduktion bewertet. Im Folgenden werden die einzelnen Module und die dort vorgenommenen Änderungen und Anpassungen am Beispiel eines aktuellen Fahrzeuges der Klasse Kompakt näher beschrieben.

4.1.2 Fahrzeug-Einordnung & Einteilung

Die sechs verwendeten Fahrzeugklassen dienen zur Abgrenzung der verschiedenen Frontgeometrien und repräsentieren generelle, klassenspezifische Unfallkinematiken. Die Einordnung eines zu bewertenden Fahrzeuges in die zugehörige Klasse erfolgt über ein Excel-Tool

und bestimmt, welche Simulationsdaten im nächsten Modul zur Unfallkinematik für die Bewertung herangezogen werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, im Vorfeld fahrzeugmodellspezifische Simulationen durchzuführen, sodass auf die Verwendung klassenspezifischer Daten verzichtet werden kann. Dies würde allerdings den Bewertungsaufwand erhöhen.

Zur Charakterisierung wichtiger Eingangsgrößen des Bewertungsverfahrens, wie Struktureigenschaften oder Aufwurfverhalten, ist eine Einteilung der jeweiligen Frontgeometrien in definierte Bereiche notwendig. Die Nutzung von Euro NCAP-Daten stellt dabei einen zentralen Bestandteil des Bewertungsverfahrens dar. Im Zuge der seitens Euro NCAP im Februar 2013 erfolgten Einführung des sogenannten Grid-Ansatzes, welcher auch den Übergang zu einer 5-Farben-Skala beinhaltet, ist zur Bewertung aktueller Fahrzeuge eine entsprechende Anpassung der Fahrzeugeinteilung notwendig. Der Grid-Ansatz sieht vor, dass die Wahl der Prüfpunktkoordinaten nicht mehr durch das Prüflabor erfolgt, sondern anhand eines festen, rasterförmigen Gitters innerhalb des bestehenden Prüfbereichs.

Die einzelnen Punkte liegen jeweils 100 mm auseinander, sodass auch der diagonale Abstand mit 141 mm unterhalb des Impaktordurchmessers von 165 mm liegt. Mittels dieser engen Rasterung können sämtliche kritische Punkte der Fahrzeugfront erfasst werden. Zudem werden zusätzlich zu den zuvor bestehenden Grenzen bei HIC gleich 1000 und 1350 zwei weitere Grenzwerte bei HIC gleich 650 sowie 1700 eingeführt, sodass sich insgesamt fünf Farbbereiche (grün, gelb, orange, braun und rot) für die Fußgängerschutzbewertung ergeben. Um den Prüfaufwand und die hiermit verbundenen Kosten nicht zu erhöhen, verpflichten sich die Fahrzeughersteller im Vorfeld der Prüfungen, jedem Anprallpunkt auf Basis eigener Untersuchungen eine der fünf Kennfarben zuzuweisen. Somit kommt es hier mit Hinblick auf die Struktureigenschaften zu einer deutlichen Verbesserung der Datenbasis, welche auch hinsichtlich der Fahrzeugeinteilung eine genauere Abbildung erfordert.

So erhöht sich die Anzahl der WAD-Streifen von zuvor 10 auf nun 13, wie in Abb. 4-3 für das generische Modell der Klasse Kompakt veranschaulicht wird. Dies ist eine Folge der Anpassung der Breite der WAD-Streifen an die Grid-Rasterung von 100 mm. Dies betrifft die WAD-Streifen 1 bis 11 innerhalb des durch Euro NCAP abgedeckten Prüfbereichs, welcher mit der WAD 2100 mm endet.

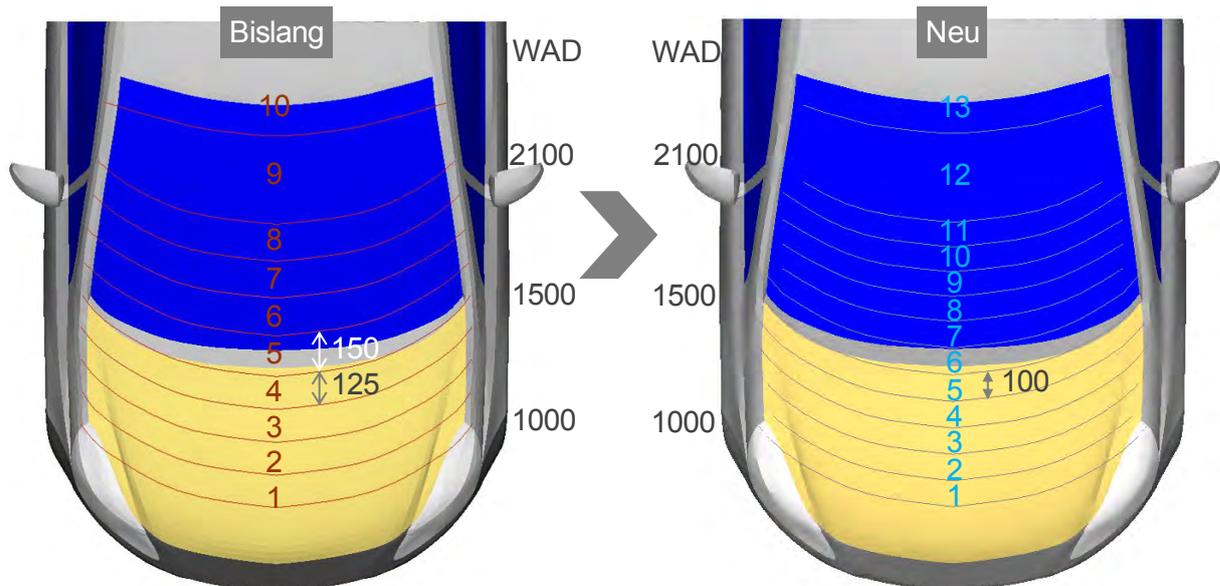


Abb. 4-3: Anpassung der Fahrzeugfronteinteilung im Vergleich zum Vorgängerprojekt

Für die Abbildung aller relevanten Aufprallbereiche ist, gerade vor dem Hintergrund der Simulationsergebnisse zur Radfahrerkinematik, eine Ausdehnung der Fahrzeugfronteinteilung über den Euro NCAP-Prüfbereich hinaus notwendig. Da diese jedoch im Vorgängerprojekt bereits bis zum vorderen Dachbereich ausgelegt worden ist, sind hinsichtlich der Ausdehnung keine weiteren Anpassungen erforderlich. Nachwievor werden jenseits der WAD 2100-Linie zwei zusätzliche Bereiche in Abhängigkeit von der Frontgeometrie definiert. Bereich 12 verläuft dabei bis zum oberen Windschutzscheibenrahmen und deckt somit den durch die Euro NCAP-Einteilung nicht berücksichtigten Teil der Windschutzscheibe ab. Hier kann von einem weitestgehend homogenen Strukturverhalten ausgegangen werden, was eine geometriebasierte Definition des Bereichs rechtfertigt. Der obere Windschutzscheibenrahmen wird aufgrund seiner deutlich höheren Steifigkeit dem Bereich der Dachvorderkante (Bereich 13) zugeschrieben. Die Breite des Windschutzscheibenrahmens wird mit 120 mm einheitlich vorgegeben. Der Abstand von Bereich 12 zur Dachvorderkante ist somit für jede Fahrzeuggeometrie identisch. Quer zur Fahrzeugrichtung orientiert sich die Fahrzeugfronteinteilung an der jeweiligen Anzahl der Grid-Punkte, was in Kapitel 4.1.4 näher ausgeführt wird.

4.1.3 Fahrzeugklassenspezifische Unfallkinematik

Aufgabe des Moduls „Simulation und Unfallkinematik“ ist die Bereitstellung aller notwendigen kinematischen Eingangsgrößen für das Bewertungsverfahren. Dazu zählen die Kopfaufprallwahrscheinlichkeiten sowie die durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeiten und -winkel der einzelnen WAD-Bereiche. Diese Werte gehen für alle generischen Modelle aus den in Kapitel 3 beschriebenen Simulationen hervor und sind, gegliedert in die Gruppe der Kinder und die Gruppe der Erwachsenen, in den entsprechenden Excel-Tools zur Fahrzeugbewertung (Kapitel 4.1.6.1) hinterlegt.

In Abb. 4-4 sind für das generische Fahrzeugmodell der Klasse Kompakt und einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h die kinematischen Eingangsdaten des Bewertungsverfahrens zusammenfassend dargestellt. Diese werden bei der späteren Bewertung entsprechend auch dem betrachteten Beispielfahrzeug zugewiesen.

Radfahrer	Zentraler Anprall & Eckanprall, alle Pedalstellungen				Mittelwerte		
	h [m]	WAD-Bereich [mm]			Aufwurffaktor f_a	v_k [km/h]	w_k [°]
6j Kind	1,17	1080	1314	1500	1,12	35,1	51,0
5%-Frau	1,53	1490	1889	2085	1,23	38,0	54,1
50%-Mann	1,74	1795	2101	2350	1,21	41,5	65,9
95%-Mann	1,91	2040	2415	2760	1,26	44,8	75,0
		min	Ø	max	Dach	40,0	69,0

Abb. 4-4: Kinematische Eingangsdaten der Fahrzeugklasse Kompakt für $v = 40$ km/h

Die in Abb. 4-4 aufgeführten Werte dienen als Stützstellen zur Herleitung des Aufwurfverhaltens sowie zur Abbildung der durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeit und des durchschnittlichen Kopfaufprallwinkels über der gesamten Fahrzeugfront. Hinsichtlich des Aufwurfverhaltens wird für jedes Radfahrermodell zunächst ein sogenannter Aufwurffaktor f_a ermittelt. Dieser beschreibt das Verhältnis aus Aufwurfweite und Körpergröße. Die Aufwurfweite eines Radfahrermodells ist dabei als Mittelwert des in den Simulationen abgedeckten WAD-Bereichs definiert, sodass sich die Berechnung des Aufwurffaktors nach Gl. 4-1 ergibt.

$$f_a = \frac{WAD_{\emptyset}}{h} \quad \text{Gl. 4-1}$$

Die Definition von Durchschnittswerten für Kopfaufprallgeschwindigkeit und -winkel als Bewertungsgrundlage für die Kopfbelastung stellt eine Anpassung im Zuge der Ergebnisse der Radfahrersimulationen dar. Diese zeigen im Vergleich zu den Fußgängersimulationen aus dem Vorgängerprojekt deutlich höhere Kopfaufprallgeschwindigkeiten, sodass im Rahmen der Bewertung fortan die Mittelwerte anstelle der zuvor verwendeten Maximalwerte für Kopfaufprallgeschwindigkeit und -winkel herangezogen werden. Dies ist mit Hinblick auf die spätere Verletzungsrisikobewertung sinnvoller. Da sämtliche Anpassungen, wie eingangs bereits angeführt, sowohl auf das Radfahrer- als auch auf das Fußgängerschutzbewertungsverfahren angewendet werden, wird der Fußgängerindex zukünftig niedriger ausfallen. Das bedeutet gleichzeitig auch, dass Indexwerte nach dem alten Verfahren nicht mit den Werten des überarbeiteten Verfahrens vergleichbar sind, zumal weitere Anpassungen folgen werden.

Beim 95%-Mann, aber auch im Falle des 50%-Mannes, kann es je nach Fahrzeug vor allem in der Eckanprallkonstellation zu einem Aufprall des Kopfes im Dachbereich, also im Bereich 13 der Fahrzeugeinteilung, kommen (Kapitel 3.6). Für diesen niedrig frequentierten Bereich wird jeweils der Maximalwert für Kopfaufprallgeschwindigkeit und -winkel, unabhängig vom Radfahrermodell, dokumentiert. Diese Werte bilden eine zusätzliche Stützstelle für die im Folgenden vorgestellte Darstellung der Kinematikwerte über der Abwickellänge.

Aus den Simulationsdaten ist der Aufwurffaktor für diskrete Radfahrergrößen bekannt. Über diese Stützstellen kann mittels einer Ausgleichskurve ein funktionaler Zusammenhang zwischen Aufwurffaktor und Körpergröße hergeleitet werden, der eine vollständige Beschreibung des Aufwurfverhaltens erlaubt. Abb. 4-5 verdeutlicht dies für das generische Fahrzeugmodell der Klasse Kompakt bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 40 km/h. Die grünen Karos markieren dabei die in Abb. 4-4 aufgeführten Aufwurffaktoren der vier Radfahrergrößen, auf deren Basis die Ausgleichskurve erstellt wird. Die zugrunde liegende Funktionsvorschrift ermöglicht die Darstellung der Aufwurfweite über der Körpergröße (Abb. 4-6) und charakterisiert damit das Aufwurfverhalten des generischen Fahrzeugmodells.

Für Körpergrößen jenseits der 1,91 m des 95%-Mannes wird der zugehörige Aufwurffaktor aus dem Maximum aus Funktionswert und Aufwurffaktor des 95%-Mannes bestimmt. Dadurch wird verhindert, dass bei einer Ausgleichskurve, die aufgrund der Lage der Stützstellen einen negativen Gradienten für Körpergrößen in diesem Bereich aufweist, die zugehörigen Beträge der Aufwurffaktoren entsprechend abnehmen. Im vorliegenden Fall wäre dies ab einer Körpergröße von 2 m der Fall. Da die Ausgleichskurve unterhalb der vierten Stützstelle verläuft, greift die Definition bereits hier, sodass ab 1,91 m ein konstanter Aufwurffaktor von 1,26 verwendet wird, was den leichten Knick im Kurvenverlauf von Abb. 4-6 hervorruft.

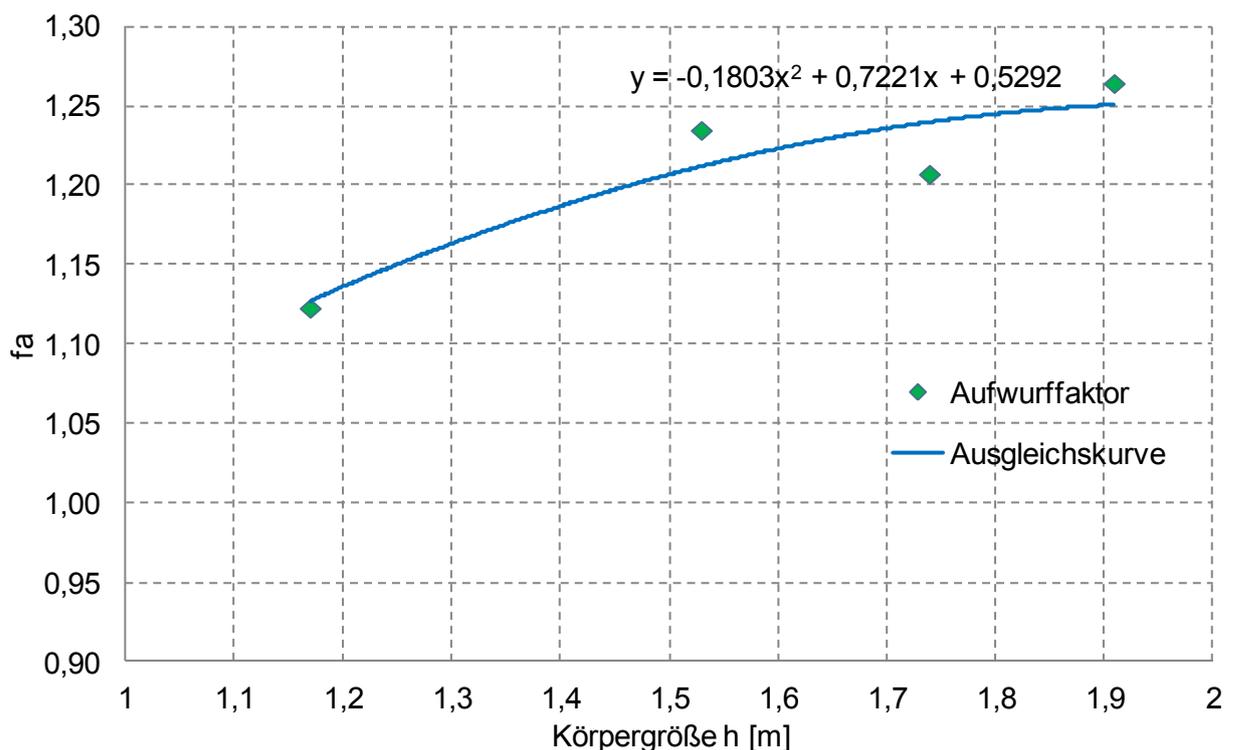


Abb. 4-5: Aufwurffaktor f_a in Abhängigkeit der Körpergröße (Kompakt, $v = 40$ km/h)

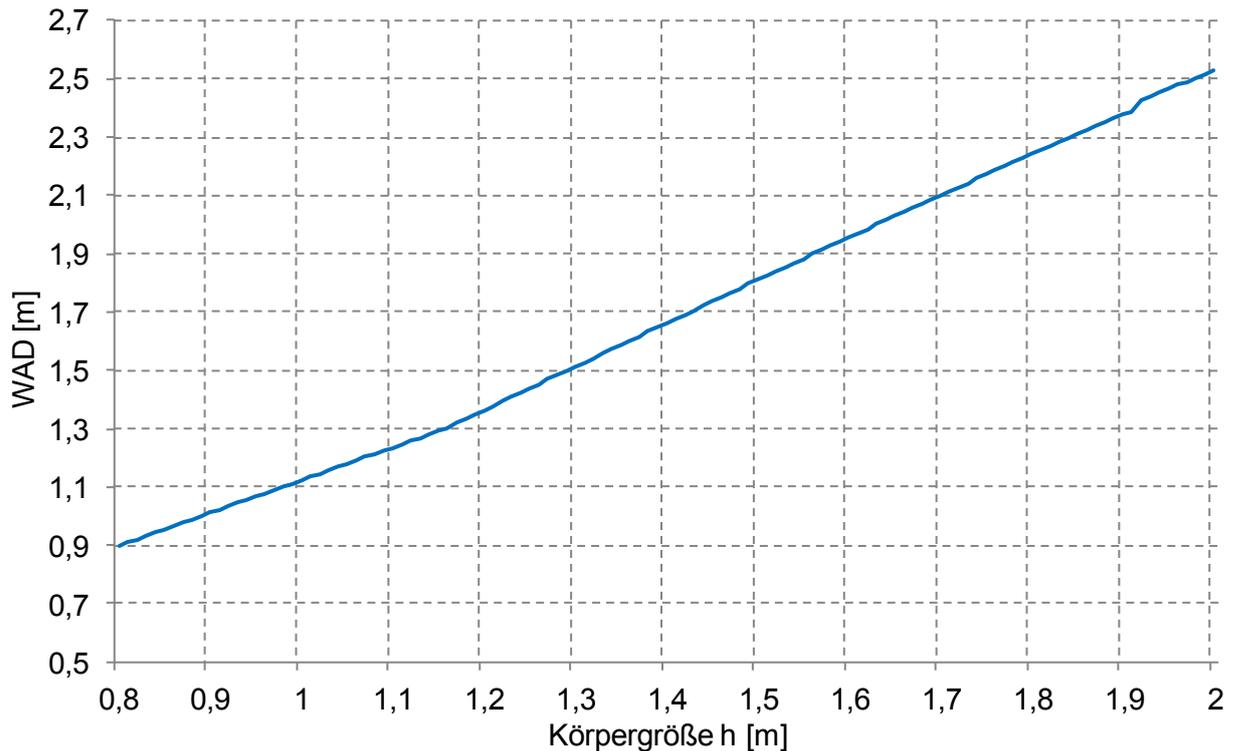


Abb. 4-6: Zusammenhang zwischen Körpergröße und Aufwurfweite (Kompakt, $v = 40$ km/h)

Die Generierung der Ausgleichskurve sowie die Multiplikation der Radfahrergrößenwerte mit den entsprechenden Aufwurffaktoren erfolgt im Rahmen der Simulationsauswertung automatisiert. Für den Anwender des Bewertungsverfahrens sind diese Aspekte, wie auch die weiteren Schritte innerhalb dieses Kapitels, nicht relevant, da sämtliche Daten bereits in den Excel-Tools zur Fahrzeugbewertung hinterlegt sind.

Für die Definition von Aufprallwahrscheinlichkeiten ist eine reine Auswertung der Kopfaufprallorte nicht zielführend. Die Simulationsdaten liefern aufgrund der vier berücksichtigten Radfahrergrößen nur eine diskrete Verteilung, welche einzelne WAD-Bereiche überproportional hervorhebt. Zudem berücksichtigt ein solcher Ansatz nicht die Relevanz der einzelnen Radfahrergrößen im realen Unfallgeschehen, da für jedes Radfahrermodell die gleiche Anzahl an Simulationen durchgeführt wird. Die Bestimmung der Aufprallwahrscheinlichkeiten erfolgt im Rahmen des Bewertungsverfahrens vielmehr durch Kombination des Aufwurfverhaltens mit einer Größenverteilung, welche jeder Körpergröße eine entsprechende Relevanz zuweist. Mit Hilfe des ermittelten kinematischen Zusammenhangs zwischen Körpergröße und WAD lässt sich diese auf die Anprallbereiche des generischen Modells übertragen und schafft gleichzeitig eine Schnittstelle zum realen Unfallgeschehen. Diesbezüglich werden im Zuge der Anpassungen am Bewertungsverfahren auch die Daten zur Größenverteilung von Fußgängern überarbeitet.

Für beide betrachteten Radfahrergruppen, d.h. Kinder und Erwachsene, wird jeweils eine separate Größennormalverteilung verwendet. Wie im Vorgängerprojekt werden das 6-jährige Kind und die 5%-Frau der Gruppe der Kinder zugeordnet, während der 50%- und 95%-Mann

die Gruppe der Erwachsenen abbilden. Eine Normalverteilung ist über den Erwartungswert und die Standardabweichung eindeutig definiert. Diese Werte basieren für beide Gruppen auf einer entsprechenden Auswertung der GIDAS-Datenbank, welche seitens der BAST für dieses Projekt durchgeführt worden ist.

Die Radfahrergrößenverteilung für die Gruppe der Kinder ist samt entsprechender Relevanzen in Abb. 4-7 dargestellt. Es ergibt sich ein Erwartungswert von 1,46 m, was nahe der Körpergröße der 5%-Frau (1,53 m) liegt. Derweil repräsentiert das Radfahrermodell des 6-jährigen Kindes mit einer Körpergröße von 1,17 m das untere Spektrum der Gruppe.

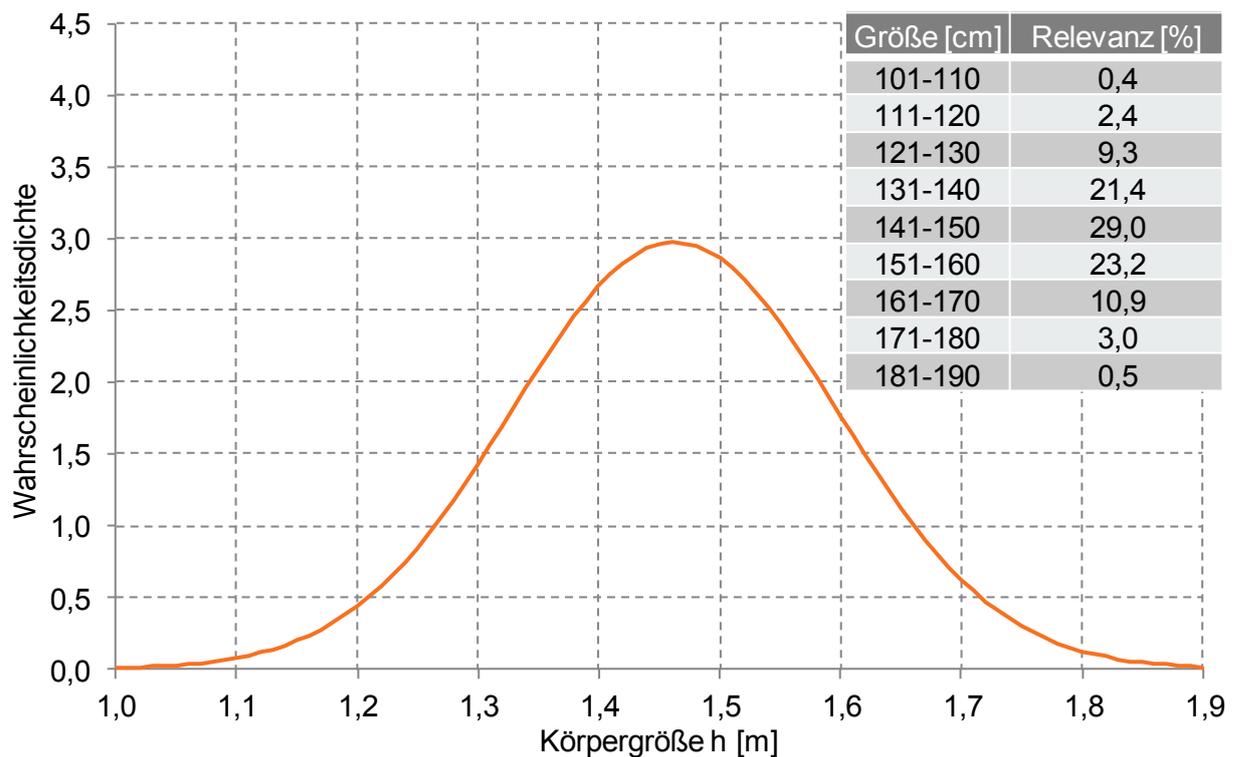


Abb. 4-7: GIDAS-Radfahrergrößenverteilung Kinder (6 - 12 Jahre, $n = 212$) [GID14]

Die Größennormalverteilung der Erwachsenen geht zusammen mit den Anteilen der jeweiligen Größenintervalle aus Abb. 4-8 hervor. Dabei beträgt der Erwartungswert 1,73 m und entspricht damit der Körpergröße des 50%-Mannes (1,74 m). Zwangsläufig ergibt sich eine gewisse Überschneidung mit dem Größenbereich der Kinder, sodass die Radfahrermodelle des 50%-Mannes und des 95%-Mannes (1,91 m) zusammen mit der 5%-Frau das Erwachsenenspektrum vollständig repräsentieren.

Im Vorgängerprojekt beruhen die Fußgängergrößenverteilungen für die Gruppe der Kinder auf Daten aus [FLÜ86] bzw. für die Gruppe der Erwachsenen auf der DIN-Norm 33402. Diese werden im Zuge der Anpassungen durch fußgängerspezifische GIDAS-Größenverteilungen ersetzt, welche auf einer für [HAM14] durchgeführten GIDAS-Auswertung beruhen und die in [HAM13] veröffentlicht wurden. Die entsprechenden Kurven sind in Kapitel 9.8 des Anhangs samt Relevanzen der Größenintervalle aufgeführt.

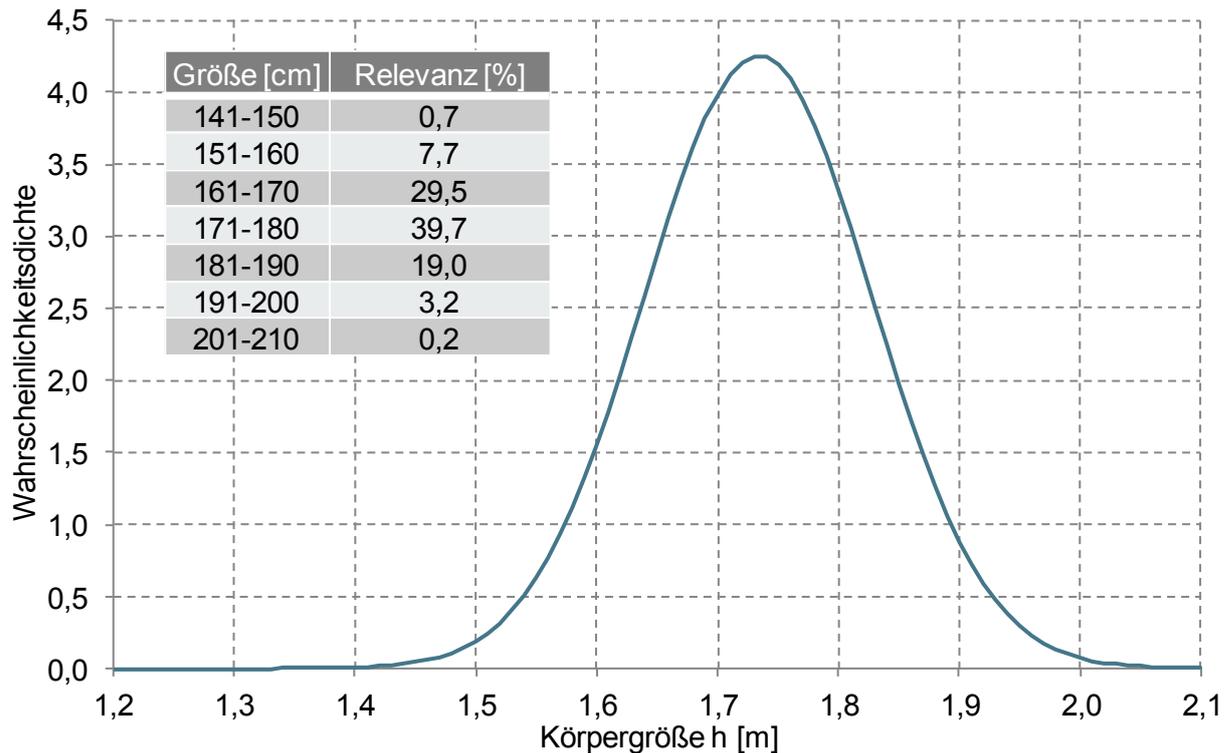
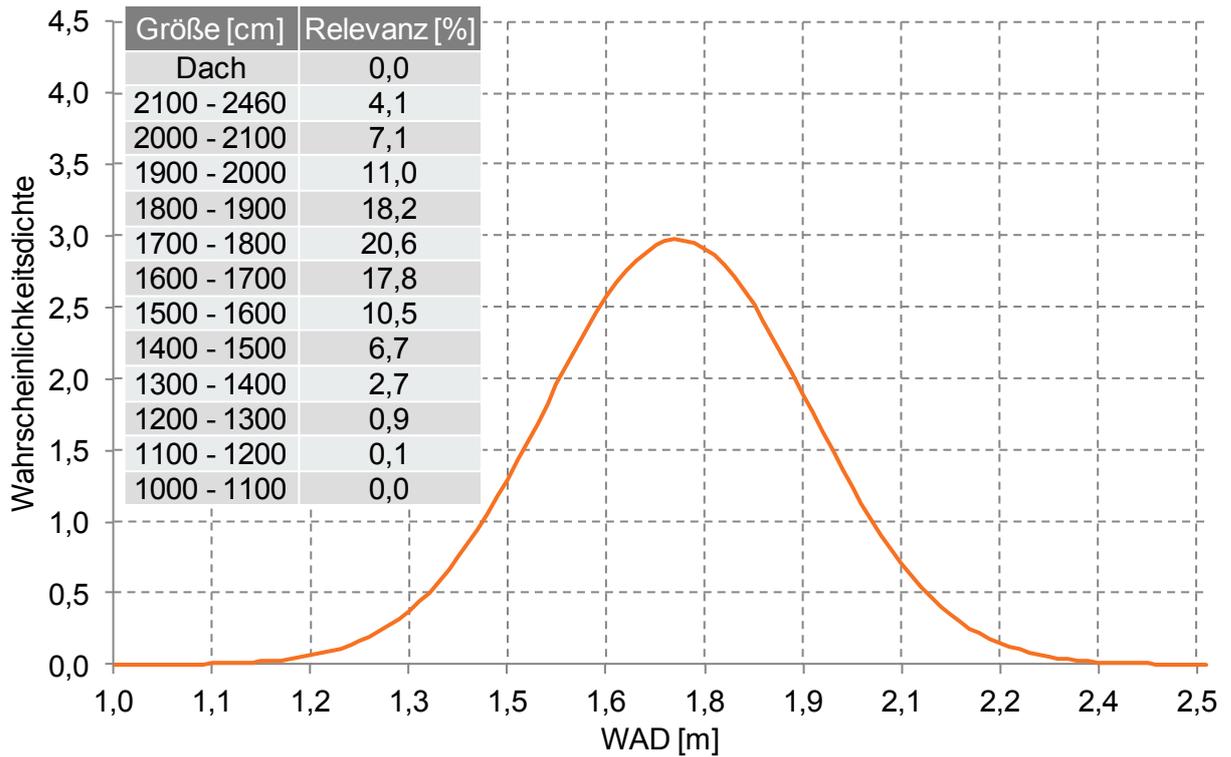
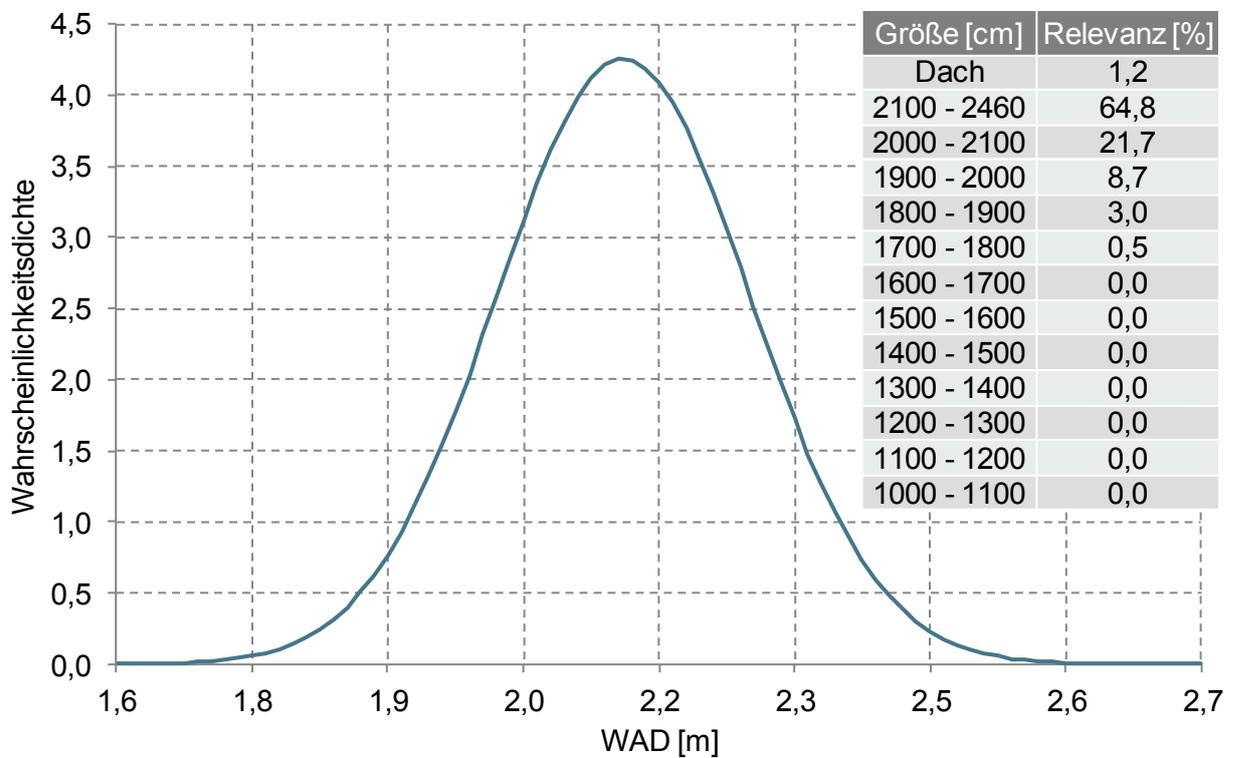


Abb. 4-8: GIDAS-Radfahrergrößenverteilung Erwachsene (14 - 65 Jahre, n = 2063) [GID14]

Zur Bestimmung der Relevanz der einzelnen WAD-Bereiche werden die Radfahrergrößenverteilungen mittels des ermittelten Aufwurfverhaltens (Abb. 4-6) in WAD-Verteilungen überführt. Dies erfolgt durch Multiplikation der Abszissenwerte (Körpergrößen) mit dem entsprechenden Aufwurffaktor. Da dieser mit der Körpergröße zunimmt, vergrößert sich entsprechend auch das Werteintervall und die Werte sind nicht mehr normalverteilt. Abb. 4-9 zeigt die abwickellängenbezogene Verteilung der Kinder für das generische Fahrzeugmodell der Klasse Kompakt bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 40 km/h. Die Relevanzen für die einzelnen Intervalle der Fahrzeugeinteilung ergeben sich durch Aufsummierung der zugehörigen Ordinatenwerte und geben die Aufprallwahrscheinlichkeiten für das Fahrzeug in Längsrichtung wieder. Es wird deutlich, dass selbst für die Kinder die vorderen WAD-Bereiche der Fahrzeugeinteilung hier aufgrund des ausgeprägten Aufwurfverhaltens nicht relevant sind. Vielmehr liegen die relevantesten WAD-Streifen im unteren Windschutzscheibenbereich (vgl. Abb. 4-3 rechts).

Die WAD-Verteilung für die Gruppe der Erwachsenen ist in Abb. 4-10 samt den Relevanzen der einzelnen WAD-Streifen dargestellt. Für die Erwachsenen haben demnach Haube- und Windlaufbereich keine Relevanz. Diese kommen fast ausschließlich im mittleren und oberen Windschutzscheibenbereich auf. Zudem wird deutlich, dass für das betrachtete Fahrzeug mit 66% der Großteil der Erwachsenen außerhalb des Euro NCAP-Kopfprüfbereichs auftritt, d.h. jenseits einer WAD von 2100 mm, und somit nicht durch entsprechende passive Schutzmaßnahmen adressiert wird. Dazu zählt auch der vordere Dachbereich, welcher hier eine Relevanz von 1,2% aufweist.

Abb. 4-9: Relevanz der WAD-Bereiche für die Gruppe der Kinder (Kompakt, $v = 40$ km/h)Abb. 4-10: Relevanz WAD-Bereiche für Gruppe der Erwachsenen (Kompakt, $v = 40$ km/h)

Die Auswertung der Simulationsergebnisse liefert neben den Kopfaufprallbereichen pro Radfahrermodell jeweils auch die Mittelwerte der Kopfaufprallgeschwindigkeit sowie des Kopfauf-

prallwinkels (Abb. 4-4). Die zugehörigen Radfahrer Körpergrößen lassen sich durch Multiplikation mit dem jeweiligen Aufwurffaktor in entsprechende Abwickellängen überführen. Mittels linearer Interpolation zwischen diesen Stützstellen erfolgt dann die Darstellung der beiden Kinematikparameter über der Abwickellänge. Abb. 4-11 und Abb. 4-12 veranschaulichen die entsprechenden Verläufe für das generische Fahrzeugmodell der Klasse Kompakt. Sowohl die durchschnittliche Kopfaufprallgeschwindigkeit als auch der durchschnittliche Kopfaufprallwinkel nehmen hier über der Abwickellänge zu.

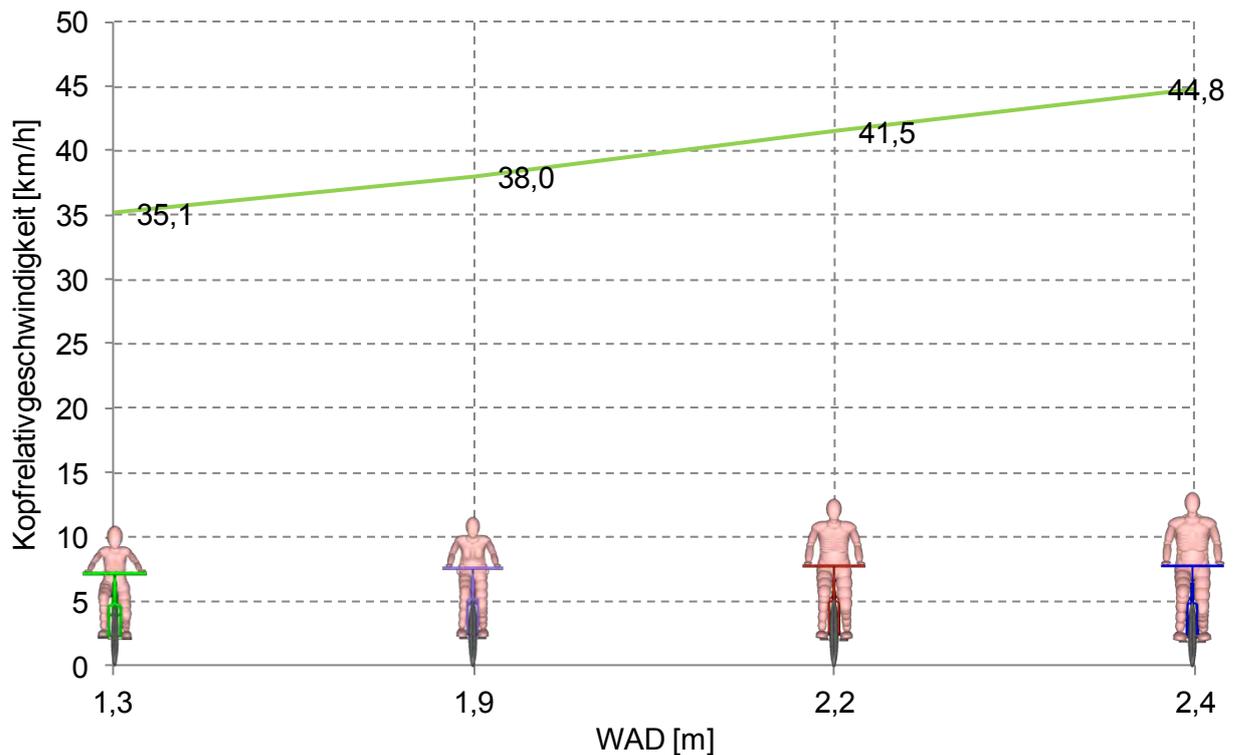


Abb. 4-11: Durchschnittliche Kopfaufprallgeschw. über Abwickellänge (Kompakt, $v = 40$ km/h)

Mithilfe der ermittelten Verläufe können jedem WAD-Bereich der Fahrzeugeinteilung eine durchschnittliche Kopfaufprallgeschwindigkeit sowie ein durchschnittlicher Kopfaufprallwinkel zugewiesen werden. Für die entsprechenden Interpolationen wird jeweils der Mittelwert des WAD-Bereiches herangezogen. Ausnahmen bilden, neben dem separat ausgewerteten Dachbereich, die Streifen 1 und 12. Zur Vermeidung eines Extrapolierens der Verläufe über die Stützstellen hinaus, werden hier die Parameterwerte des 6-jährigen Kindes bzw. des 95%-Mannes definiert. So ist gewährleistet, dass die ermittelten Geschwindigkeits- und Winkelbereiche vollständig abgedeckt sind und gleichzeitig weder unter- noch überschritten werden. Sofern die mittlere Abwickellänge des 50%-Mannes mehr als 2050 mm (Mitte Streifen 11) beträgt, wodurch Streifen 12 eine hohe Relevanz hat, erfolgt keine Zuweisung der 95%-Mann-Werte sondern eine Interpolation mit Bezug auf die Mitte des Streifens. Dadurch wird eine Überbewertung des Verletzungsrisikos aufgrund der in der Regel hohen Werte des 95%-Mannes vermieden. Sowohl die Generierung der Verläufe als auch die Übertragung der Parameterwerte auf die einzelnen WAD-Bereiche erfolgt in den Excel-Tools zur Simulation auswertung automatisiert. Bereichen ohne Relevanz werden dabei keine Werte zugewiesen.

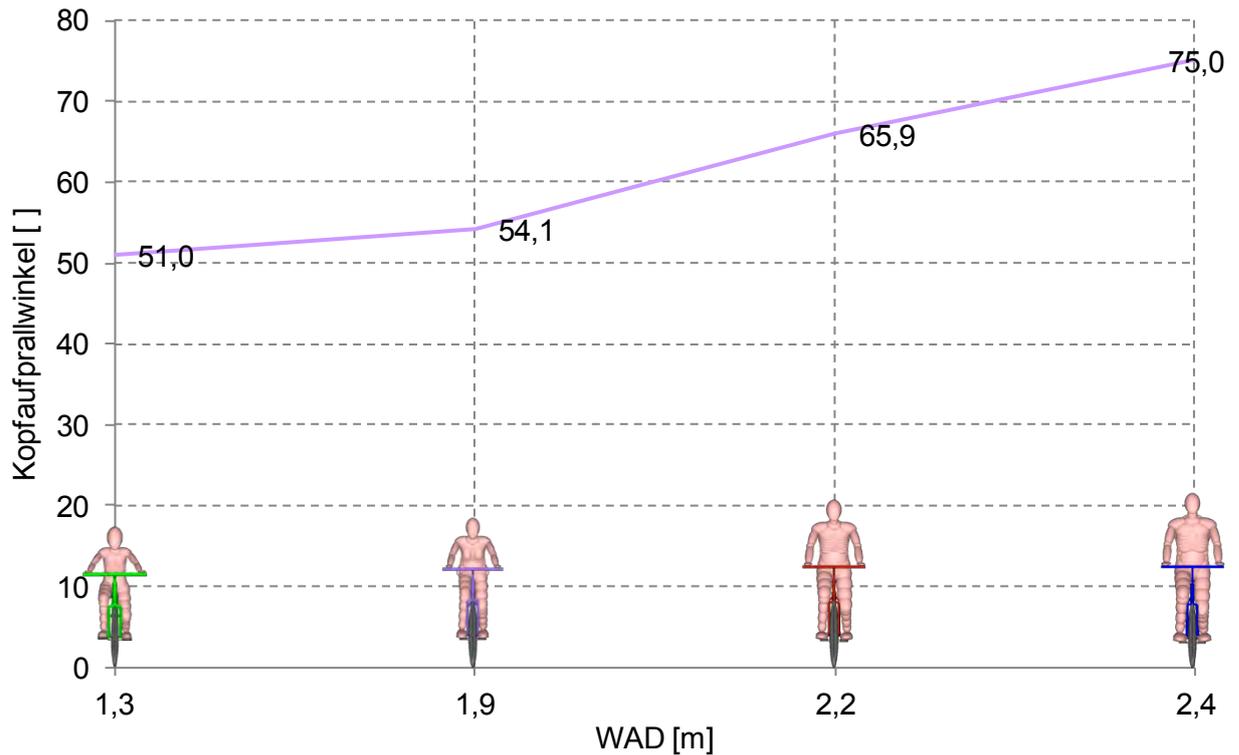


Abb. 4-12: Durchschnittlicher Kopfaufprallwinkel über Abwickellänge (Kompakt, $v = 40 \text{ km/h}$)

Abb. 4-13 gibt eine Übersicht über die im Rahmen des Moduls „Simulation und Unfallkinematik“ ermittelten Daten. Die aufgeführten Werte charakterisieren die Kinematik des generischen Fahrzeugmodells der Klasse Kompakt bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 40 km/h und bilden die eingangs erwähnten kinematischen Eingangsgrößen für das Bewertungsverfahren. Entsprechende Daten werden auch für die reduzierten Kollisionsgeschwindigkeiten sowie die aktive Haube (Abb. 3-6) ausgewertet.

	WAD [mm]	Aufprallwahrscheinlichkeit		Mittlere Kopfaufprallgeschw. [km/h]		Mittlerer Kopfaufprallwinkel [°]	
		Kinder	Erw.	Kinder	Erw.	Kinder	Erw.
13	Dachbereich	0	0,012	0	39,95	0	69,0
12	2100 - 2460	0,041	0,648	43,24	43,24	70,8	70,8
11	2000 - 2100	0,071	0,217	40,24	40,24	61,8	61,8
10	1900 - 2000	0,110	0,087	39,11	39,11	57,9	57,9
9	1800 - 1900	0,182	0,030	38,0	38,0	54,1	54,1
8	1700 - 1800	0,206	0,005	37,46	37,46	53,5	53,5
7	1600 - 1700	0,178	0	36,93	0	53,0	0
6	1500 - 1600	0,105	0	36,39	0	52,4	0
5	1400 - 1500	0,067	0	35,85	0	51,8	0
4	1300 - 1400	0,027	0	35,32	0	51,2	0
3	1200 - 1300	0,009	0	35,15	0	51,0	0
2	1100 - 1200	0,001	0	35,15	0	51,0	0
1	1000 - 1100	0	0	0	0	0	0

Abb. 4-13: Kinematische Eingangsgrößen des Bewertungsverfahrens (Kompakt, $v = 40 \text{ km/h}$)

Die generischen Fahrzeugmodelle bilden typische Vertreter ihrer Klasse und ermöglichen somit eine klassenspezifische Beschreibung der Unfallkinematik. Durch Implementierung dieser Daten in die Indexberechnung sind keine weiteren Simulationen zur Bewertung eines neuen Fahrzeugmodells erforderlich. Die Zuweisung der Kinematikparameter erfolgt durch die Einordnung in die jeweilige Klasse bzw. die Verwendung des zugehörigen Berechnungstools. Somit wird innerhalb einer Klasse für jedes Fahrzeug die gleiche Unfallkinematik zugrundegelegt. Über die vorgegebene Simulationsmatrix und die beschriebene Auswerterroutine ist es jedoch jederzeit möglich, auch fahrzeugmodellspezifische Unfallkinematikdaten in die Bewertung zu integrieren.

4.1.4 Fahrzeugmodellspezifische Struktureigenschaften

Die Struktureigenschaften einer Fahrzeugfront sind maßgeblich für die Kopfbelastung des Radfahrers bzw. Fußgängers beim Primäraufprall. Aufgrund der hohen Steifigkeiten sind die A-Säulen sowie der Windlauf- und obere Kotflügelbereich als besonders kritisch anzusehen. Durch Strukturoptimierungen kann vor allem im Haubenbereich das Verletzungsrisiko reduziert werden, während dies für die A-Säulen aufgrund der Anforderungen an die Karosseriesteifigkeit und seitens des Insassenschutzes nicht möglich ist. Der Radfahrer kann hier strukturell nur durch ein entsprechendes passives Schutzsystem, wie beispielsweise einem Airbag, geschützt werden. Die Einbindung der Struktureigenschaften in das Bewertungsverfahren erfolgt fahrzeugmodellspezifisch über die Euro NCAP-Ergebnisse der zu bewertenden Front. Die im Rahmen der entsprechenden Komponententests ermittelten HIC-Werte stehen in direktem Bezug zur Steifigkeit der jeweiligen Prüfbereiche. Zusätzliche passive Systeme werden durch Reduktion der Werte im adressierten Schutzbereich berücksichtigt.

Die Beschreibung der fahrzeugmodellspezifischen Struktureigenschaften basiert auf den im Euro NCAP-Spreadsheet zusammengefassten Daten zur Fußgängerschutzbewertung. Die darin aufgeführten HIC-Werte werden auf die Fahrzeugeinteilung übertragen. Abb. 4-14 zeigt dies für den als Beispielfahrzeug fungierenden Opel Adam. Die Implementierung des Euro NCAP Grid-Ansatzes und die damit verbundene Anpassung der Fahrzeugfronteinteilung (Kapitel 4.1.2) erfordert eine vollständige Überarbeitung der Excel-Tools zur Indexberechnung. Die infolge des Grid-Ansatzes deutlich höhere Anzahl an Prüfpunkten samt zugehöriger HIC-Werte bzw. Farben erleichtert die Übertragung der Euro NCAP-Daten auf die Fahrzeugeinteilung und erlaubt einen fast vollständig automatisierten Prozess. Zudem verbessert die deutlich engere Rasterung die Abbildungsgenauigkeit der Struktureigenschaften. Die Definition von Übertragungsregeln und das Durchführen manueller Anpassungen, wie im Vorgängerprojekt, sind bei den neuen Excel-Bewertungstools nicht mehr erforderlich.

Der obere Teil von Abb. 4-14 zeigt die Ergebnisdarstellung innerhalb des Euro NCAP-Spreadsheets, welche direkt in das Excel-Tool zur Indexberechnung hineinkopiert werden kann. Jedes Feld steht dabei für einen Grid-Punkt, wobei die farblichen Felder tatsächlich auf der Fahrzeugfront existierende Grid-Punkte mit entsprechend zugewiesenem HIC-Niveau repräsentieren. Bei dieser Darstellung ist zu beachten, dass die WAD-Angaben allein für die Fahrzeugmittellinie gültig sind, da die Grid-Punkte links und rechts davon in y-Richtung

aufgetragen werden und das so entstehende Gitter somit nicht, wie bei der Abwickellänge, die Pfeilung der Front berücksichtigt. Bei den karierten Feldern handelt es sich um sogenannte „Defaulted Points“, welche aufgrund ihrer Lage im A-Säulen- bzw. mittleren Windschutzscheibenbereich pauschal rot bzw. grün bewertet werden, sofern der Hersteller für die A-Säule keine bessere Bewertung belegt. Zur Verifizierung der Herstellerangaben werden zehn Grid-Punkte gleichzeitig und zufällig ausgewählt und anschließend durch Euro NCAP getestet. Die Auswahl repräsentiert dabei die vorhergesagte Farbverteilung. Die seitens Euro NCAP abgeprüften Felder sind mit einem schwarzen X gekennzeichnet. Die zugehörigen Prüfergebnisse sind ebenfalls im Spreadsheet aufgeführt.

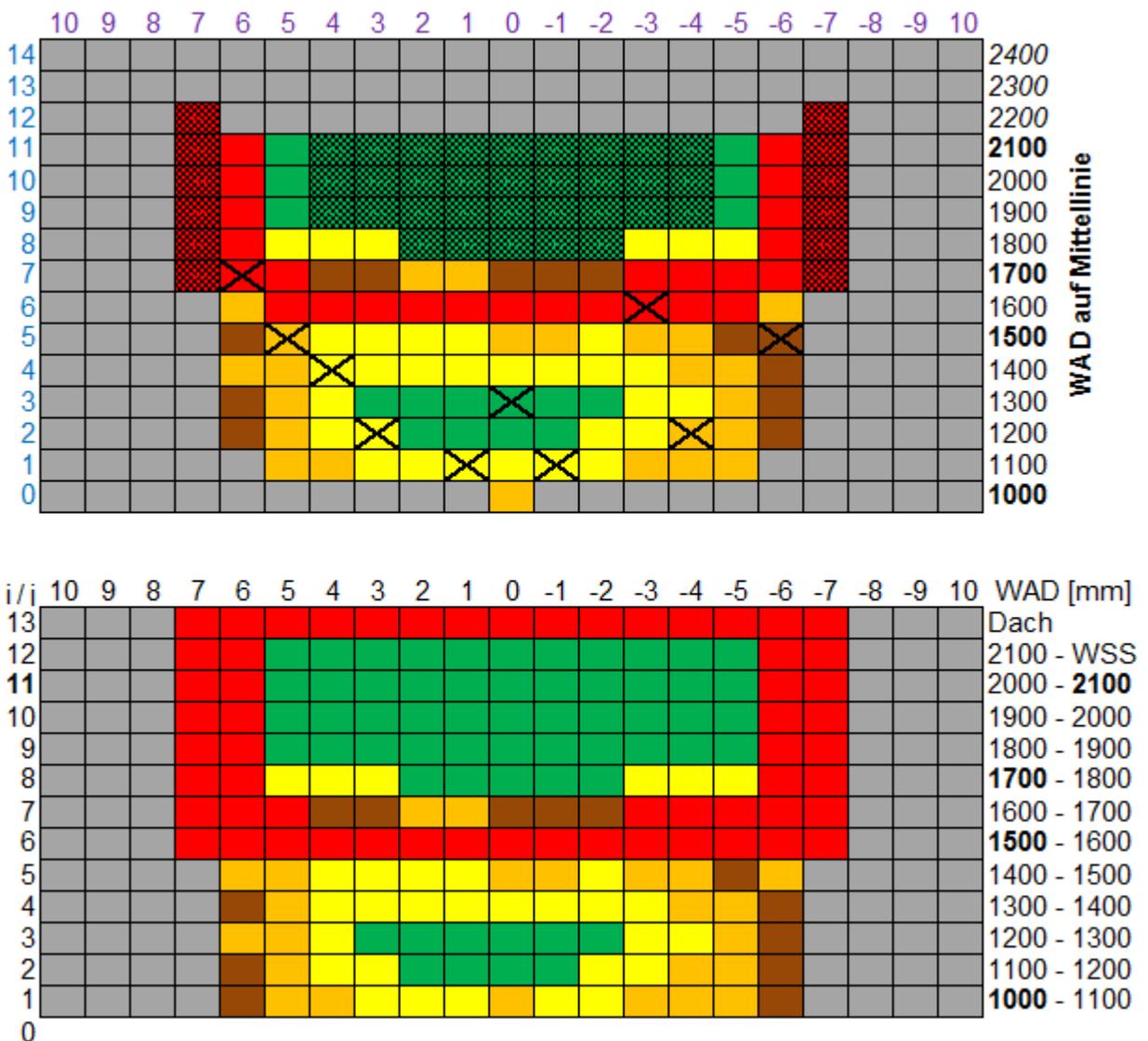


Abb. 4-14: Automatische Übertragung der Euro NCAP-Ergebnisse (oben) auf die Fahrzeugfronteinteilung (unten) innerhalb des Excel-Bewertungstools – Beispielfahrzeug

Im unteren Teil von Abb. 4-14 werden die Grid-Farbzweisungen nach der Übertragung auf die Fahrzeugfronteinteilung dargestellt, bei der nun jede einzelne Reihe einen WAD-Streifen repräsentiert (vgl. Abb. 4-3 rechts), sodass die rechts angegebenen Intervalle entsprechend

für alle Felder einer Reihe gelten. Diese Übertragung erfolgt automatisch. Es sind lediglich Angaben zu Anzahl und Lage von Sprüngen der Grid-Reihen in den jeweils nächsten WAD-Streifen erforderlich. Dies soll im Folgenden anhand von Abb. 4-15 erläutert werden, wo ein generisches Euro NCAP-Grid mit der Fahrzeugfronteinteilung überlagert wird.

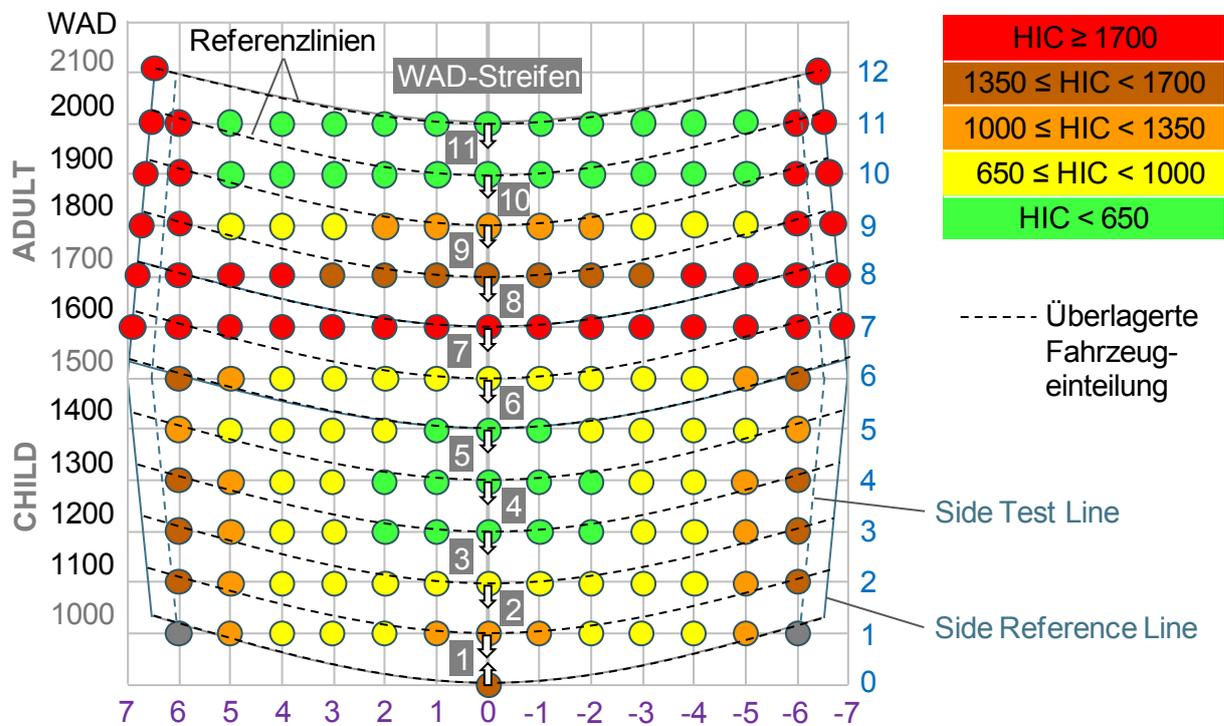


Abb. 4-15: Überlagerung von Euro NCAP-Grid & Fahrzeugfronteinteilung (WAD-Linien & Prüfergebnis generisch) [HAM14]

Das Euro NCAP-Grid orientiert sich an den ursprünglichen Referenzlinien des Kinder- und Erwachsenenprüfbereichs. Lage und Ausdehnung des Kopfprüfbereichs bleiben somit unverändert. Durch Überlagerung der angepassten Fahrzeugfronteinteilung mit dem Euro NCAP-Grid entstehen zusätzliche Referenzlinien (Abb. 4-15), welche die jeweiligen WAD-Streifen innerhalb des Euro NCAP-Prüfbereichs abbilden, also Streifen 1 bis 11. Da die Ausdehnung der WAD-Streifen in Längsrichtung dem Abstand der Prüfpunkte entspricht, können diese eindeutig zugewiesen werden.

Allein für den Fall, dass zwei Prüfpunkte genau auf zwei benachbarten Referenzlinien der Fahrzeugeinteilung liegen, was beispielsweise für die Punkte auf der mittleren Längslinie zutrifft, ist eine Übertragungsregel erforderlich. Hier wird jeder Prüfpunkt jeweils dem vorhergehenden WAD-Bereich zugewiesen, sodass beispielsweise ein Punkt auf der dritten Referenzlinie (WAD 1200) dem Bereich 2 zuzuordnen ist. Einen Sonderfall bildet dabei allerdings der vorderste Prüfpunkt, welcher auf der ersten Referenzlinie (WAD 1000) liegt. Hier gibt es aufgrund der Lage am Rande der Fahrzeugmarkierung keinen vorhergehenden WAD-Bereich und auch keine weiteren Punkte in Fahrzeugquerrichtung. An dieser Stelle wird entsprechend der Mittelwert aus den Ergebnissen der beiden auf den Referenzlinien befindlichen Punkte gebildet. [HAM14]

Aufgrund des durch die Pfeilung der Front hervorgerufenen gekrümmten Verlaufes der WAD-Linien liegen zwangsläufig nicht alle Punkte einer Grid-Reihe innerhalb des gleichen WAD-Streifens. Je nach Breite der Fahrzeugfront kann eine Grid-Reihe mehrere WAD-Streifen durchlaufen. Die entsprechenden Übergänge bzw. Sprünge in einen nächsten WAD-Streifen müssen vor der Übertragung auf die Fahrzeugfronteinteilung angegeben werden und lassen sich leicht anhand des Fotos des Grid-Markups (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) oder, falls dieses nicht vorhanden ist, auch direkt anhand der Ergebnisdarstellung innerhalb des Euro NCAP-Spreadsheets ermitteln.

Im Falle des Beispielfahrzeuges liegt der erste und einzige Sprung bei Grid-Punkt 6 bzw. -6 vor. Einen solchen Fall zeigt auch das generische Prüfergebnis in Abb. 4-15. Die beiden grau eingefärbten Punkte in Grid-Reihe 1 befinden sich außerhalb des Prüfbereichs, da sie vor der WAD 1000 mm liegen. Sie sind somit nicht Teil der Prüfung. Den gleichen Sprung findet man auch für die folgenden WAD-Linien. Hier gehören jeweils die sechsten Grid-Punkte auf beiden Fahrzeugseiten dem vorherigen WAD-Streifen an. Im Euro NCAP-Grid-Markup werden stets auch die WAD-Linien 1000 mm, 1500 mm, 1700 mm und 2100 mm aufgetragen, anhand derer der Verlauf der Grid-Reihen in Relation zum Verlauf der WAD-Linien ermittelt werden kann. Alternativ gehen die Sprünge auch bereits aus der Grid-Ergebnisdarstellung (Abb. 4-14 oben) hervor. So weist der sechste Punkt auf beiden Seiten der ersten Grid-Reihe, wie in Abb. 4-15, entsprechend keine Farbzuzuweisung auf, obwohl die Reihen darüber jeweils über einen sechsten Punkt verfügen. Kommt es in der zweiten Grid-Reihe ebenfalls zu einem solchen Sprung, so durchläuft eine Grid-Reihe über die Breite einer Fahrzeughälfte gesehen entsprechend drei WAD-Streifen, sodass es zu zwei Übergängen bzw. Sprüngen kommt. Diese können innerhalb des Bewertungstools eindeutig angegeben werden. Dazu muss pro Sprung lediglich die zugehörige Spalte im Euro NCAP-Grid ermittelt werden. Für das Beispielfahrzeug wird hier entsprechend eine 6 im Feld Sprung 1 (Abb. 4-16 links) eingetragen, da die Grid-Punkte einer Reihe ab dem sechsten Punkt auf beiden Fahrzeugseiten innerhalb des nächst vorderen WAD-Streifens liegen.

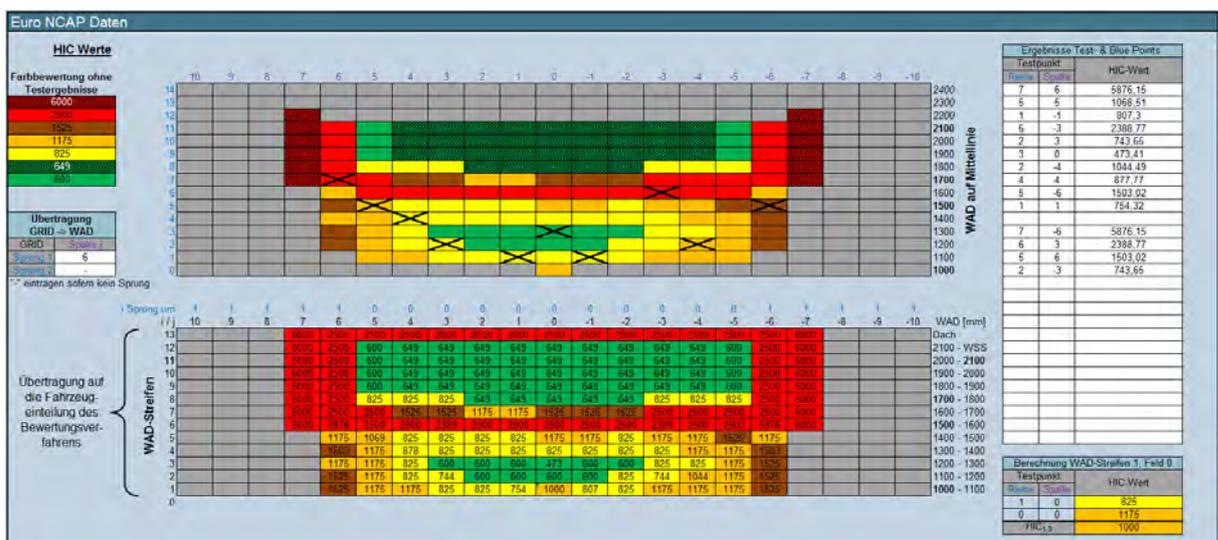


Abb. 4-16: Einbindung der Struktureigenschaften in das Excel-Tool zur Indexberechnung

Die Einzeichnung von längs zur Front verlaufenden Referenzlinien ist für den Grid-Ansatz nicht erforderlich, da sich diese aus dem konstanten Raster der Prüfpunkte ergeben. Bei der Berechnung der Relevanzfaktoren (Kapitel 4.1.5.1) ist allerdings zu beachten, dass vor allem im Bereich der A-Säulen die Anzahl der Prüfpunkte quer zur Fahrzeugrichtung variieren kann. Hier sieht das Euro NCAP-Grid zusätzliche Prüfpunkte außerhalb der „Side Test Lines“ vor, welche in Abb. 4-15 gestrichelt dargestellt sind. Die Koordinaten leiten sich aus den Schnittpunkten der entsprechenden Rasterquerlinien mit der „Side Reference Line“ (blaue durchgehende Linie) ab. So ist gewährleistet, dass die A-Säulen mit voller Überdeckung geprüft werden. [EUN14] [HAM14]

Die automatische Übertragung der Euro NCAP-Daten umfasst auch die entsprechende Zuweisung von HIC-Werten für jedes Feld der Fahrzeugeinteilung. Dabei werden für die konkret getesteten Grid-Punkte die zugehörigen Prüfergebnisse und für die übrigen Punkte die jeweils in der Farbskala (Abb. 4-16 links) aufgeführten Ersatzwerte verwendet. Diese ergeben sich für die Farben gelb, orange und braun aus den Mittelwerten der entsprechenden HIC-Intervalle der Euro NCAP-Farbskala. Für Grid-Punkte mit der Farbe Gelb, welche sämtliche HIC-Werte von 650 bis kleiner 1000 repräsentiert, wird somit bei nicht vorhandenem Prüfergebnis ein HIC-Wert von 825 vorgegeben. Bei den grünen und roten Grid-Punkten wird zwischen normalen und pauschal bewerteten Punkten (Defaulted Points) unterschieden. Letztere erkennt man am karierten Muster. Für die Farbe Grün wird ein HIC-Wert von 600 definiert, der sich für Defaulted Points aufgrund der rein pauschalen Bewertung auf 649 erhöht, was der Obergrenze des Farbintervalls entspricht. Bezüglich der Farbe Rot wird ein HIC-Wert von 2500 definiert, was laut der verwendeten Verletzungsrisikofunktion (Abb. 4-35) einem 100% Risiko für eine AIS3+ Kopfverletzung entspricht. Da pauschal rote Grid-Punkte stets auf der A-Säule liegen, erhöht sich hier der HIC-Wert nochmals deutlich auf einen Betrag von 6000, was sich mit Prüfergebnissen in diesem Bereich deckt und auch der Vorgehensweise im Vorgängerprojekt entspricht.

Neben den zehn durch Euro NCAP standardmäßig geprüften Grid-Punkten (Kapitel 4.1.2) kann der Fahrzeughersteller bis zu zehn zusätzliche Verifizierungstests auf eigene Kosten durchführen lassen. Darüber hinaus hat er die Möglichkeit, in bis zu acht Bereichen maximal zwei benachbarte Grid-Punkte, deren Prüfergebnis schwer vorherzubestimmen ist, als blaue Punkte (blue points) zu definieren. In den sich daraus ergebenden blauen Zonen wird jeweils ein zusätzlicher Impaktortest durchgeführt. Sämtliche im Euro NCAP-Spreadsheet unter „Verification“ und „Blue Points“ aufgeführten Prüfergebnisse sind im Bewertungstool in die Tabelle „Ergebnisse Test- & Blue Points“ (Abb. 4-16 rechts) samt Position im Grid, d.h. Reihen- und Spaltenangabe, einzutragen. Anhand dieser Angaben werden die Werte dann automatisch den richtigen Feldern der Fahrzeugeinteilung zugewiesen. Leere Zeilen innerhalb der Tabelle sind dabei zulässig und beeinflussen die Übertragung nicht.

Die in Abb. 4-16 in der Tabelle der Prüfergebnisse zu sehende Leerzeile trennt visuell die aus dem Spreadsheet eingefügten Werte von den jeweils gespiegelten Werten. Das bedeutet, dass der Anwender hier die Möglichkeit hat, Testergebnisse einer Fahrzeugseite auch auf die andere Seite zu übertragen, sofern die Farbvorhersage des gespiegelten Grid-

Punktes mit der des getesteten Punktes übereinstimmt. Dazu wird das Prüfergebnis nochmals in die Tabelle eingetragen und dabei das Vorzeichen der Spaltenangabe umgekehrt. So kann mehr Feldern der Fahrzeugfront ein konkretes Testergebnis zugewiesen werden. Insgesamt ergibt sich so ein fahrzeugmodellspezifisches Profil, was für das betrachtete Beispielfahrzeug in Abb. 4-17 nochmals samt zugewiesenen HIC-Werten dargestellt wird.

6000	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	6000
6000	2500	600	649	649	649	649	649	649	649	649	649	600	2500	6000
6000	2500	600	649	649	649	649	649	649	649	649	649	600	2500	6000
6000	2500	600	649	649	649	649	649	649	649	649	649	600	2500	6000
6000	2500	600	649	649	649	649	649	649	649	649	649	600	2500	6000
6000	2500	825	825	825	649	649	649	649	649	825	825	825	2500	6000
6000	2500	2500	1525	1525	1175	1175	1525	1525	1525	2500	2500	2500	2500	6000
6000	5876	2500	2500	2389	2500	2500	2500	2500	2500	2389	2500	2500	5876	6000
	1175	1069	825	825	825	825	1175	1175	825	1175	1175	1525	1175	
	1503	1175	878	825	825	825	825	825	825	825	1175	1175	1503	
	1175	1175	825	600	600	600	473	600	600	825	825	1175	1525	
	1525	1175	825	744	600	600	600	600	825	744	1044	1175	1525	
	1525	1175	1175	825	825	754	1000	807	825	1175	1175	1175	1525	

Abb. 4-17: Verteilung der HIC-Werte für das Beispielfahrzeug

Da der Euro NCAP-Prüfbereich nur bis zu einer Abwickellänge von 2100 mm reicht, gehen aus den Spreadsheets entsprechend keine HIC-Werte für die WAD-Streifen 12 und 13 der Fahrzeugeinteilung hervor. Hier erfolgt eine ähnliche Vorgehensweise wie im Vorgängerprojekt, indem der Bereich der Dachvorderkante (WAD-Streifen 13) rot bewertet wird und der WAD-Streifen 12 die HIC-Werte des WAD-Streifens 11 erhält.

4.1.4.1 Crashaktive Systeme

Im Rahmen dieses Projekts wird zusätzlich zum Basisfahrzeug auch die Implementierung einer aktiven Haube sowie deren Erweiterung um einen Windschutzscheibenairbag betrachtet. Ist die aktive Haube oder auch der zusätzliche Windschutzscheibenairbag Teil der Serienausstattung, gehen deren Struktureigenschaften unmittelbar aus den Euro NCAP-Ergebnissen hervor. Andernfalls ermöglicht das Bewertungsverfahren eine qualitative Bewertung zur Abschätzung des Schutzpotentials. Dazu werden im Schutzbereich des jeweiligen Systems pauschale HIC-Werte definiert, die die verbesserten Struktureigenschaften generell widerspiegeln. Die Werte zur generischen Abbildung einer aktiven Haube sind im Zuge der Anpassungen überarbeitet worden und orientieren sich an der neuen 5-Farben-Skala bei Euro NCAP. So werden sämtliche Grid-Punkte im aufgestellten Haubenbereich allgemein grün und damit mit einem HIC-Wert von 600 bewertet. Sofern hier Prüfergebnisse mit niedrigerem Betrag vorliegen, so werden diese beibehalten.

Im Vorgängerprojekt betrug der generische HIC-Wert im Schutzbereich 700. Zudem wurden hier dem äußersten Randbereich der Haube die Werte des Basisfahrzeuges zugewiesen. Bewertungsgrundlage war dabei eine reine Aufstellung der Serienhaube, wie in der Simu-

lation (Abb. 3-6). In diesem Falle stehen die Vorteile aufgrund des vor allem im hinteren Bereich gewonnenen Deformationsraumes dem erhöhten Verletzungsrisiko durch den Haubenspalt gegenüber. Stärker noch gilt dies für den Bereich der Haubenhinterkante, wo bei fehlendem Airbagsystem ein qualitativer Mindestwert von 1500 vorgegeben wurde, auf den niedrigere Basiswerte entsprechend erhöht wurden. Dieser Mindestwert wird mit Hinblick auf die 5-Farben-Skala auf 1700 erhöht, da bei diesem Betrag der rote Farbbereich beginnt. Ferner wird bezüglich des äußeren Randbereichs im Rahmen der Bewertung jetzt von einer optimalen konstruktiven Auslegung der aktiven Haube ausgegangen, d.h. von einem außerhalb des Euro NCAP-Testbereichs liegenden Spalts zwischen Haube und Kotflügel. Somit werden bei der generischen Abbildung einer aktiven Haube nun auch die Felder im seitlichen Randbereich pauschal grün bewertet, statt hier die Werte des Basisfahrzeuges beizubehalten. Dadurch repräsentiert der entsprechende Indexwert das volle Schutzpotential eines modernen Systems.

Die Abbildung der generischen aktiven Haube geht für das Beispielfahrzeug aus Abb. 4-18 hervor. Der obere Teil zeigt die angepassten Farbzweisungen der Grid-Punkte, was direkt innerhalb des Bewertungstools erfolgt. Hierzu kann jedem Feld über eine Auswahlliste eine Farbe gemäß der aufgeführten Legende zugewiesen werden. Alternativ können Farbzweisungen auch kopiert und dann für mehrere Felder gleichzeitig eingefügt werden.

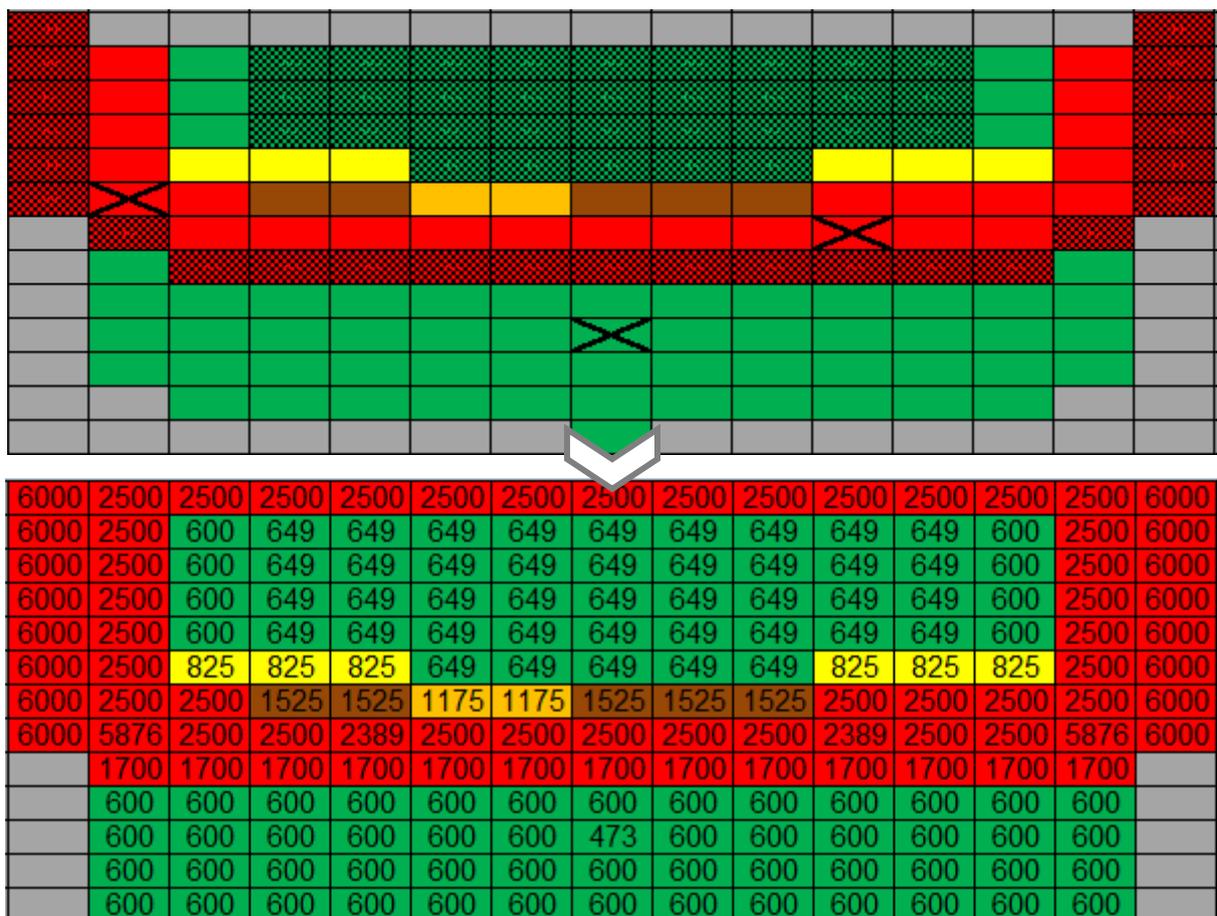


Abb. 4-18: Verteilung der HIC-Werte für die generische aktive Haube beim Beispielfahrzeug

Der untere Teil von Abb. 4-18 zeigt die auf die Fahrzeugfronteinteilung übertragenen HIC-Werte der generischen aktiven Haube. Ein Vergleich mit der HIC-Verteilung des Basisfahrzeuges in Abb. 4-17 veranschaulicht die Änderungen. So werden die ersten vier WAD-Streifen, also der Abwickellängenbereich zwischen 1000 und 1400 mm, komplett grün bewertet. Das grüne Testergebnis vom mittleren Grid-Punkt in Reihe 3 (HIC = 473) bleibt dabei bestehen. Anhand des Grid-Markups des Beispielfahrzeuges (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) wird ersichtlich, dass die Punkte der Reihe 5 in den Spalten 5 und -5 direkt an und in den Spalten zuvor unmittelbar hinter der Haubenhinterkante liegen. Für die Reihe 6 ist dies jeweils für die äußeren Punkte auf beiden Seiten der Fall. Zur Berücksichtigung des Risikos durch den sich öffnenden Haubenspalt werden diese Punkte im Tabellenblatt zur aktiven Haube entsprechend pauschal auf rot gesetzt (Abb. 4-18 oben), sofern sie nicht bereits eine rote Farbzueweisung haben. Diesen wird dann automatisch der oben aufgeführte Mindestwert von 1700 zugewiesen, sodass der WAD-Streifen 5 der Fahrzeugfronteinteilung durchgehend rot bewertet wird (Abb. 4-18 unten). Oberhalb dieses WAD-Streifens ändert sich die HIC-Verteilung gegenüber dem Basisfahrzeug nicht.

Bei SUVs liegt der Beginn des Prüfbereichs aufgrund der hohen Front entsprechend weit vorne und wird auch bei Implementierung einer aktiven Haube nicht wesentlich hinsichtlich der Struktureigenschaften verbessert. Ein Vergleich verschiedener Vertreter der Klasse SUV in [HAM14] zeigt ein solches Verhalten in den Euro NCAP-Prüfergebnissen. Im Zuge der Fahrzeugbewertungen in den Kapiteln 4.2 und 4.3 werden dem SUV-Vertreter somit im vorderen Randbereich, d.h. WAD-Streifen 1, die Werte des Basisfahrzeuges zugewiesen.

Bei Erweiterung der aktiven Haube um einen U-förmigen Windschutzscheibenairbag sind entsprechend weitere Anpassungen der HIC-Verteilung erforderlich. Zunächst bleibt die grüne Bewertung des Haubenbereichs bestehen, allerdings ist das Risiko durch den Haubenspalt aufgrund des sich darunter entfaltenden Airbags nun nicht mehr gegeben. Im Rahmen dieses Projekts werden sowohl ein Radfahrerairbag als auch der klassische Fußgängerairbag aus dem Vorgängerprojekt betrachtet. Während der generische Radfahrerairbag außen bis einschließlich der Dachvorderkante verläuft, deckt der generische Fußgängerairbag hier eine Länge von 600 mm jenseits der Haubenhinterkante ab. In der Mitte verfügen beide Airbags jeweils über eine Abdeckung von 300 mm. Das Tabellenblatt zur Airbagbewertung innerhalb des Bewertungstools ermöglicht für die jeweiligen Grid-Punkte die Zuweisung „Airbag“. So kann jede beliebige Airbaggeometrie einfach in die Bewertung integriert werden. In der oberen Hälfte von Abb. 4-19 ist dies für den Radfahrerairbag beim Beispielfahrzeug dargestellt. Die Grid-Punkte mit Airbag-Zuweisung erkennt man an der weiß und schwarz karierten Einfärbung der zugehörigen Felder. Diesen Feldern wird, wie im Vorgängerprojekt, ein pauschaler HIC-Wert von 500 zugewiesen, welcher durch verschiedene Versuchsergebnisse, u.a. auch im Rahmen der damaligen Polar-II Dummy-Tests, bestätigt wird. Dabei erstreckt sich der Airbag im aufgeführten Beispiel gemäß der definierten Vorgaben über drei Grid-Reihen im Windlauf- bzw. unteren Windschutzscheibenbereich sowie außen über die gesamte Länge des A-Säulen- bzw. Dachvorderkantenbereichs. Mit Hinblick auf den Radfah-

rerairbagprototypen und dessen ausgeprägte Übergänge vom äußeren in den mittleren Teil wären auch weitere Airbagzuweisungen denkbar, bspw. für die gelben Felder.

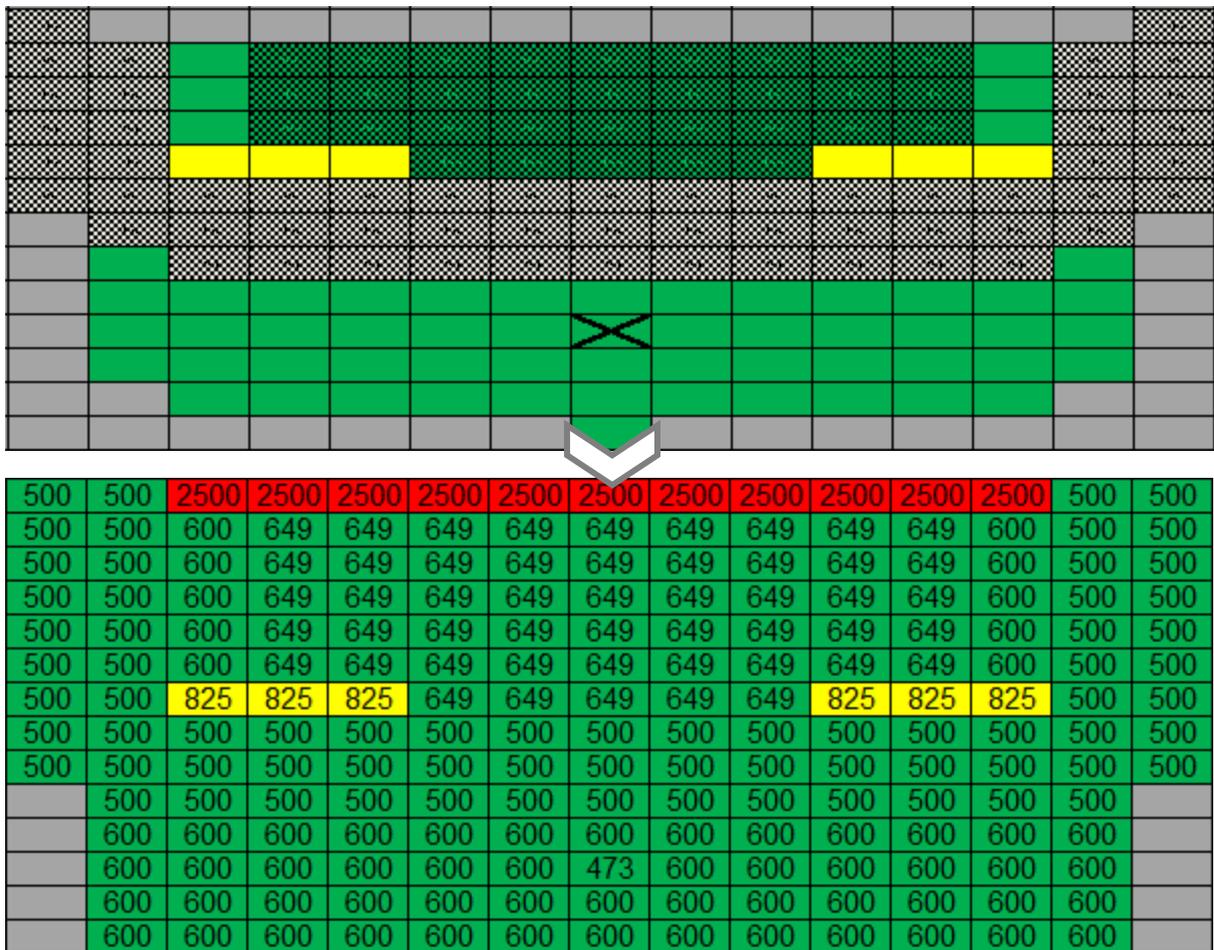


Abb. 4-19: Verteilung HIC-Werte für generischen Radfahrerairbag beim Beispielfahrzeug

Die untere Hälfte von Abb. 4-19 zeigt wiederum die auf die Fahrzeugfronteinteilung übertragenen HIC-Werte. Durch die Kombination aus aktiver Haube und Windschutzscheibenairbag werden die Struktureigenschaften des Beispielfahrzeuges entscheidend verbessert (vgl. Abb. 4-17). Neben den A-Säulen weist der zuvor kritische Windlauf- bzw. untere Windschutzscheibenbereich nun eine durchgehend grüne Bewertung auf. Aufgrund der starren Hauben aufstellung hat der Airbag selbst kaum Einfluss auf die Unfallkinematik, zumal die Auswertung im hinteren Spaltbereich über eine Hilfsebene erfolgt. Für die spätere Indexberechnung werden somit die Parameter der aktiven Haube verwendet.

Wie schon im Vorgängerprojekt erfordert die Abbildung eines Windschutzscheibenairbags einen zusätzlichen WAD-Streifen in der Fahrzeugfronteinteilung. Dabei wird der WAD-Streifen 12 in die Bereiche 12a und 12b aufgeteilt. Diese Unterteilung ist in erster Linie für die Bewertung klassischer Windschutzscheibenairbags notwendig, d.h. solchen die nicht, wie im Falle des Radfahrerairbags, bis zum vorderen Dachbereich reichen. Hier ergibt sich das Problem, dass der WAD-Streifen 12 durch die Abmaße der Windschutzscheibe vorgegeben ist

und somit über den klassischen Airbag hinausgeht. Durch die Unterteilung, welche am Ende der beiden Flanken des U-förmigen Airbags erfolgt, können die Airbagdimensionen und damit die Unterschiede in den Struktureigenschaften berücksichtigt und entsprechend gewichtet werden. Während Bereich 12b die ursprünglichen HIC-Werte des Windschutzscheibenbereichs beibehält, werden im Bereich 12a jeweils die beiden äußeren Felder zur Berücksichtigung der A-Säulenabdeckung entsprechend auf 500 reduziert. Im Falle des Beispielfahrzeuges ist das allerdings nicht erforderlich, da dieses als Vertreter der Klasse Kompakt über eine relativ kurze Fronthaube verfügt, sodass die Flanken des klassischen Fußgängerairbags hier bereits bei einer Abwickellänge von 2000 mm enden und die Unterteilung von WAD-Streifen 12, welcher bei WAD 2100 mm beginnt, somit nicht mehr zum Tragen kommt. Hier werden, wie schon beim Radfahrerairbag in Abb. 4-19, einfach beiden WAD-Streifen die gleichen HIC-Werte zugeordnet, wobei ein Streifen dann eine Relevanz von 0 erhält. Sofern gewünscht, kann der Anwender mit Hilfe der Excel-Tools zur Simulationsauswertung die Kinematikparameterwerte (vgl. Abb. 4-13) der jeweiligen generischen Fahrzeugmodelle für jede beliebige Aufteilung von Streifen 12 bestimmen und entsprechend in die Bewertungstools übertragen. Für die oben definierten Abmaße des Radfahrer- und Fußgängerairbags sind diese Daten bereits integriert und Grundlage der zugehörigen Indexwerte in den Kapiteln 4.2 und 4.3.

Die in Modul 3 bestimmten Struktureigenschaften basieren ausschließlich auf den starren Randbedingungen der Euro NCAP-Prüfungen, d.h. einer Kopfaufprallgeschwindigkeit von 40 km/h und einem Kopfaufprallwinkel von 50° bzw. 65°. Um einen Bezug zu der in Modul 2 hergeleiteten Unfallkinematik herzustellen, ist eine entsprechende Gewichtung und Anpassung der HIC-Werte erforderlich.

4.1.5 Gewichtung

Im Modul „Gewichtung und Anpassung der Struktureigenschaften“ werden die HIC-Werte mittels verschiedener Faktoren modifiziert. Diese Faktoren sind in die Formel zur Indexberechnung (Kapitel 4.1.6) integriert und werden im Folgenden vorgestellt. Jeder Faktor repräsentiert dabei einen der im Modul zur Unfallkinematik ausgewerteten Parameter.

4.1.5.1 Relevanzfaktoren

Über die Relevanzfaktoren erfolgt eine Gewichtung der einzelnen Felder der Fahrzeugeinteilung und damit gleichzeitig auch der zugewiesenen HIC-Werte. Die Indexberechnung basiert auf einer Summenformel (Kapitel 4.1.6), bei der das von den HIC-Werten abhängige Verletzungsrisiko der einzelnen Fahrzeugfelder aufsummiert wird. Mittels der Relevanzfaktoren geht jedes Feld entsprechend seiner Kopfaufprallwahrscheinlichkeit in diese Summe ein. Der Index i bezieht sich dabei auf die Felder in Längsrichtung, während der Index j die Felder in Fahrzeugquerrichtung adressiert.

Grundlage für die Gewichtung in Längsrichtung bilden die in Modul 2 für die einzelnen WAD-Streifen ermittelten Aufprallwahrscheinlichkeiten (Abb. 4-9 & Abb. 4-10). Diese werden für die Gruppe der Kinder sowie der Erwachsenen durch den Relevanzfaktor $R_{i,WAD}$ abgebildet,

welcher die Aufprallwahrscheinlichkeit in Längsrichtung angibt und Werte zwischen 0 und 1 annimmt. Diese werden im Rahmen der Simulationsauswertung bereits im entsprechenden Format ausgegeben (vgl. Abb. 4-13). Die Werte in Abb. 4-20 entsprechen den fahrzeugklassenspezifischen Aufprallwahrscheinlichkeiten der Klasse Kompakt bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 40 km/h. Bei abweichenden Geschwindigkeiten bzw. einer Ausstattung des Fahrzeuges mit einer aktiven Haube ändern sich die Werte des Relevanzfaktors $R_{i,WAD}$ gemäß der Auswertungen in Modul 2.

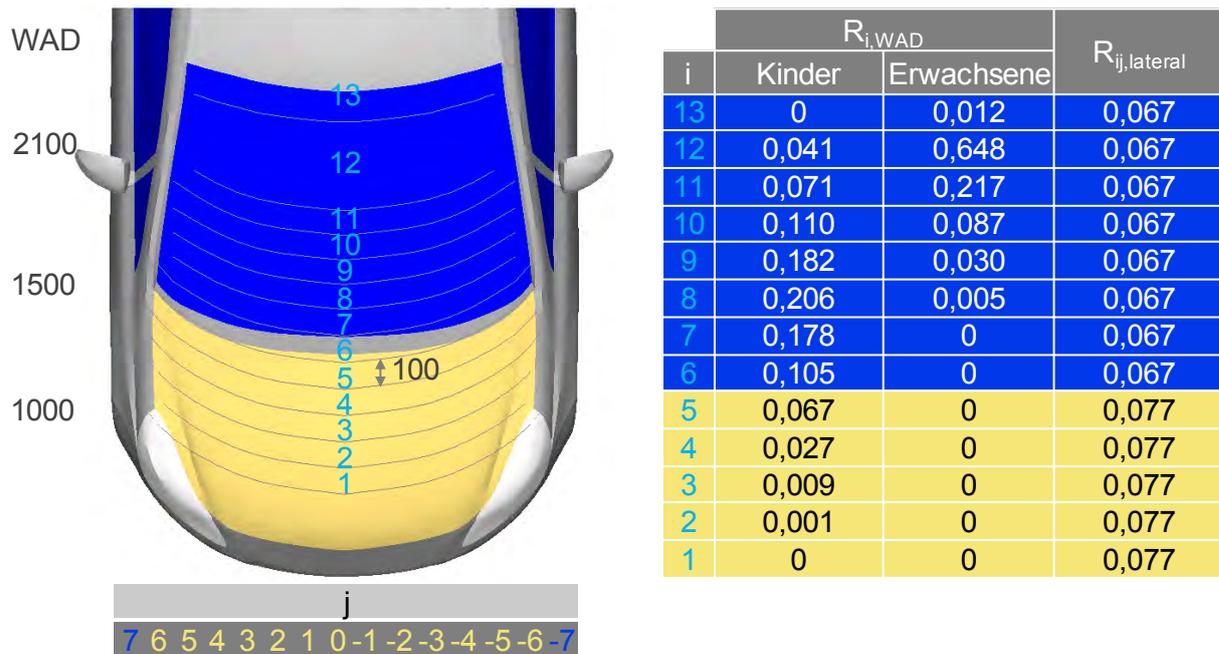


Abb. 4-20: Relevanzfaktoren (Kompakt, $v = 40$ km/h)

In Fahrzeugquerrichtung sind die Anprallorte der Radfahrer laut Unfallanalyse (Kapitel 2.3) näherungsweise gleich verteilt, sodass der Betrag des zugehörigen Relevanzfaktors ($R_{ij,lateral}$) über der Fahrzeugbreite konstant ist und sich jeweils aus der Anzahl der Grid-Punkte innerhalb eines WAD-Bereiches berechnet. Da diese in der Regel nicht konstant ist, kann der Wert in Abhängigkeit vom WAD-Bereich variieren. So beträgt der Relevanzfaktor beim Beispielfahrzeug im Haubenbereich einschließlich Windlauf $1/13$ (WAD-Streifen 1 bis 6 mit 13 Grid-Punkten), während im Windschutzscheibenbereich ein Wert von $1/15$ (WAD-Streifen 7 bis 13 mit 15 Grid-Punkten) zu verwenden ist (vgl. Abb. 4-14). Das gleiche gilt auch für die Gruppe der Fußgänger.

4.1.5.2 Geschwindigkeitsfaktor

Der Geschwindigkeitsfaktor V_{ij} dient der Anpassung der standardisierten Euro NCAP-Impaktortestergebnisse an die mittleren Kopfaufprallgeschwindigkeiten aus der Unfallkinematikanalyse. Die Definition des Geschwindigkeitsfaktors beruht auf analytischen Ansätzen sowie einer Vielzahl von Impaktorsimulationen und wurde im Rahmen von [HAM14] nochmals überarbeitet und in [HAM13] veröffentlicht. Ausgehend von einem unter festen Randbe-

dingungen ermittelten Impaktortestergebnis, können für die gleiche Stelle entsprechende HIC-Werte sowohl für reduzierte als auch erhöhte Kopfaufprallgeschwindigkeiten bestimmt werden, ohne weitere Tests durchführen zu müssen.

Die Abhängigkeit des HIC-Wertes von der Geschwindigkeit wird über Funktionsschare dargestellt, die ein HIC-Geschwindigkeits-Kennfeld definieren und in den Excel-Bewertungstools hinterlegt sind. Ausgangspunkt bildet dabei jeweils der aus den Euro NCAP-Prüfergebnissen resultierende HIC-Betrag bei 40 km/h. Im Zuge der Anpassungen am Bewertungsverfahren wird das Kennfeld aus dem Vorgängerprojekt durch das überarbeitete HIC-Geschwindigkeits-Kennfeld aus [HAM14] ersetzt, welches in Abb. 4-21 anhand beispielhafter Kurvenverläufe veranschaulicht wird und sich an der 5-Farben-Skala des Euro NCAP-Grids orientiert. Hinsichtlich der mathematischen und technischen Details bei der Herleitung des Kennfeldes sei auf [HAM14] verwiesen. Zu letzteren zählt u.a. die Auslegung des Kennfeldes auf die seit 2009 im Zuge einer Harmonisierung mit der aktuellen Gesetzgebung seitens Euro NCAP eingesetzten ISO-Kopfimpaktoren (3,5 und 4,5 kg). Das alte Kennfeld beruhte noch auf den zuvor verwendeten EEVC WG17-Impaktoren (2,5 und 4,8 kg).

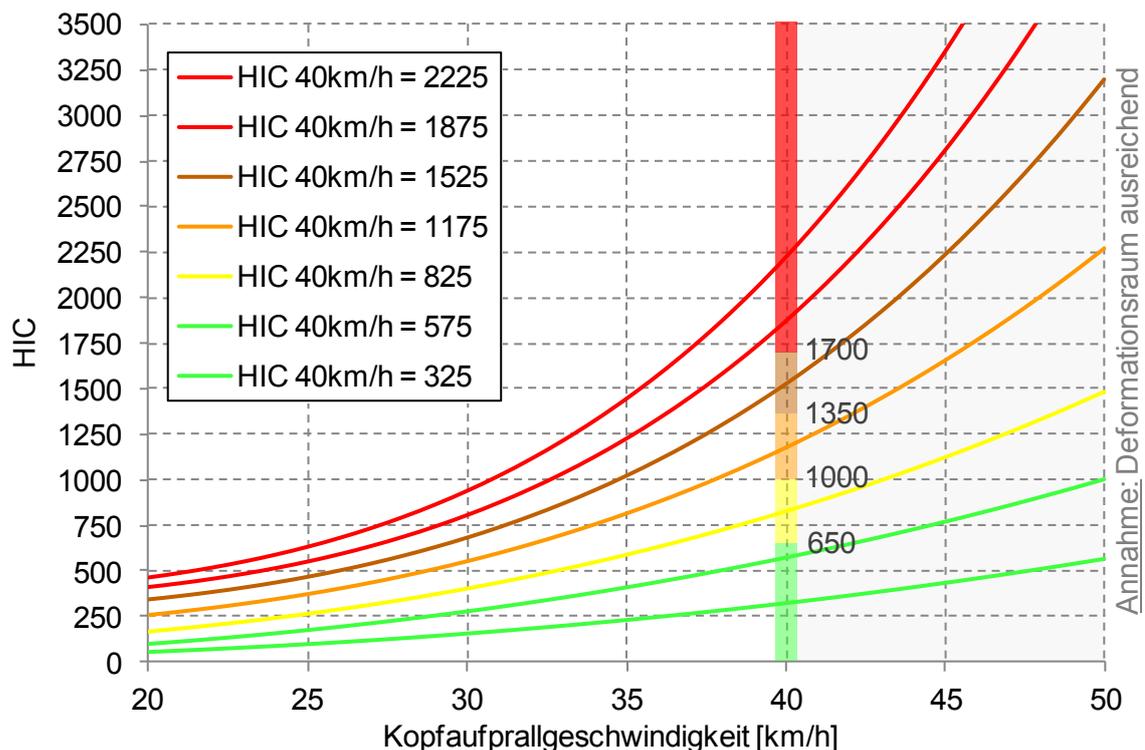


Abb. 4-21: Überarbeitetes HIC-Geschwindigkeits-Kennfeld [HAM14] [HAM13]

Mittels des Geschwindigkeitsfaktors wird das HIC-Geschwindigkeits-Kennfeld in die Indexberechnung implementiert. Die HIC-Werte aus Euro NCAP werden dabei für jedes Feld der Fahrzeugeinteilung in einen Wert gemäß der mittleren Kopfaufprallgeschwindigkeit des zugehörigen WAD-Streifens (vgl. Abb. 4-13) umgerechnet. Dies erfolgt im Rahmen der Bewertung automatisch. Der Geschwindigkeitsfaktor kann demnach als Quotient aus umgerechnetem und ursprünglichem HIC-Wert bei 40 km/h gesehen werden (Gl. 4-2).

$$V_{ij} = \frac{HIC_v}{HIC_{40 \text{ km/h}}} \quad \text{Gl. 4-2}$$

Für Geschwindigkeiten oberhalb der Prüfgeschwindigkeit von 40 km/h muss die Annahme getroffen werden, dass der zur Verfügung stehende Deformationsraum ausreichend ist. Ein Durchschlagen des Kopfes auf eine harte Struktur würde hier zu einem erheblichen Steifigkeitssprung und damit zu einer Unstetigkeit im Kurvenverlauf führen. Desweiteren gilt die in Abb. 4-21 dargestellte Beziehung zwischen HIC-Wert und Impaktorgeschwindigkeit in erster Linie für den Haubenbereich. Für den Windschutzscheibenbereich ist eine simulative Generierung entsprechender Stützstellen aufgrund des komplexen und un stetigen Verhaltens der Windschutzscheibe kaum möglich. Die Steifigkeit ist hier vor allem vom Bruchverhalten abhängig, welches oftmals nicht reproduzierbar ist und für eine einzelne Beschussstelle bereits stark streuen kann. Der Aufbau ausreichend zuverlässiger Simulationsmodelle ist Gegenstand aktueller Forschungsbemühungen. Dennoch sollte das HIC-Geschwindigkeits-Kennfeld aufgrund der zugrunde liegenden steifigkeitsbasierten Ansätze prinzipiell auch auf die Windschutzscheibe übertragbar sein. Beide bezüglich des HIC-Geschwindigkeits-Kennfeld genannten Aspekte, also die Anwendung für Geschwindigkeiten oberhalb der Prüfgeschwindigkeit von 40 km/h sowie die Anwendung auf den Windschutzscheibenbereich, sind im Rahmen von AP4 anhand zweier Kopfimpaktorversuchsreihen an dem im Projekt eingesetzten Versuchsfahrzeug (VW Golf V) untersucht worden. Die Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Anpassungen werden im Folgenden erläutert und sind für das Radfahrer- und Fußgängerschutzbewertungsverfahren gleichermaßen nutzbar.

Die erste Versuchsreihe widmet sich einer erhöhten Prüfgeschwindigkeit im Haubenbereich und sieht drei Testpunkte in laut Euro NCAP grünen Prüffeldern der Haube vor (Abb. 4-22). Dies bezieht sich im Falle des Versuchsfahrzeuges auf das ursprüngliche Euro NCAP-Testprotokoll zum Fußgängerschutz, sodass die Farbe Grün hier einen HIC-Wert kleiner 1000 repräsentiert.

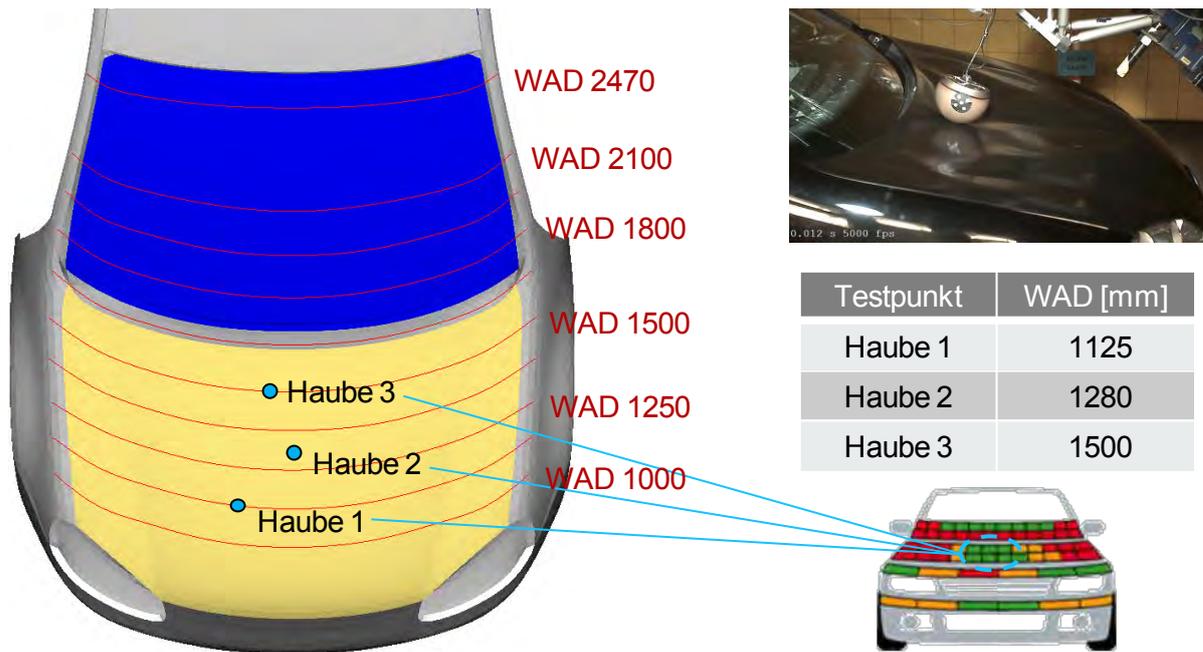


Abb. 4-22: Testpunkte Kopfimpaktorversuchsreihe I

Jeder Testpunkt wird einmal mit der regulären Prüfgeschwindigkeit von 40 km/h und einmal mit einer erhöhten Geschwindigkeit von 45 km/h getestet. Aufgrund der Lage der Testpunkte im Haubenbereich kommt dazu gemäß der Euro NCAP-Prüfbedingungen der 3,5 kg Kinderprüfkopf unter einem Winkel von 50° zum Einsatz. Insgesamt ergeben sich somit sechs Versuche (Abb. 4-23).

Kopfimpaktorversuchsreihe I - Erhöhte Prüfgeschwindigkeit im Haubenbereich	
Fahrzeug	VW Golf V
Testpunkte	3 Punkte in grünen Euro NCAP-Prüffeldern der Haube
Impaktor	Kinderkopf (3,5 kg)
Versuchsparameter	Geschwindigkeit: 40 & 45 km/h pro Testpunkt, Winkel: 50°
1 x 3 x 1 x 2 x 1	6 Versuche

Abb. 4-23: Versuchsmatrix Kopfimpaktorversuchsreihe I

Die in den einzelnen Versuchen erzielten HIC-Werte gehen aus Abb. 4-24 hervor. Zusätzlich werden hier die Ergebnisse bei einer erhöhten Prüfgeschwindigkeit von 45 km/h den gemäß dem HIC-Geschwindigkeits-Kennfeld für diese Geschwindigkeit berechneten HIC-Werten gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass bei ausreichendem Deformationsraum unterhalb der Haube, wie es für die Testpunkte Haube 1 und 2 der Fall ist, die Versuchsergebnisse sehr gut mit den berechneten Werten übereinstimmen und somit das HIC-Geschwindigkeits-Kennfeld auch für höhere Geschwindigkeiten bestätigen. Bei Testpunkt Haube 3 ist hingegen der zur Verfügung stehende Deformationsraum im Falle einer erhöhten Impaktorgeschwindigkeit nicht mehr ausreichend. Hier befindet sich unterhalb des Testpunktes die hintere

Haubenverstärkungsrippe, welche durch die Stirnwand gestützt wird, was letztendlich auch zur Wahl dieses Prüfpunktes durch Euro NCAP geführt hat. Durch diese Konstellation wird bei Erhöhung der Impaktorgeschwindigkeit um 5 km/h der HIC-Wert mehr als verdoppelt, was sich deutlich von den Ergebnissen der beiden anderen Testpunkte abhebt. Wie hoch hier der HIC-Wert bei freier Haubendeformation ausfallen würde geht aus dem berechneten Wert von 698 hervor. Es ist ersichtlich, dass der mögliche Einfluss unterliegender Strukturen hierbei durch das HIC-Geschwindigkeits-Kennfeld nicht abgedeckt werden kann.

Testpunkt	WAD [mm]	HIC bei v = 40 km/h	HIC bei v = 45 km/h	Berechneter HIC für v = 45 km/h
Haube 1	1125	795	1051	1078
Haube 2	1280	596	840	800
Haube 3*	1500	520	1132	698

* Hintere Haubenverstärkungsrippe unterhalb, welche durch Stirnwand gestützt wird

Abb. 4-24: Ergebnisse Kopfpimpaktorversuchsreihe I & Vergleich mit HIC-Geschw.-Kennfeld

Vor dem Hintergrund der hohen Kopfaufprallgeschwindigkeiten der Radfahrer oberhalb des Euro NCAP-Testniveaus (Kapitel 3.6), ist es mit Hinblick auf den Geschwindigkeitsfaktor sinnvoll, ab einer Kopfaufprallgeschwindigkeit größer 45 km/h einen Mindest-HIC-Wert zu definieren. Durch diesen konservativen Ansatz wird dem Umstand Rechnung getragen, dass das Risiko durch unterliegende Strukturen mit höheren Geschwindigkeiten immer mehr zunimmt, der zur Verfügung stehende Deformationsraum also nicht mehr ausreichen ist. Durch einen Mindest-HIC-Wert ist sichergestellt, dass in solchen Fällen die Diskrepanz zwischen berechnetem und tatsächlichem Wert nicht zu groß wird.

Die Definition des Mindestwertes erfolgt dabei in Abhängigkeit der für einen Grid-Punkt zugewiesenen Farbe. Für einen grünen Punkt wird ab 45 km/h eine orange Bewertung, d.h. HIC = 1175 (Mittelwert des HIC-Intervalls), als Mindestniveau vorgegeben. Ein gelber Punkt erhält entsprechend eine braune HIC-Mindesteinstufung, d.h. HIC = 1525 (entspricht ca. 90% AIS3+ Verletzungsrisiko). Für die übrigen Farben der Skala ist aufgrund des steileren Anstiegs der zugehörigen Kurven innerhalb des HIC-Geschwindigkeit-Kennfeldes eine Definition von Mindestwerten nicht erforderlich. Zudem wird der Mindest-HIC nur für Aufprallbereiche definiert, bei denen unterliegende Strukturen zu erwarten sind, also Hauben-, Windlauf- und unterer Windschutzscheibenbereich. Letzterer ist in diesem Zusammenhang so definiert, dass er bis 400 mm jenseits der Abwickellänge der Haubenhinterkante reicht und dann jeweils für den nächsten WAD-Streifen keine Definition eines Mindestwertes mehr erfolgt. Diese Unterscheidung ist in den jeweiligen Bewertungstools der Fahrzeugklassen für das generische Fahrzeugmodell bereits hinterlegt, kann bei Bedarf aber leicht an die Randbedingungen des konkret zu bewertenden Fahrzeuges angepasst werden. Als Orientierung können hier die Bilder des Euro NCAP-Grid-Markups herangezogen werden. Bei Implementierung eines Windschutzscheibenairbags erfolgt die Anwendung der Mindest-HIC-

Definition nicht für vom Airbag abgedeckte bzw. beeinflusste Punkte. Letzteres gilt für den hintersten WAD-Streifen auf der Haube, da sich unter diesem der Airbag entfaltet.

Die zweite Versuchsreihe untersucht die Geschwindigkeitsabhängigkeit des HIC im Windschutzscheibenbereich und soll Aufschluss darüber geben, ob das HIC-Geschwindigkeits-Kennfeld auch hier sinnvoll anwendbar ist. Dazu werden ausgesuchte Punkte auf der Windschutzscheibe des Versuchsfahrzeugs mit zwei Prüfkörpergeschwindigkeiten beschossen und so versuchstechnische Stützstellen für den Windschutzscheibenbereich generiert. Die Versuchsparameter gehen aus Abb. 4-25 hervor. Da die Testpunkte innerhalb bzw. jenseits des Euro NCAP-Erwachsenenprüfbereichs liegen, erfolgen die Tests mit dem Erwachsenenprüfkörper (4,5 kg) unter einem Winkel von 65°.

Kopfimpaktorversuchsreihe II - Geschwindigkeitsabhängigkeit des HIC im WSS-Bereich	
Fahrzeug	VW Golf V
Testpunkte	Nähe A-Säule, Nähe Windlauf & Ende Euro NCAP-Prüfbereich
Impaktor	Erwachsenenkopf (4,5 kg)
Versuchsparameter	Geschwindigkeit: 40 & 30 km/h pro Testpunkt, Winkel: 65°
1 x 3 x 1 x 2 x 1	6 Versuche

Abb. 4-25: Versuchsmatrix Kopfimpaktorversuchsreihe II

Für alle drei Testpunkte betragen die Impaktorgeschwindigkeiten jeweils 40 und 30 km/h. Dabei liegt der erste Punkt (WSS 1) in der Nähe der A-Säule (Abb. 4-26). Der Abstand zum seitlichen Scheibenrand beträgt einen Impaktordurchmesser (165 mm). Testpunkt WSS 2 befindet sich in Fahrzeugmitte bei einer Abwickellänge von 1950 mm. Es gibt hier keine unterliegenden Strukturen innerhalb von 100 mm gemessen in Aufprallrichtung des Impaktors. Der dritte Testpunkt (WSS 3) markiert das Ende des Euro NCAP-Prüfbereichs, was einer Abwickellänge von 2100 mm entspricht. Seine Position in y-Richtung befindet sich zwischen A-Säule und Fahrzeugmitte.

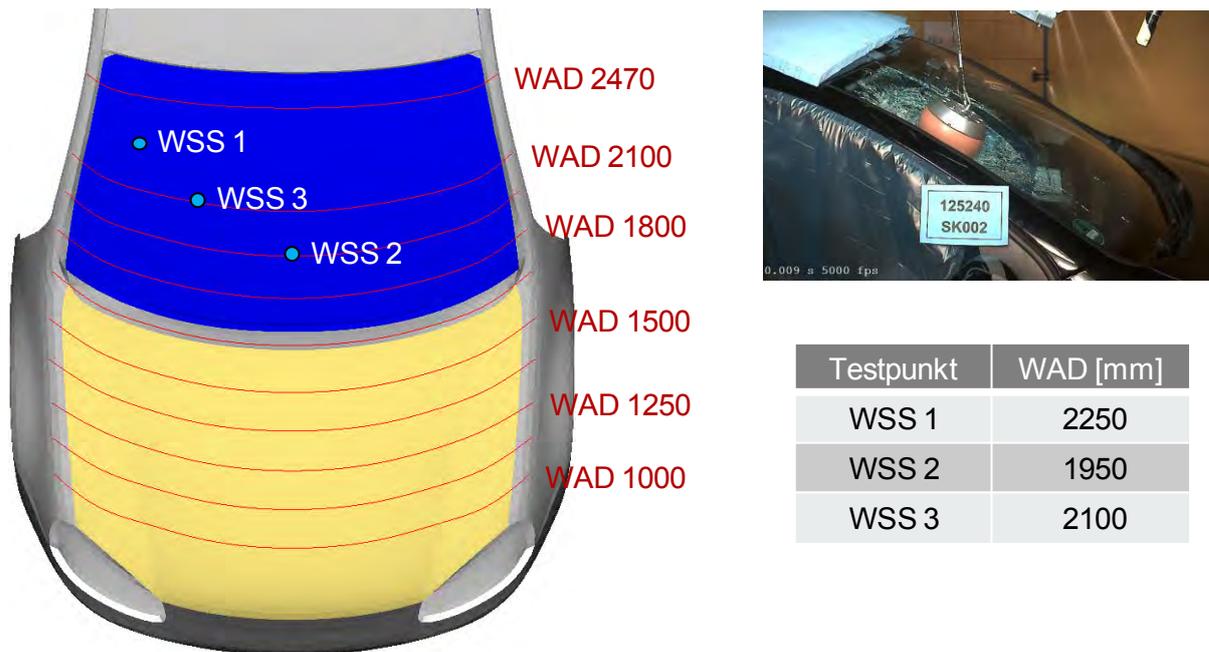


Abb. 4-26: Testpunkte Kopfeimpaktorversuchsreihe II

In Abb. 4-27 werden die Ergebnisse der Versuchsreihe wiederum den anhand des HIC-Geschwindigkeits-Kennfelds berechneten HIC-Werten gegenübergestellt. Für die Testpunkte WSS 1 und WSS 3 ist die Übereinstimmung sehr gut. Auch im Falle von Punkt WSS 2 wird die Farbeinstufung richtig vorhergesagt, doch kommt es hier zu einem Kontakt des Impaktors mit der Instrumententafel, dessen Verzögerungspeak beim 30 km/h-Test nur noch ein Drittel des Betrages vom 40 km/h-Test ausmacht und somit nicht mehr signifikant ist.

Testpunkt	WAD [mm]	HIC bei v = 40 km/h	HIC bei v = 30 km/h	Berechneter HIC für v = 30 km/h
WSS 1	2250	439	143	214
WSS 2*	1950	1003	98	481
WSS 3	2100	1085	498	516

* Kontakt mit Instrumententafelträger

Abb. 4-27: Ergebnisse Kopfeimpaktorversuchsreihe II & Vergleich mit HIC-Geschw.-Kennfeld

Die durch den Aufprall des Impaktors auf die Instrumententafel bei 40 km/h hervorgerufene Überhöhung des HIC-Wertes wird bei Anwendung des HIC-Geschwindigkeit-Kennfeldes so behandelt, als wäre sie allein durch die Struktursteifigkeit der Windschutzscheibe hervorgerufen worden, sodass der für 30 km/h berechnete Wert entsprechend höher ausfällt als das tatsächliche Prüfergebnis. Hier liegt im Vergleich zu den Tests der Versuchsreihe I eine umgekehrte Problematik vor. Da die Werte durch das Kennfeld aber zur sicheren Seite hin abgeschätzt werden und zudem die Farbvorhersage stimmt, sind diesbezüglich keine weiteren Anpassungen erforderlich. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen auch für den Wind-

schuttscheibenbereich die Gültigkeit der Geschwindigkeitsfaktordefinition, sodass diese wie im Vorgängerprojekt für die gesamte Fahrzeugfront angewendet wird.

Abb. 4-28 veranschaulicht für das Beispielfahrzeug wie die seitens Euro NCAP ermittelten HIC-Werte (Abb. 4-17) durch den Geschwindigkeitsfaktor jeweils für Kinder und Erwachsene an die mittleren Kopfaufprallgeschwindigkeiten aus der Simulation angepasst werden.

Modifizierte HIC Werte für Gruppe der Kinder (HIC _v)														
7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7
7988	3281	729	789	789	789	789	789	789	789	789	789	729	3281	7988
6133	2552	609	659	659	659	659	659	659	659	659	659	609	2552	6133
5531	2316	567	613	613	613	613	613	613	613	613	613	567	2316	5531
4991	2103	528	571	571	571	571	571	571	571	571	571	528	2103	4991
4746	2007	697	697	697	551	551	551	551	551	697	697	697	2007	4746
4512	1915	1915	1195	1195	940	940	1195	1195	1195	1915	1915	1915	1915	4512
4287	4200	1827	1827	1748	1827	1827	1827	1827	1827	1748	1827	1827	4200	4287
	868	796	624	624	624	624	868	868	624	868	868	1096	868	
	1036	834	637	600	600	600	600	600	600	600	834	834	1036	
	823	823	593	434	434	434	342	434	434	593	593	823	1035	
	1035	823	593	537	434	434	434	434	593	537	739	823	1035	

Modifizierte HIC Werte für Gruppe der Erwachsenen (HIC _v)														
7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7
5975	2490	2490	2490	2490	2490	2490	2490	2490	2490	2490	2490	2490	2490	5975
7988	3281	729	789	789	789	789	789	789	789	789	789	729	3281	7988
6133	2552	609	659	659	659	659	659	659	659	659	659	609	2552	6133
5531	2316	567	613	613	613	613	613	613	613	613	613	567	2316	5531
4991	2103	528	571	571	571	571	571	571	571	571	571	528	2103	4991
4746	2007	697	697	697	551	551	551	551	551	697	697	697	2007	4746

Abb. 4-28: Verteilung der HIC-Werte für das Beispielfahrzeug nach Anwendung des Geschwindigkeitsfaktors (Bewertungstool)

Grau eingefärbte Fahrzeugfelder bzw. WAD-Streifen sind ohne Relevanz und bekommen daher keine Werte zugewiesen (vgl. Abb. 4-13). Die mittleren Kopfaufprallgeschwindigkeiten liegen beim generischen Fahrzeugmodell der Klasse Kompakt allesamt unterhalb von 45 km/h, sodass es hier zu keiner Anwendung der Mindest-HIC-Definition kommt.

4.1.5.3 Winkelfaktor

Im Vergleich zur Kopfaufprallgeschwindigkeit ist der Einfluss des Kopfaufprallwinkels auf das Verletzungsrisiko des Radfahrers bzw. Fußgängers schwerer zu erfassen, da hier auch Belastungen des Hals-Nacken-Bereichs von Bedeutung sind. Bezogen auf den für die Indexberechnung herangezogenen HIC-Wert erfolgt daher nur eine qualitative Berücksichtigung des Kopfaufprallwinkels. Generell wirken sich kleinere Winkel positiv auf den HIC-Wert aus, da der Kopf bzw. der Impaktor dadurch stärker abgleitet. Bei größeren Winkeln wird hingegen mehr kinetische Energie in die Struktur eingeleitet, was zusätzlichen Deformationsraum erfordert und somit das Risiko eines Durchschlagens des Kopfes auf harte Strukturen erhöht.

Das Kriterium für die Definition des Winkelfaktors $W_{i,WAD}$ bildet die Abweichung des für den jeweiligen WAD-Bereich ermittelten durchschnittlichen Aufprallwinkels (vgl. Abb. 4-13) vom entsprechenden Euro NCAP-Impaktorwinkel. Falls diese mehr als 10° beträgt, führt der Winkelfaktor in allen Feldern des WAD-Bereichs zu einer qualitativen Reduzierung bzw. Erhöhung des HIC-Wertes um 10% (Abb. 4-29).

$W_{i,WAD}$	Mittlerer Aufprallwinkel α_\varnothing	
	Kinderkopfprüfbereich (50°)	Erwachsenenkopfprüfbereich (65°)
0,9	$\alpha_{\max} < 40^\circ$	$\alpha_{\max} < 55^\circ$
1,0	$40^\circ \leq \alpha_{\max} \leq 60^\circ$	$55^\circ \leq \alpha_{\max} \leq 75^\circ$
1,1	$\alpha_{\max} > 60^\circ$	$\alpha_{\max} > 75^\circ$

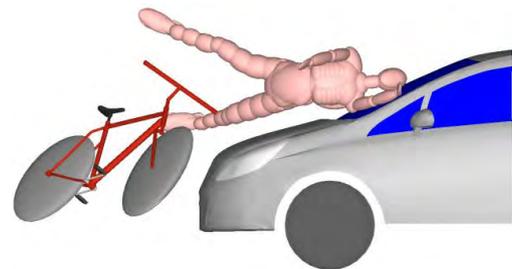


Abb. 4-29: Definition des Winkelfaktors

Während im Vorgängerprojekt eine simulative Überprüfung des qualitativen Winkelfaktors mit dem EEVC WG17-Erwachsenenkopfimpaktor (4,8 kg) für zwei Positionen auf einem Haubenmodell durchgeführt wurde, erfolgt in [HAM14] eine weitere Untersuchung mit dem ISO-Kinderkopfprüfkörper (3,5 kg) an verschiedenen Positionen zweier Haubenmodelle und mit Winkeln zwischen 30° und 85° . Bei einer Variation des Impaktorwinkels von $\pm 10^\circ$ beträgt die Änderung des HIC-Wertes in allen Fällen mindestens 10%. Die Winkelabhängigkeit nimmt dabei mit der Steifigkeit der Aufprallstelle zu und kann bis zu 30% betragen, sodass eine insgesamt konservative Abschätzung des Winkeinflusses gewährleistet ist. Diese ist mit Hinblick auf die reale Unfallkinematik auch sinnvoll, da die freifliegenden Prüfkörper nicht die Biomechanik des Hals/Nackenbereichs bzw. des Oberkörpers berücksichtigen. Andererseits ist für sämtliche Winkel größer als der jeweilige Euro NCAP-Prüfwinkel zu beachten, dass durch einen längeren Deformationsweg die Wahrscheinlichkeit eines eventuellen Durchschlagens des Impaktors auf unterliegende harte Strukturen des Motorraums zunimmt, was zu einer nochmaligen Erhöhung des HIC-Wertes führen würde.

Bei der Anwendung des Winkelfaktors ist zu beachten, dass bei Fahrzeugen, die nach 2010 durch Euro NCAP getestet worden sind, im Bereich zwischen WAD 1500 mm und 1700 mm

mit dem Kinderkopf getestet wird, sofern der Prüfpunkt auf der Haube liegt. In diesem Falle wäre für die WAD-Streifen 6 und 7 der Fahrzeugeinteilung der Kinderkopfwinkel zur Bestimmung des Winkelfaktors heranzuziehen. Sollte ein WAD-Streifen teils auf der Haube und teils auf der WSS verlaufen, so entscheidet die höhere Anzahl zugewiesener GRID-Punkte auf Haube bzw. WSS über den zu verwendenden Prüfwinkel zur Bestimmung des Winkelfaktors. Innerhalb der Bewertungstools sind die WAD-Streifen 6 und 7 entsprechend markiert (Abb. 4-33) und können durch Zuweisung der Winkelfaktordefinition des Kinder- bzw. Erwachsenenprüfbereichs, d.h. durch Kopieren der Formeln der Streifen 5 bzw. 8, an die Randbedingungen des konkret zu bewertenden Fahrzeuges angepasst werden.

Wie zuvor beim Geschwindigkeitsfaktor soll auch für den Winkelfaktor die Gültigkeit im Windschutzscheibenbereich anhand von Impaktorversuchen überprüft werden. Dazu ist im Rahmen von AP4 eine dritte Versuchsreihe vorgesehen, bei der die Winkelabhängigkeit des HIC im Windschutzscheibenbereich für eine Impaktorgeschwindigkeit von 40 km/h untersucht wird (Abb. 4-30). Dazu werden mit den Testpunkten WSS 1 und WSS 3 zwei der drei Positionen aus Versuchsreihe II herangezogen (Abb. 4-26). Für beide Testpunkte erfolgen jeweils zwei Beschüsse unter einem Winkel von 50° sowie 70°, was der maximal durch die eingesetzte Prüfanlage umsetzbare Prüfwinkel ist. Die Ergebnisse für einen Impaktorwinkel von 65° liegen aufgrund der Daten aus Kopfimpaktorversuchsreihe II bereits vor.

Kopfimpaktorversuchsreihe III - Winkelabhängigkeit des HIC im WSS-Bereich	
Fahrzeug	VW Golf V
Testpunkte	Nähe A-Säule & Ende Euro NCAP-Prüfbereich (WSS 1 & 3)
Impaktor	Erwachsenenkopf (4,5 kg)
Versuchsparameter	Geschwindigkeit: 40 km/h, Winkel: 50° & 70° pro Testpunkt
1 x 2 x 1 x 1 x 2	4 Versuche

Abb. 4-30: Versuchsmatrix Kopfimpaktorversuchsreihe III

In Abb. 4-31 sind die HIC-Werte der beiden Testpunkte jeweils für die drei betrachteten Impaktorwinkel aufgeführt. Diese werden den anhand der Winkelfaktordefinition qualitativ ermittelten Werten gegenübergestellt. Die Versuchsergebnisse liefern für den Windschutzscheibenbereich keine Bestätigung bezüglich der Definition des Winkelfaktors. So ergibt sich im Falle von Testpunkt WSS 1 für einen niedrigeren Impaktorwinkel eine Erhöhung des HIC-Wertes während bei erhöhtem Impaktorwinkel für beide Testpunkte der HIC niedriger ausfällt. Die geringe Anzahl an Versuchen lässt allerdings keine generellen Aussagen zu. Vergleicht man die Versuchsergebnisse mit den qualitativ bestimmten HIC-Werten, so zeigt sich nur für Testpunkt WSS 3 und einem Impaktorwinkel von 50° eine wirkliche Übereinstimmung. Dabei ändern sich für einen Winkel von 70° die qualitativen Werte im Vergleich zum Basiswinkel von 65° nicht, da der Winkelfaktor erst bei einer Winkelabweichung von mehr als 10° zum Tragen kommt (Abb. 4-29).

Testpunkt	WAD [mm]	HIC bei $\alpha = 65^\circ$	HIC bei $\alpha = 50^\circ$	HIC bei $\alpha = 70^\circ$	Qualitativer HIC für $\alpha = 50^\circ$	Qualitativer HIC für $\alpha = 70^\circ$
WSS 1	2250	439	497 	388 	395	439*
WSS 3	2100	1085	997 	816 	977	1085*

* Keine Änderung gegenüber $\alpha = 65^\circ$ (Winkelfaktor = 1)

Abb. 4-31: Ergebnisse Kopffimpaktorversuchsreihe III & Vergleich mit Winkelfaktordefinition

Für Testpunkt Haube 2 (Abb. 4-22) ist im Rahmen des BAST-Projektes ein Impaktorbeschuss unter einem Winkel von 60° erfolgt. Vergleicht man den entsprechenden qualitativen HIC-Wert, welcher auf Basis des Versuchsergebnisses bei einem Winkel von 50° (Kopffimpaktorversuchsreihe I) berechnet wird, so bestätigt sich die Winkelfaktordefinition für den Haubenbereich (Abb. 4-32 oben). Vergleicht man ferner den HIC-Wert eines BAST-Versuchs in Fahrzeugmitte bei einer WAD von 1800 mm und unter einem Winkel von 70° mit dem entsprechenden Euro NCAP-Prüfergebnis des Versuchsfahrzeuges für diesen Punkt, so zeigt sich auch im unteren Windschutzscheibenbereich eine Erhöhung des HIC-Wertes für größere Aufprallwinkel. Hinsichtlich des Euro NCAP-Wertes ist allerdings zu beachten, dass dieser noch auf einem Beschuss mit dem 4,8 kg Erwachsenenprüfkörper beruht. Im Gegensatz zu den Versuchsergebnissen in Abb. 4-31 kommt es im unteren Windschutzscheibenbereich zu einem ausgeprägten Kontakt mit der Instrumententafel.

Testpunkt	WAD [mm]	Kinderkopf 3,5 kg	HIC	BAST-Tests Kinderkopf	HIC	Qualitativer HIC (Winkelfaktor)	
Haube 2	1280	50°	596	60°	696	60°	656
Testpunkt	WAD [mm]			BAST-Tests Erwk. 4,5 kg	HIC	Euro NCAP	HIC
WSS 4	1800			70°	1666	65°	950*

* 4,8 kg Erwachsenenkopf

Abb. 4-32: Zusätzliche Versuchsdaten (Impaktorgeschwindigkeit = 40 km/h)

Aufgrund der Versuchsdaten wird der Winkelfaktor nur im Hauben-, Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereich angewendet. Letzterer wird analog zur Definition des Mindest-HIC-Wertes bei erhöhter Kopfaufprallgeschwindigkeit (Kapitel 4.1.5.2) bis 400 mm jenseits der Abwickellänge der Haubenhinterkante definiert, sodass der Winkelfaktor jeweils für den nächsten WAD-Streifen nicht mehr angewendet wird. Die betroffenen WAD-Streifen sind im Bewertungstool der jeweiligen Fahrzeugklassen gemäß der Geometrie des generischen Fahrzeugmodells grau hinterlegt. Durch Kopieren der Formeln eines Streifens aus dem unteren Windschutzscheibenbereich in den nächsten grauen Streifen oder umgekehrt kann diese Zuweisung bei Bedarf entsprechend an die Abmessungen des konkret zu bewertenden Fahrzeuges angepasst werden. Im Falle des Beispielfahrzeuges ist dies für den WAD-Streifen 10 erforderlich (Abb. 4-33). Sollten WAD-Streifen vor oder in unmittelbarer Nähe der

Haubenvorderkante liegen, was bei OneBox-Fahrzeugen der Fall sein kann, wird der Winkel- faktor hier ebenfalls ausgesetzt.

Mittelwert Aufprallwinkel				
	Kinder	Erwachsene	NCAP	WAD [mm]
13	0,0	69,0	65°	Dach
12	70,8	70,8		2100 - WSS
11	61,8	61,8		2000 - 2100
10	57,9	57,9		1900 - 2000
9	54,1	54,1		1800 - 1900
8	53,5	53,5	65°	1700 - 1800
7	53,0	0,0		1600 - 1700
6	52,4	0,0	50°	1500 - 1600
5	51,8	0,0		1400 - 1500
4	51,2	0,0		1300 - 1400
3	51,0	0,0		1200 - 1300
2	51,0	0,0		1100 - 1200
1	0,0	0,0	1000 - 1100	

Winkelfaktor $W_{i,WAD}$				
	Kinder	Erwachsene	NCAP	WAD [mm]
13	0,0	1,0	65°	Dach
12	1,0	1,0		2100 - WSS
11	1,0	1,0		2000 - 2100
10	1,0	1,0		1900 - 2000
9	0,9	0,9		1800 - 1900
8	0,9	0,9	65°	1700 - 1800
7	0,9	0,0		1600 - 1700
6	0,9	0,0	50°	1500 - 1600
5	1,0	0,0		1400 - 1500
4	1,0	0,0		1300 - 1400
3	1,0	0,0		1200 - 1300
2	1,0	0,0		1100 - 1200
1	0,0	0,0	1000 - 1100	

Abb. 4-33: Bestimmung der Winkelfaktoren für das Beispielfahrzeug (Bewertungstool)

Der Winkelfaktor wird in den Excel-Tools zur Indexberechnung auf Basis der mittleren Kopfaufprallwinkel der einzelnen WAD-Streifen (Abb. 4-13) automatisch bestimmt und mit den an die mittleren Kopfaufprallgeschwindigkeiten angepassten HIC-Werten (Abb. 4-28) multipliziert. Es ergibt sich eine kinematikbezogene Darstellung der HIC-Werte über der Fahrzeugfront (Abb. 4-34), auf deren Basis die im Folgenden vorgestellte Indexberechnung erfolgt. Auf die einzelnen Kinematikfaktoren wird dabei im Rahmen der Ausführungen zur Berechnungsformel nochmals eingegangen.

letzung. Verschiedene Quellen in [HAM14] zeigen für den Kopfanprall eines Fußgängers allerdings deutlich höhere Risikowerte in Abhängigkeit des HIC. Im Zuge der Anpassungen am Bewertungsverfahren wird daher eine neue Verletzungsrisikokurve analog zu [HAM14] implementiert, die den angeführten Verletzungswahrscheinlichkeiten gerecht wird. Diese basiert auf Arbeiten der US-Bundesbehörde für Straßen- und Fahrzeugsicherheit (National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA) zum Kopfaufprall im oberen Fahrzeuginnenraum gemäß der gesetzlichen Vorschrift FMVSS 201 und ist in Abb. 4-35 dargestellt.

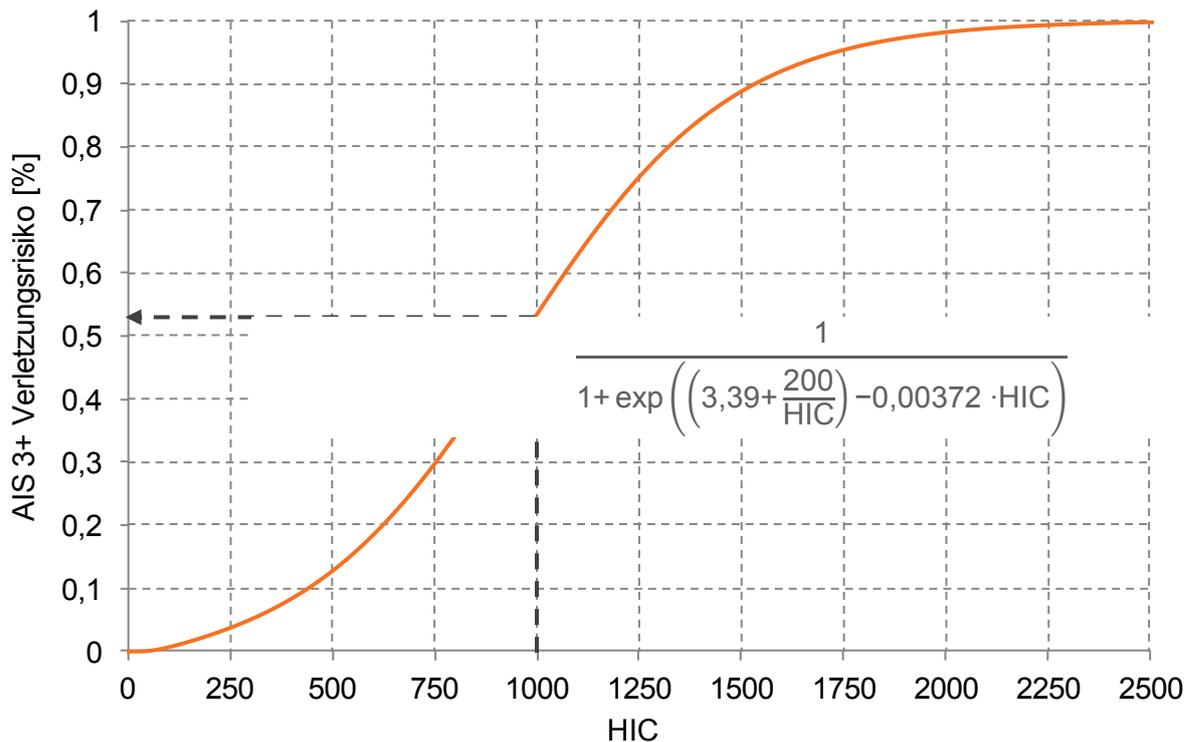


Abb. 4-35: Verletzungsrisikofunktion für eine AIS 3+ Kopfverletzung [BIS95]

Die Kurve weist einem HIC-Wert von 1000 ein Risiko für eine schwere Kopfverletzung von 53% zu. Mittels der zugehörigen Funktionsvorschrift kann auf Basis der im vorherigen Modul angepassten HIC-Werte sämtlichen Feldern der Fahrzeugeinteilung ein entsprechendes Verletzungsrisiko zugewiesen werden.

Die vorgestellte Verletzungsrisikofunktion bildet den letzten und zentralen Bestandteil der Indexberechnungsformel. Das für jedes Feld der Fahrzeugeinteilung ermittelte Verletzungsrisiko wird darin unter Berücksichtigung der Relevanz der Bereiche aufsummiert und ergibt den Kopfindexwert der Fahrzeugfront I_{Kopf} (Gl. 4-3), welcher Werte zwischen 0 und 1 annimmt. Aufgrund der Implementierung des Grid-Ansatzes sowie einer neuen Verletzungsrisikofunktion in das Bewertungsverfahren, unterscheidet sich die Indexberechnungsformel grundlegend von der des Vorgängerprojektes. Anhand Gl. 4-3 wird deutlich, wie die Daten aus den einzelnen Modulen des Bewertungsverfahrens in die Indexberechnung einfließen. Die Definition der Fahrzeugeinteilung spiegelt sich in den Indizes i und j wieder, deren Wertebereich im Zuge der Umsetzung des Euro NCAP-Grids angepasst worden ist (Abb. 4-36).

$$I_{\text{Kopf}} = \sum_{i=1}^{13} R_{i,WAD} \cdot \left(\sum_{j=1}^{n_i} \frac{R_{ij,lateral}}{1 + \exp \left(\left(3,39 + \frac{200}{HIC_{ij} \cdot V_{ij} \cdot W_{i,WAD}} \right) - 0,00372 \cdot HIC_{ij} \cdot V_{ij} \cdot W_{i,WAD} \right)} \right) \quad \text{Gl. 4-3}$$

i	Laufvariable der Streifen in Fahrzeuglängsrichtung (WAD-Bereiche)
$R_{i,WAD}$	Relevanzfaktor in Fahrzeuglängsrichtung, abh. vom WAD-Bereich
j	Laufvariable der Felder in Fahrzeugquerrichtung
n_i	Anzahl der Grid-Punkte im jeweiligen WAD-Bereich i
HIC_{ij}	Euro NCAP-HIC-Wert im jeweiligen Feld der Fahrzeugeinteilung
V_{ij}	Geschwindigkeitsfaktor im jeweiligen Feld der Fahrzeugeinteilung
$W_{i,WAD}$	Winkelfaktor im jeweiligen WAD-Bereich
$R_{ij,lateral}$	Relevanzfaktor in Fahrzeugquerrichtung, abh. vom WAD-Bereich

Abb. 4-36: Indexberechnung

Die Indizes i und j adressieren die einzelnen Felder der Fahrzeugeinteilung und versehen diese über die entsprechenden Faktoren mit der zugehörigen Relevanz. Dabei repräsentiert der Index i die 13 WAD-Streifen in Fahrzeuglängsrichtung während sich für den Index j sowie den entsprechenden Relevanzfaktor $R_{ij,lateral}$ aufgrund der variierenden Anzahl der Grid-Punkte in den WAD-Bereichen eine Abhängigkeit vom Index i ergibt (Kapitel 4.1.5.1). Die jeweilige Anzahl der Prüfpunkte in Querrichtung wird dabei durch die Variable n_i abgebildet. Das Verletzungsrisiko in den einzelnen Feldern der Fahrzeugeinteilung wird zum einen durch die Multiplikation mit den Relevanzfaktoren hinsichtlich der Aufprallwahrscheinlichkeiten gewichtet und zum anderen über die in die Verletzungsrisikofunktion integrierten Kinematikfaktoren V_{ij} und $W_{i,WAD}$ gezielt an die simulativ ermittelten mittleren Kopfaufprallgeschwindigkeiten und -winkel angepasst. Der Geschwindigkeitsfaktor V_{ij} ist dabei abhängig von der mittleren Kopfaufprallgeschwindigkeit im WAD-Bereich sowie dem Euro NCAP-HIC-Wert des jeweiligen Feldes (HIC_{ij}) (Kapitel 4.1.5.2). Der Winkelfaktor $W_{i,WAD}$ wird hingegen nur durch den mittleren Kopfaufprallwinkel des WAD-Bereichs bestimmt und weist keine Abhängigkeit in Fahrzeugquerrichtung auf (Kapitel 4.1.5.3).

Die Indexberechnung erfolgt für Radfahrer und Fußgänger analog, d.h. auf Basis der gleichen Berechnungsformel. Für das betrachtete Beispielfahrzeug ergibt sich für Kinder und Erwachsene mit 0,51 bzw. 0,48 ein ähnlich hoher Radfahrerindexwert (Kapitel 4.2.1). Beim Fußgängerindex erzielt die Gruppe der Kinder einen Wert von 0,12 während dieser für die Gruppe der Erwachsenen 0,33 beträgt (Kapitel 4.3.1).

Die Berechnung eines Indexwertes zur Beinbelastung ist im Rahmen dieses Projekts nicht vorgesehen und auch nicht Teil der Anpassungen am Bewertungsverfahren. Eine radfahrer-spezifische Bewertung der Beinbelastung ist auf Basis der seitens Euro NCAP ermittelten Prüfergebnisse nicht möglich, sodass die Eingangsdaten des Bewertungsverfahrens hier

keine Differenzierung zur Gruppe der Fußgänger erlauben würden. Mit Hinblick auf das Fußgängerschutzverfahren wäre zur Bewertung aktueller Fahrzeuge hinsichtlich der Beinbelastung eine Implementierung neuer Verletzungsrisikokurven für die Parameter des seit 2014 durch Euro NCAP eingesetzten Flex PLI-Beinprüfkörpers erforderlich.

4.1.6.1 Anwendung des Excel-Tools zur Indexberechnung

Das Excel-Tool zur Indexberechnung besteht aus verschiedenen Tabellenblättern, gemäß den jeweiligen Systemausstattungen und Kollisionsgeschwindigkeiten für die ein Index ermittelt wird. Jede Indexberechnung umfasst dabei zwei Tabellenblätter, eines zur Eingabe der Euro NCAP-Prüfergebnisse und entsprechenden Ausgabe des Indexwertes sowie eines in dem die eigentliche Indexberechnung erfolgt. Die Tabellenblätter sind so gruppiert, dass sämtliche Blätter zur Indexberechnung am Ende angeordnet sind. Diese sind für den Anwender nicht relevant.

Ein Vergleich der anhand des überarbeiteten Bewertungsverfahrens berechneten Indexwerte mit denen des alten Verfahrens ist aufgrund der zahlreichen Änderungen sowie der verbesserten Eingangsdaten nicht mehr möglich. Allerdings lassen sich über ein spezielles Tabellenblatt innerhalb des neuen Bewertungstools, welches ganz vorne angeordnet und dessen Register gelb eingefärbt ist, auch für ältere Fahrzeuge, d.h. solche die nicht nach dem GRID-Ansatz geprüft wurden, entsprechende Radfahrer- und Fußgängerindexergebnisse für das Basisfahrzeug berechnen. Diese Werte sind dann mit aktuellen Indexergebnissen vergleichbar, auch wenn die zugrunde liegenden Struktureigenschaften eine geringere Auflösung aufweisen. Die Bezeichnung des Tabellenblatts endet entsprechend mit dem Ausdruck „Klassisch“ während die anderen Tabellenblätterbenennungen mit dem Ausdruck „GRID“ enden und im Folgenden am Beispiel des Beispielfahrzeuges und einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h näher erläutert werden.

Die Tabellenblätter zur Datenerfassung und Ausgabe des Indexergebnisses sind in die verschiedenen Bereiche „Aufprallwahrscheinlichkeiten in Längsrichtung“, „Aufprallwahrscheinlichkeiten in Querrichtung“, „Ergebnisübersicht“, „Euro NCAP Daten“, „Kinematikfaktor“ sowie „Bewertungsindex“ gegliedert. Eingaben seitens des Anwenders sind allein im Bereich „Euro NCAP Daten“ erforderlich. Die Werte für die Aufprallwahrscheinlichkeiten und Kinematikfaktoren sind bereits hinterlegt und beziehen sich auf die Simulationsergebnisse des generischen Klassenvertreters (vgl. Abb. 4-13). Entsprechend gibt es für jede Fahrzeugklasse ein separates Bewertungstool. Die hinterlegten Daten können bei Bedarf durch fahrzeugmodell-spezifische Werte auf Basis entsprechender Simulationen ersetzt werden.

Generell sind alle Felder in denen Eingaben seitens des Anwenders notwendig sind weiß hinterlegt. Felder mit bereits vorgegebenen oder automatisch bestimmten Daten sind orange eingefärbt. Dazu zählen auch die zu Beginn des Tabellenblatts hinterlegten Aufprallwahrscheinlichkeiten in Längsrichtung, welche direkt aus dem jeweiligen Excel-Tool zur Simulationsauswertung kopiert wurden. Die Ausgabemaske ist kompatibel zum Format des Bewertungstools, sodass bei entsprechender Auswertung eine Übertragung fahrzeugmodell-spezifischer

scher Simulationsdaten leicht möglich ist. In diesem Falle würden die generischen Werte überschrieben. Neben den Aufprallwahrscheinlichkeiten in Längsrichtung sind im oberen Teil des Tabellenblatts auch die Aufprallwahrscheinlichkeiten in Querrichtung aufgeführt (Abb. 4-37). Diese werden auf Basis der im mittleren Teil einzutragenden Euro NCAP-Daten automatisch bestimmt. Dazu wird pro WAD-Bereich die Anzahl der Grid-Punkte bzw. Felder in Querrichtung bestimmt und deren Kehrwert gebildet. Im oberen Teil des Bewertungstools sind auf der rechten Seite zudem bereits die unten für Kinder und Erwachsene berechneten Indexwerte angegeben, sodass man in den einzelnen Tabellenblättern nicht nach unten scrollen muss, um die entsprechenden Indexergebnisse abzulesen.

Radfahrer-Bewertungsverfahren

fka

Kompaktklasse

Aufprallwahrscheinlichkeiten in Längsrichtung

Relevanzfaktoren $R_{i,WAD}$ [%] des generischen Modells:

	Kinder	Erwachsene	WAD [mm]
13	0.000	0.012	Dachbereich
12	0.041	0.648	2100 - Ende WSS
11	0.071	0.217	2000 - 2100
10	0.110	0.087	1900 - 2000
9	0.182	0.030	1800 - 1900
8	0.206	0.005	1700 - 1800
7	0.178	0.000	1600 - 1700
6	0.105	0.000	1500 - 1600
5	0.067	0.000	1400 - 1500
4	0.027	0.000	1300 - 1400
3	0.009	0.000	1200 - 1300
2	0.001	0.000	1100 - 1200
1	0.000	0.000	1000 - 1100

Aufprallwahrscheinlichkeiten in Querrichtung

Relevanzfaktor $R_{j,Front}$ [%]:

	WAD [mm]
13	0.067 Dachbereich
12	0.067 2100 - Ende WSS
11	0.067 2000 - 2100
10	0.067 1900 - 2000
9	0.067 1800 - 1900
8	0.067 1700 - 1800
7	0.067 1600 - 1700
6	0.067 1500 - 1600
5	0.077 1400 - 1500
4	0.077 1300 - 1400
3	0.077 1200 - 1300
2	0.077 1100 - 1200
1	0.077 1000 - 1100

Ergebnisübersicht

Kopffindex

Kinder: **0.51**

Erwachsene: **0.51**

Vorgegebener oder errechneter Wert

Eingabe erforderlich

Abb. 4-37: Oberer Teil des Bewertungstools (Beispielfahrzeug, 40 km/h)

Einen zentralen Bestandteil des Bewertungstools bildet die Übertragung der Euro NCAP-Daten des zu bewertenden Fahrzeuges auf die Fahrzeugfronteinteilung (Abb. 4-16), welche in Kapitel 4.1.4 bereits ausführlich beschrieben wurde. Die Eingabemaske entspricht dem Format der aktuellen Euro NCAP-Spreadsheets, d.h. die dort aufgeführte Farbverteilung des Euro NCAP-Grids kann direkt in das Tabellenblatt des Bewertungstools hineinkopiert werden (Strg+c & Strg+v). Dabei werden auch die Markierungen (schwarzes „x“) für die seitens Euro NCAP abgeprüften Felder übertragen. In einem zweiten Schritt sind dann die erforderlichen Angaben zu den Übergängen bzw. Sprüngen der Grid-Reihen in Bezug auf die WAD-Streifen zu machen (Tabelle „Übertragung Grid -> WAD“) sowie die Prüfergebnisse der durch Euro NCAP getesteten Grid-Punkte samt Position im Grid, d.h. Reihen- und Spaltenangabe, in die Tabelle „Ergebnisse Test- & Blue Points“ einzutragen. Im Anschluss hat der Anwender gemäß der Ausführungen in Kapitel 4.1.4 noch die Möglichkeit, die Testergebnisse einer Fahrzeugseite auf die andere Seite zu spiegeln, was sinnvoll ist sofern die Farbvorhersage des gespiegelten Grid-Punktes mit der des getesteten Punktes übereinstimmt. Dazu wird das Prüfergebnis nochmals in die Tabelle eingetragen und dabei das Vorzeichen der Spaltenangabe umgekehrt.

Der Einfluss der Kinematikfaktoren V_{ij} und $W_{i,WAD}$ auf die Indexberechnung wird im nächsten Bereich des Tabellenblatts grafisch veranschaulicht. Die HIC-Werte werden über den Geschwindigkeitsfaktor (Kapitel 4.1.5.2) zunächst an die mittleren Kopfaufprallgeschwindig-

keiten in den jeweiligen WAD-Bereichen des generischen Klassenvertreters angepasst. Das Verhalten des HIC-Wertes über der Geschwindigkeit (v in m/s) ist durch eine Funktionsschar definiert, deren Abbildungsvorschriften in Abb. 4-38 oben dargestellt sind. Die freien Parameter a und b sind dabei vom Ausgangs-HIC-Wert bei 40 km/h ($HIC_{40km/h}$) abhängig, wobei Parameter a gleichzeitig auch von Parameter b abhängig ist. Im Excel-Tool wird für jedes relevante Feld der Fahrzeugeinteilung der Betrag der Parameter a und b sowie die zu verwendende Funktionsvorschrift auf Basis des zuvor zugewiesenen Euro NCAP-HIC-Wertes ($HIC_{40km/h}$) bestimmt. Die anschließende Umrechnung der HIC-Werte bezüglich der den jeweiligen WAD-Streifen zugewiesenen mittleren Kopfaufprallgeschwindigkeiten des generischen Fahrzeugmodells (Abb. 4-38 unten links) erfolgt getrennt für Kinder und Erwachsene. Durch die direkte Berechnung der geschwindigkeitsbezogenen HIC-Werte entfällt die explizite Angabe eines Geschwindigkeitsfaktors, welcher als Quotient aus umgerechneten und ursprünglichen HIC-Wert angesehen werden kann (Kapitel 4.1.5.2).

Wertebereich	Funktionsvorschrift	Parameterdefinition
$HIC_{40km/h} \leq 650$	$HIC_v = a \cdot v^{2.5}$	$a = \frac{HIC_{40km/h}}{(40/3,6)^{2.5}}$
$650 < HIC_{40km/h} \leq 1700$	$HIC_v = a \cdot v^{2.5+b} + 200 \cdot b$	$a = \frac{HIC_{40km/h} - 200 \cdot b}{(40/3,6)^{2.5+b}}$ $b = \frac{HIC_{40km/h} - 650}{700} \quad (0 < b \leq 1,5)$
$HIC_{40km/h} > 1700$	$HIC_v = a \cdot v^4 + 300 \cdot b$	$a = \frac{HIC_{40km/h} - 300 \cdot b}{(40/3,6)^4}$ $b = \sqrt{HIC_{40km/h} / 1700}$

a Werte (aufgrund der verschiedenen Wertebereiche nicht vergleichbar)																						
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	WAD [mm]
13	0.00	0.00	0.00	0.36	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.36	0.00	0.00	0.00	Dach
12	0.00	0.00	0.00	0.36	0.14	1.46	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.46	0.14	0.36	0.00	0.00	2100 - WSS
11	0.00	0.00	0.00	0.36	0.14	1.46	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.46	0.14	0.36	0.00	0.00	2000 - 2100
10	0.00	0.00	0.00	0.36	0.14	1.46	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.46	0.14	0.36	0.00	0.00	0.00	1900 - 2000
9	0.00	0.00	0.00	0.36	0.14	1.46	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.46	0.14	0.36	0.00	0.00	0.00	1800 - 1900
8	0.00	0.00	0.00	0.36	0.14	1.03	1.03	1.03	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.03	1.03	1.03	0.14	0.36	0.00	0.00	0.00	1700 - 1800
7	0.00	0.00	0.00	0.36	0.14	0.14	0.15	0.15	0.41	0.41	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.36	0.00	0.00	0.00	1600 - 1700
6	0.00	0.00	0.00	0.36	0.35	0.14	0.14	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.35	0.36	0.00	0.00	1500 - 1600
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41	0.55	1.03	1.03	1.03	1.03	0.41	0.41	1.03	0.41	0.41	0.15	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	1400 - 1500
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.41	0.90	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	0.41	0.41	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	1300 - 1400
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41	0.41	1.03	1.46	1.46	1.46	1.15	1.46	1.46	1.03	1.03	0.41	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	1200 - 1300
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.41	1.03	1.26	1.46	1.46	1.46	1.46	1.03	1.26	0.68	0.41	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	1100 - 1200
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.41	1.03	1.03	1.03	1.23	0.66	1.08	1.03	0.41	0.41	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1000 - 1100

Mittelwert Kopfaufprallgeschw. [m/s]			b Werte (aufgrund der verschiedenen Wertebereiche nicht vergleichbar)																						
Kinder	Erwachsene	WAD [mm]		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	WAD [mm]
13	0.00	11.10	Dach	0.00	0.00	0.00	1.88	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.88	0.00	0.00	0.00	Dach	
12	12.01	12.01	2100 - WSS	0.00	0.00	0.00	1.88	1.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.21	1.88	0.00	0.00	0.00	2100 - WSS
11	11.18	11.18	2000 - 2100	0.00	0.00	0.00	1.88	1.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.21	1.88	0.00	0.00	0.00	2000 - 2100
10	10.86	10.86	1900 - 2000	0.00	0.00	0.00	1.88	1.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.21	1.88	0.00	0.00	0.00	1900 - 2000
9	10.55	10.55	1800 - 1900	0.00	0.00	0.00	1.88	1.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.21	1.88	0.00	0.00	0.00	1800 - 1900
8	10.41	10.41	1700 - 1800	0.00	0.00	0.00	1.88	1.21	0.25	0.25	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.25	1.21	1.88	0.00	0.00	0.00	0.00	1700 - 1800
7	10.26	0.00	1600 - 1700	0.00	0.00	0.00	1.88	1.21	1.21	1.25	1.25	0.75	0.75	1.25	1.25	1.21	1.21	1.21	1.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1600 - 1700
6	10.11	0.00	1500 - 1600	0.00	0.00	0.00	1.88	1.86	1.21	1.21	1.19	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.19	1.21	1.86	1.88	0.00	0.00	0.00	0.00	1500 - 1600
5	9.96	0.00	1400 - 1500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.60	0.25	0.25	0.25	0.25	0.75	0.75	0.25	0.75	0.75	1.25	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	1400 - 1500
4	9.81	0.00	1300 - 1400	0.00	0.00	0.00	0.00	1.22	0.75	0.33	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.75	0.75	1.22	0.00	0.00	0.00	0.00	1300 - 1400
3	9.76	0.00	1200 - 1300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.75	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.25	0.75	1.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1200 - 1300
2	9.76	0.00	1100 - 1200	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	0.75	0.25	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.13	0.56	0.75	1.25	0.00	0.00	0.00	0.00	1100 - 1200
1	0.00	0.00	1000 - 1100	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	0.75	0.75	0.25	0.25	0.15	0.50	0.22	0.25	0.75	0.75	1.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1000 - 1100

Abb. 4-38: Geschwindigkeitsbezogene Umrechnung der HIC-Werte (Beispielfzg., 40 km/h)

Bei der Darstellung der angepassten HIC-Werte (Abb. 4-39) werden Bereiche ohne Relevanz, d.h. ohne Aufprallwahrscheinlichkeit in Längsrichtung, ausgeblendet. Die Definition des HIC-Mindestwertes für Kopfaufprallgeschwindigkeiten größer 45 km/h gilt gemäß der Vorgaben aus Kapitel 4.1.5.2 nur für Aufprallbereiche, bei denen unterliegende Strukturen zu erwarten sind, also Hauben-, Windlauf- und unterer Windschutzscheibenbereich. Letzterer ist dabei so definiert, dass er bis 400 mm jenseits der Abwickellänge der Haubenhinterkante reicht. Die Bereiche außerhalb dieser Eingrenzung sind in der Tabelle der mittleren Kopfaufprallgeschwindigkeiten (Abb. 4-38 unten links) durch eine hellere Einfärbung gekennzeichnet.

net. Im Falle des Beispielfahrzeuges betrifft dies die WAD-Streifen 10 bis 13. Hier wird die Definition des Mindest-HIC-Wertes entsprechend nicht mehr angewendet.

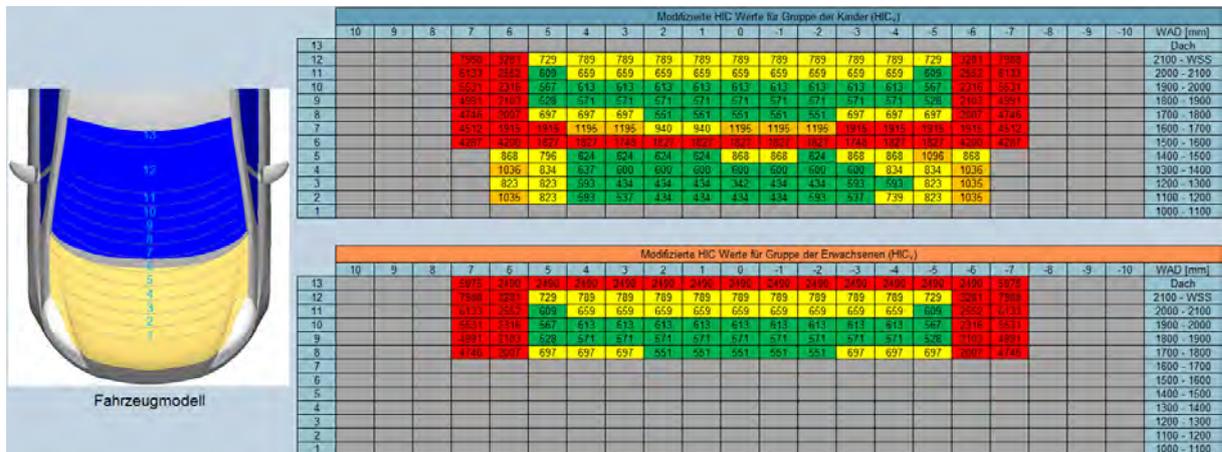


Abb. 4-39: HIC-Verteilung nach Anwendung des Geschwindigkeitsfaktors (Beispielfahrzeug)

In den jeweiligen Vorlagen der Bewertungstools ist diese Unterscheidung standardmäßig gemäß der Geometrie des generischen Fahrzeugmodells der Klasse (Abb. 4-39 links) implementiert. Diese sollte aber stets den Randbedingungen des zu bewertenden Fahrzeuges entsprechen, sodass hier eventuell Anpassungen erforderlich sind. Als Orientierung können die Bilder des Euro NCAP-Grid-Markups (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) herangezogen werden. Sollte sich eine Verschiebung um einen WAD-Streifen ergeben, so muss man in den angepassten HIC-Verteilungen der Kinder und Erwachsenen (Abb. 4-39 rechts) alle Zuweisungsformeln in den Feldern des betroffenen WAD-Streifens durch die des vorherigen oder nachfolgenden Streifens ersetzen, je nachdem in welche Richtung die Verschiebung erfolgt. Dies kann einfach durch entsprechendes Kopieren und Einfügen der Felder 10 bis -10 erfolgen. Die Formeln passen sich dem neuen Streifen automatisch an. Die Front des betrachteten Beispielfahrzeuges fällt kürzer aus als die des generischen Klassenvertreter, bei dem der Wegfall der Mindest-HIC-Definition erst ab WAD-Streifen 11 erfolgt, was so auch für die Klasse Kompakt standardmäßig hinterlegt ist. Da allerdings keiner der WAD-Streifen für die Klasse Kompakt eine mittlere Kopfaufprallgeschwindigkeit oberhalb von 45 km/h (12,5 m/s) aufweist, kommt die Mindest-HIC-Definition für Fahrzeuge der Klasse Kompakt ohnehin nicht zum Tragen.

Als nächstes erfolgt die Anwendung des Winkelfaktors (Kapitel 4.1.5.3), welche im Bewertungstool unmittelbar an die geschwindigkeitsbezogene Anpassung der HIC-Werte anschließt. Der Winkelfaktor wird auf Basis der mittleren Kopfaufprallwinkel der einzelnen WAD-Streifen (Abb. 4-13) automatisch bestimmt und mit den an die mittleren Kopfaufprallgeschwindigkeiten angepassten HIC-Werten (Abb. 4-39) multipliziert. Es ergibt sich eine kinematikbezogene Darstellung der HIC-Werte über der Fahrzeugfront (Abb. 4-40). Da der Winkelfaktor ebenfalls 400 mm jenseits der Abwickellänge der Haubenhinterkante nicht mehr angewendet wird, ergeben sich beim Beispielfahrzeug (vgl. Abb. 4-33) für die WAD-Streifen 10 bis 13 entsprechend keine Änderungen gegenüber Abb. 4-39.

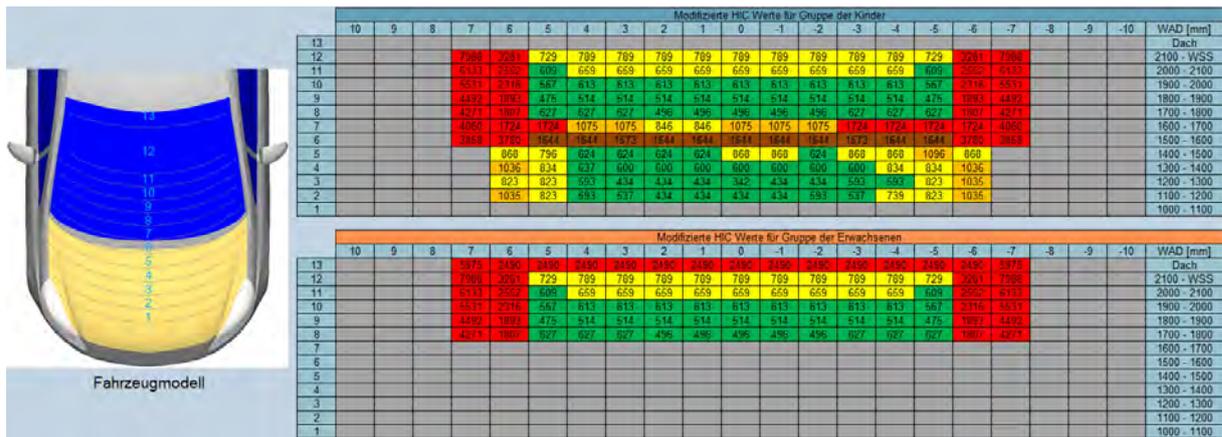


Abb. 4-40: HIC-Verteilung nach Anwendung des Geschw.- & Winkelfaktors (Beispielfzg.)

Der letzte Bereich des Tabellenblatts dient allein der Ausgabe der sich auf Basis der vorherigen Daten im zugehörigen zweiten Tabellenblatt zur Indexberechnung ergebenden Ergebnisse. Zusätzlich werden hier nochmals die zugrunde liegende Verletzungsrisikokurve (Abb. 4-35) sowie die Indexberechnungsformel (Gl. 4-3) abgebildet.

4.1.7 Systeme der aktiven Sicherheit

Zur Bewertung aktiver Systeme wird keine separate Methodik wie im Vorgängerprojekt verwendet. Vielmehr werden eine allgemein für das jeweilige aktive System vorausgesetzte Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit und die damit verbundenen Änderungen der Kopfaufprallwahrscheinlichkeiten, -geschwindigkeiten und -winkel bewertet. Die genauen System-spezifikationen sind dabei irrelevant. Die geschwindigkeitsabhängige Indexberechnung, d.h. die Berechnung und graphische Darstellung von Indexwerten für verschiedene Fahrzeuggeschwindigkeiten, bildet dabei die zentrale Schnittstelle zwischen aktiver und passiver Sicherheit innerhalb des Bewertungsverfahrens.

Über die Berechnung von Indexwerten für die Fahrzeuggeschwindigkeiten 40, 35, 30 und 20 km/h kann für das zu bewertende Fahrzeug ein charakteristischer Zusammenhang zwischen Kollisionsgeschwindigkeit und Indexwert für Kinder und Erwachsene hergeleitet werden. Die dazu erforderlichen Daten sind für die jeweiligen Fahrzeuggeschwindigkeiten in den entsprechenden Tabellenblättern innerhalb des Bewertungstools einer Fahrzeugklasse hinterlegt. Durch Interpolation zwischen den ermittelten Stützstellen lässt sich ein korrespondierender Indexwert für jede Geschwindigkeitsreduktion angeben. Abb. 4-41 veranschaulicht dies anhand der Indexwerte des Beispielfahrzeuges, bei dem die Indexwerte der Kinder und Erwachsenen für eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h fast gleich ausfallen (Kapitel 4.1.6). Für die Gruppe der Kinder führt hier beispielsweise ein angenommener Rückgang der Kollisionsgeschwindigkeit um 9,2 km/h zu einer Reduktion des Indexwertes von 0,51 auf 0,3. Trotz des gleichen Ausgangswertes bei 40 km/h ergibt sich für eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 20 km/h ein im Vergleich zu den Kindern um die Hälfte höherer Erwachsenenindex. Während die Kinder von einer deutlichen Reduktion der Kopfaufprallgeschwin-

digkeiten im Hauben- sowie im kritischen Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereich profitieren, fällt diese in den für die Erwachsenen relevantesten Bereichen niedriger aus. Zudem bleiben die hohen HIC-Werte der A-Säulen (Abb. 4-17), trotz der infolge der reduzierten Kopfaufprallgeschwindigkeiten erzielten Absenkung, im roten Bereich, was sich entsprechend auf die Höhe des Indexwertes niederschlägt. Hier macht sich der signifikante Einfluss der Struktureigenschaften einer Fahrzeugfront auf das Schutzpotential aktiver Systeme bemerkbar.

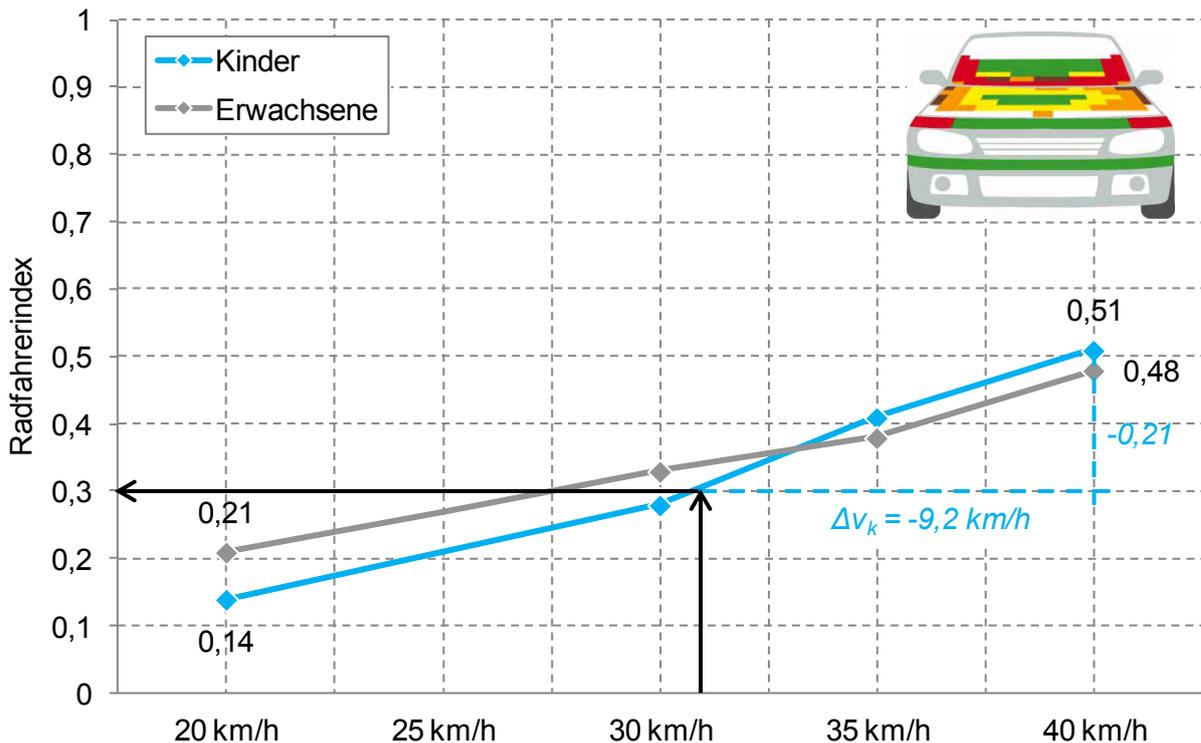


Abb. 4-41: Radfahrerindex über Fahrzeuggeschwindigkeit (Beispielfahrzeug)

Nach den Ausführungen zu den jeweiligen Modulen und der letztendlichen Indexberechnung, wird das Bewertungsverfahren im Folgenden für Radfahrer und Fußgänger jeweils auf einen aktuellen und konkret durch Euro NCAP getesteten Vertreter der sechs betrachteten Fahrzeugklassen (Abb. 3-1) angewendet. Dabei werden neben dem Indexwert des jeweiligen Basisfahrzeuges und dessen geschwindigkeitsabhängiger Darstellung für Kinder und Erwachsene zusätzlich auch Indexwerte für eine generische aktive Haube sowie deren Erweiterung um einen generischen Fußgänger- und Erwachsenenairbag (Kapitel 4.1.4.1) berechnet. In Kapitel 4.2 werden zunächst die entsprechenden Radfahrerindexwerte vorgestellt und diskutiert, was in Kapitel 4.3 dann analog auch für die Gruppe der Fußgänger erfolgt.

4.2 Ergebnisse Radfahrerindex

Die erste im Rahmen der Diskussion der Indexergebnisse betrachtete Fahrzeugklasse ist die Klasse Kompakt, in die auch das Beispielfahrzeug fällt, dessen Indexwerte im Folgenden näher erläutert werden. Die Darstellungsweise der Ergebnisse kombiniert das Säulendia-

gramm der berechneten Indexwerte für Kinder und Erwachsene mit dem geschwindigkeitsabhängigen Indexverlauf des Basisfahrzeugs (Abb. 4-41). So lässt sich das Schutzpotential passiver Maßnahmen in eine äquivalente Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit überführen.

4.2.1 Beispielfahrzeug der Klasse Kompakt

Wie in Kapitel 4.1.6 bereits angeführt, ergibt sich beim bislang betrachteten Beispielfahrzeug für Kinder und Erwachsene ein ähnlich hoher Radfahrerindexwert. Die Ausstattung mit einer aktiven Haube würde für beide Gruppen zu einer Verschlechterung des Indexwertes führen (Abb. 4-42). Vor allem für die Kinder ist hier ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen. Ein Grund ist die rote Bewertung im Bereich der Haubenhinterkante zur Adressierung des Verletzungsrisikos durch den Haubenspalt (Abb. 4-18), welcher für die Erwachsenen keine Relevanz hat. Zudem fallen die durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeiten sämtlicher WAD-Streifen im Zuge der Haubenaufstellung höher aus, mit den größten Anstiegen im Hauben- und Windlaufbereich.

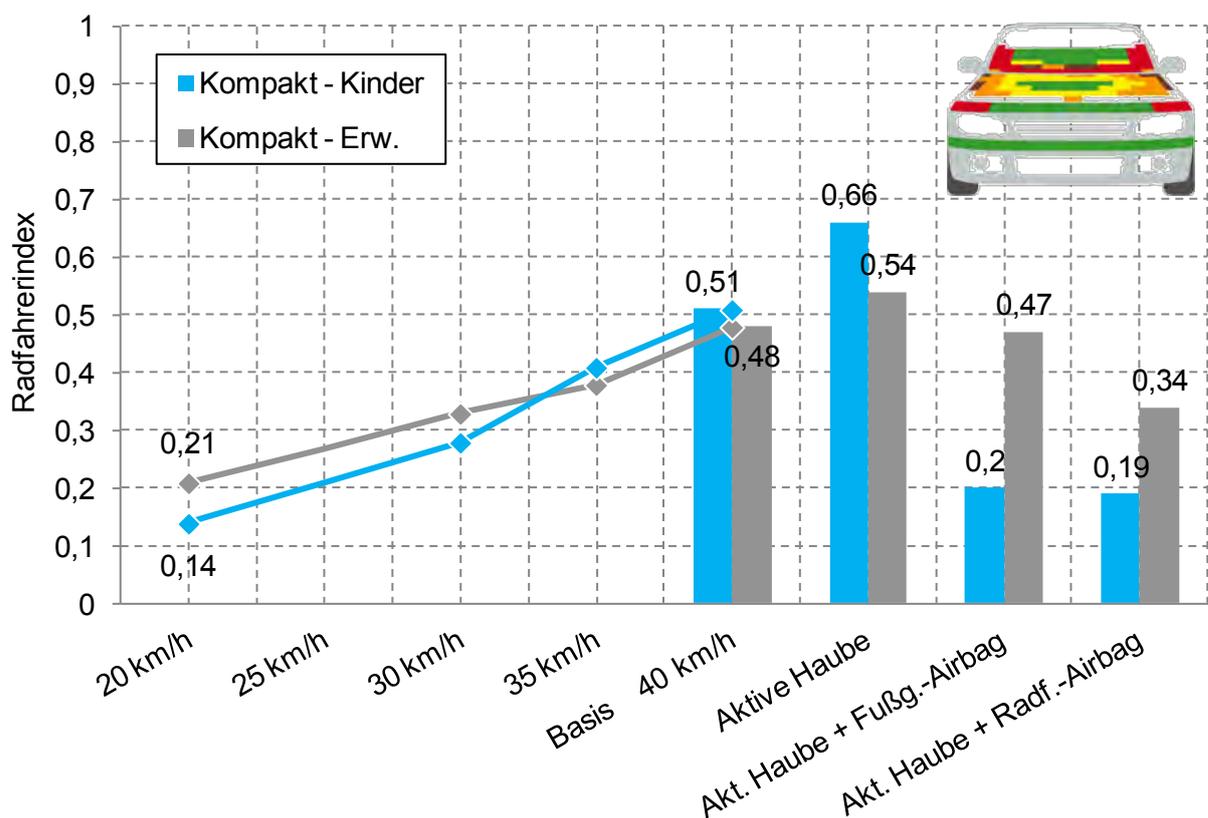


Abb. 4-42: Radfahrerindexwerte für das Beispielfahrzeug der Klasse Kompakt (Test 2013)

Aufgrund der kurzen Haubengeometrie des Beispielfahrzeugs profitieren, anders als bei den übrigen Fahrzeugklassen, in erster Linie die Kinder von einem klassischen Fußgängerairbag. Dieser deckt hier mit dem Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereich einen signifikanten Teil des relevanten Kopfaufprallbereichs der Kinder ab, während Erwachsene weiter hinten aufkommen und nur im Bereich der A-Säulen durch den Airbag geschützt

werden. Dieser Schutz kann durch einen Radfahrerairbag bis zum Dach erweitert werden, sodass auch das letzte Drittel der Erwachsenen im A-Säulenbereich adressiert werden kann. Dadurch wird der Indexwert der Erwachsenen nochmals reduziert, er erreicht aber nicht das Niveau des Kinderwertes. Überführt man das Schutzpotential des Radfahrerairbags in eine äquivalente Geschwindigkeitsreduktion des Fahrzeuges, so entspricht dies für Erwachsene einer Reduzierung um 10 km/h, wohingegen es bei den Kindern mit einer Reduzierung um mehr als 15 km/h gleichzusetzen ist.

4.2.2 Beispielfahrzeug der Klasse Limousine

Beim Beispielfahrzeug der Klasse Limousine besteht die Besonderheit, dass dieses serienmäßig über eine aktive Haube verfügt, was sich entsprechend in einer weitestgehend grünen Bewertung des Haubenbereichs widerspiegelt (Abb. 4-43). Bezüglich einer vollständigen Bewertung ergibt sich allerdings eine Einschränkung. So liegen die Simulationsergebnisse für reduzierte Fahrzeuggeschwindigkeiten nur für die Basisausführung des generischen Klassenvertreters vor, d.h. es wird keine Haubenaufstellung berücksichtigt. Um dennoch das komplette betrachtete Spektrum der Indexwerte berechnen zu können, wird das Beispielfahrzeug der Klasse Limousine wie ein Fahrzeug ohne aktive Haube bewertet, d.h. der Basisindexwert sowie die Werte der reduzierten Fahrzeuggeschwindigkeiten beruhen auf Kinematikparametern ohne Haubenaufstellung. Für die Klasse Limousine wird daher zusätzlich noch der generische Klassenvertreter mit einem generischen Euro NCAP-Ergebnis bewertet, welches eine typische HIC-Verteilung für ein Fahrzeug ohne aktive Haube repräsentiert.

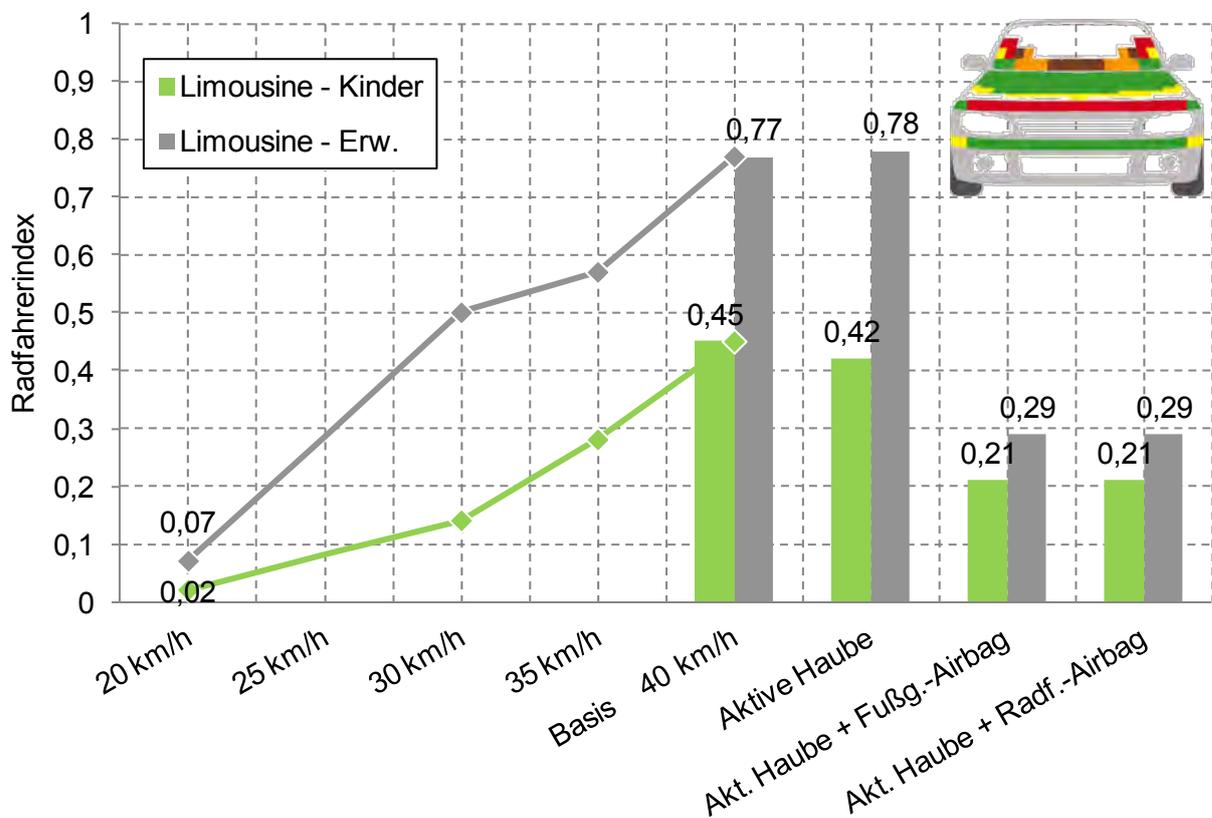


Abb. 4-43: Radfahrerindexwerte für das Beispielfahrzeug der Klasse Limousine (Test 2014)

Betrachtet man zunächst die Indexwerte des Beispielfahrzeuges in Abb. 4-43, so zeigt sich für das Basisfahrzeug ein deutlicher Unterschied zwischen den Indexwerten der Kinder und Erwachsenen. Dieser beruht in erster Linie auf einer deutlich höheren durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeit in dem für Erwachsenen relevanten Windschutzscheibenbereich, welche mehr als 46 km/h beträgt. Bei Anwendung der Vorgaben zur Bewertung einer generischen aktiven Haube (Kapitel 4.1.4.1) ergeben sich erwartungsgemäß keine großen Veränderungen, da das Beispielfahrzeug bereits serienmäßig über eine aktive Haube und damit überwiegend grüne Werte im Haubenbereich verfügt. Die Kinder profitieren im Zuge der durch die Haubenaufstellung veränderten Kinematik von einer Vorverlagerung der Kopfaufprallorte, wodurch die Relevanz des Windlaufs- und unteren Windschutzscheibenbereichs abnimmt. Bei den Erwachsenen wird der positive Effekt einer leicht reduzierten durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeit im Windschutzscheibenbereich durch eine Vorverlagerung der Kopfaufprallorte in den struktursteifen Windlaufbereich kompensiert. Diesem Nachteil kann durch Implementierung eines Windschutzscheibenairbags begegnet werden, welcher den Indexwert für beide Gruppen deutlich reduziert. Im Zuge der Haubenanstellung und aufgrund der langen Haubengeometrie des Beispielfahrzeuges der Klasse Limousine (WAD > 2000 mm), deckt der Fußgängerairbag bereits außen den für den Kopfaufprall relevanten Windschutzscheibenbereich vollständig ab. Somit ergibt sich für den Radfahrerairbag, der zusätzlich auch noch das Ende der A-Säulen bis in den vorderen Dachbereich hinein mit abdeckt, kein zusätzliches Schutzpotential mehr, sodass die Indexwerte identisch zum Fußgängerairbag ausfallen. Im Gegensatz zum Beispielfahrzeug der Klasse Kompakt führt eine Reduktion der Fahrzeuggeschwindigkeit um 20 km/h beim hier betrachteten Limousinenfahrzeug sowohl für Kinder als auch für Erwachsene zu Indexwerten, die nochmals deutlich unterhalb des Niveaus des Windschutzscheibenairbags liegen und so für beide Gruppen ein hohes Schutzpotential für aktive Systeme offenbaren.

Beim generischen Fahrzeugmodell der Klasse Limousine fällt die Abwickellänge bis zur Haubenhinterkante im Vergleich zum zuvor betrachteten Beispielfahrzeug um mehr als 100 mm kürzer aus. Entsprechend verlagert sich der kritische Windlauf- und untere Windschutzscheibenbereich nach vorne. Die definierte generische Grid-HIC-Verteilung und die erzielten Indexwerte gehen aus Abb. 4-44 hervor. Während das Ergebnis der Erwachsenen für das Basisfahrzeug nahezu identisch zum Beispielfahrzeug (Abb. 4-43) ausfällt, liegt der Indexwert der Kinder deutlich höher als zuvor. Hier machen sich zum Einen die gelben und orangen HIC-Werte in den Randbereichen der generischen Haube aber vor allem die Vorverlagerung des durchgehend rot eingestufteten Windlaufbereichs bemerkbar, der zusammen mit dem ebenfalls kritischen unteren Windschutzscheibenbereich eine Relevanz von fast 50% bezüglich der Kopfaufprallorte der Kinder ausmacht. Durch Implementierung einer aktiven Haube kann der Indexwert der Kinder nicht entscheidend verbessert werden, während er für die Erwachsenen, aus den gleichen Gründen wie beim Beispielfahrzeug, leicht zunimmt. Die Kinder profitieren zwar von den verbesserten HIC-Werten im Haubenbereich, dennoch bleibt die Relevanz des Windlaufs- und unteren Windschutzscheibenbereichs mit annähernd 47% sehr hoch. Entsprechend groß ist das Schutzpotential eines Windschutzscheibenairbags für diese Gruppe. Gleiches gilt für die Erwachsenen, bei denen aufgrund der kürzeren Haubengeome-

trie nicht so viele Erwachsene durch den Airbag adressiert werden wie zuvor beim Beispielfahrzeug, was aufgrund der pauschal grün bewerteten Felder auf der Windschutzscheibe aber nicht sonderlich ins Gewicht fällt, ebenso wie die erweiterte Abdeckung des A-Säulenbereichs durch den Radfahrerairbag.

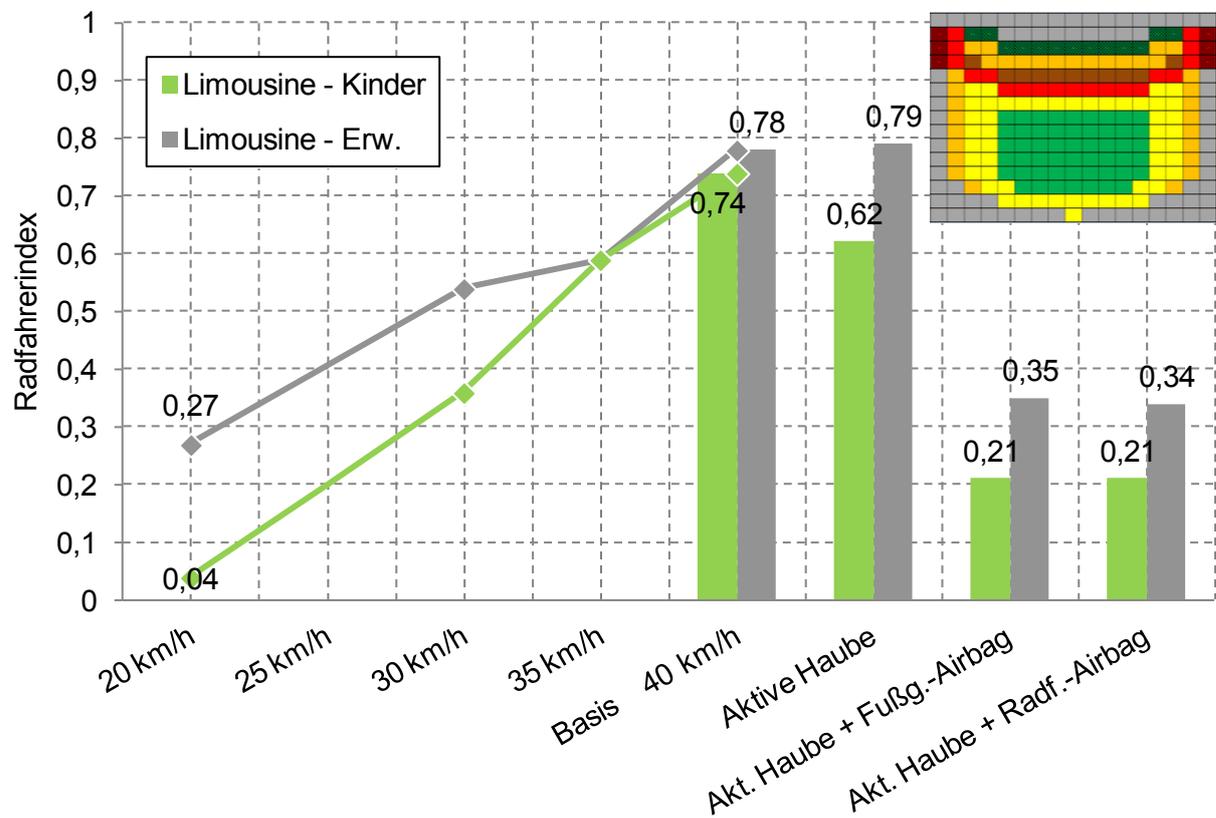


Abb. 4-44: Radfahrerindexwerte für das generische Fahrzeugmodell der Klasse Limousine

Für die generische HIC-Verteilung wird der Einfluss der Struktureigenschaften auf das Schutzpotential aktiver Systeme deutlich. Während der Indexwert der Kinder für eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 20 km/h das niedrige Niveau des Beispielfahrzeugs erreicht, ist der Erwachsenenwert im Vergleich dazu fast viermal so hoch. Der Grund dafür wird ersichtlich, wenn man für das generische Fahrzeugmodell die Relevanz des Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereichs für Erwachsene bei 40 und 20 km/h miteinander vergleicht. Während diese für 40 km/h lediglich 8% beträgt, erhöht sich der Anteil bei 20 km/h im Zuge der Vorverlagerung der Kopfaufprallorte auf über 72%. Somit wird die Reduzierung des Verletzungsrisikos infolge niedrigerer Kopfaufprallgeschwindigkeiten durch eine Verlagerung der Kopfaufprallorte in struktursteife Bereiche teilweise kompensiert, sodass trotz eines signifikanten Geschwindigkeitsabbaus des Fahrzeugs ein relativ hohes Restrisiko verbleibt.

4.2.3 Beispielfahrzeug der Klasse Van

Die für die Klasse Van hinterlegten Kinematikparameter des Basisfahrzeuges weisen bei 40 km/h gerade für den Windschutzscheibenbereich sehr hohe durchschnittliche Kopfaufprallgeschwindigkeiten bis 50 km/h auf, aber auch für die relevanten Bereiche der Haube

liegen diese oberhalb der Fahrzeuggeschwindigkeit. Entsprechend ergeben sich für das betrachtete Beispielfahrzeug der Klasse Van trotz guter Struktureigenschaften relativ hohe Indexwerte der Basisausführung (Abb. 4-45).

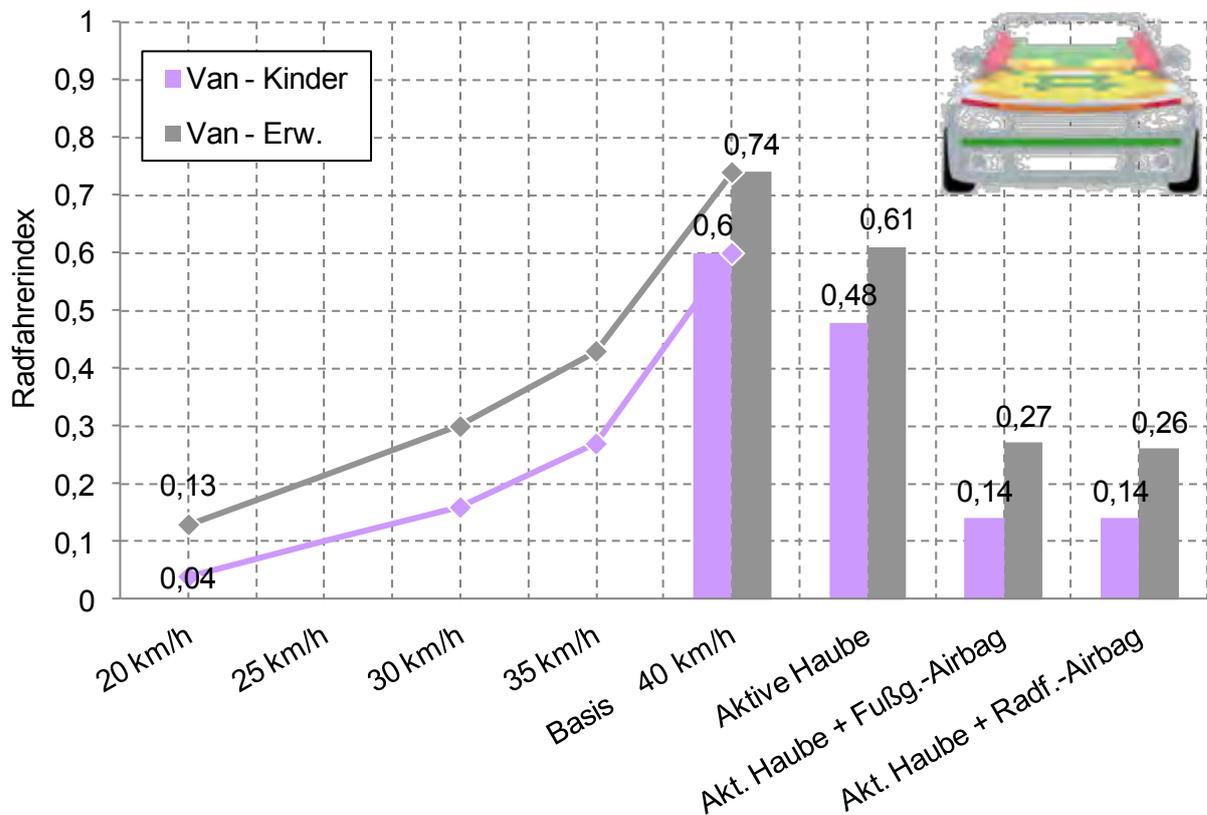


Abb. 4-45: Radfahrerindexwerte für das Beispielfahrzeug der Klasse Van (Test 2013)

Im Falle einer aktiven Haubenausführung profitieren sowohl Kinder als auch Erwachsene von reduzierten Kopfaufprallgeschwindigkeiten. Das Schutzpotential für Kinder wird aber dadurch geschmälert, dass sich innerhalb des mit 23% relevantesten WAD-Streifens die Haubenhinterkante befindet, sodass hier eine pauschal rote Einstufung der HIC-Werte erfolgt (Kapitel 4.1.4.1). Gleichzeitig ergibt sich so aber wiederum eine hohe Schutzfunktion des Windschutzscheibenairbags, durch den über 50% der Kinder direkt adressiert werden. Da die Kopfabwickellängen für die Klasse Van aufgrund der steileren Frontgeometrie tendenziell kürzer ausfallen als für die Klasse Limousine, kann der relevante A-Säulenbereich auch hier durch einen Fußgängerairbag fast vollständig abgedeckt werden. Die eingangs erwähnten guten Struktureigenschaften des Basisfahrzeuges ermöglichen für reduzierte Fahrzeuggeschwindigkeiten eine signifikante Verbesserung der Indexwerte beider Gruppen, welche bei halbiertes Geschwindigkeit deutlich unter dem Windschutzscheibenairbagniveau liegen.

4.2.4 Beispielfahrzeug der Klasse SUV

Beim Beispielfahrzeug der Klasse SUV liegt das Ende des Euro NCAP-Prüfbereichs (WAD 2100 mm) im unteren Windschutzscheibenbereich, kurz oberhalb der Wischerblätter. Ent-

sprechend kritisch fallen die HIC-Werte für weite Teile des Erwachsenenkopfbereichs aus. Dies spiegelt sich auch im zugehörigen Indexwert des Basisfahrzeuges wider (Abb. 4-46), zumal im Falle der Klasse SUV der Bereich jenseits einer Abwickellänge von 2100 mm kaum Relevanz für den Kopfaufprall von Radfahrern hat, sodass pauschal grüne Bereiche der Windschutzscheibe nicht zum Tragen kommen. Zudem liegen die durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeiten im Windlauf- und Windschutzscheibenbereich oberhalb von 45 km/h. Diese reduzieren sich durch Aufstellung der Haube auf Werte unterhalb von 45 km/h, was im Zusammenspiel mit der Vorverlagerung der Kopfaufprallorte, wodurch die Relevanz des kritischen Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereichs von 66% auf 41% abnimmt, zu einer deutlichen Verbesserung des Indexwertes führt. Auch die Kinder profitieren von niedrigeren Kopfaufprallgeschwindigkeiten sowie den optimierten HIC-Werten im Haubenbereich. Aufgrund der hohen und langen Frontgeometrie des SUVs hat der Windlaufbereich kaum Relevanz für die Gruppe der Kinder, sodass diese folglich auch keinen nennenswerten Schutz durch einen Windschutzscheibenairbag erfahren. Anders ist dies bei den Erwachsenen. Hier adressiert der Windschutzscheibenairbag sämtliche relevanten Bereiche jenseits der Haubenhinterkante, sodass der Indexwert gegenüber einer reinen Implementierung einer aktiven Haube nochmals deutlich reduziert werden kann. Infolge der geometrischen Gegebenheiten bringt der Radfahrerairbag hier allerdings keinen zusätzlichen Nutzen.

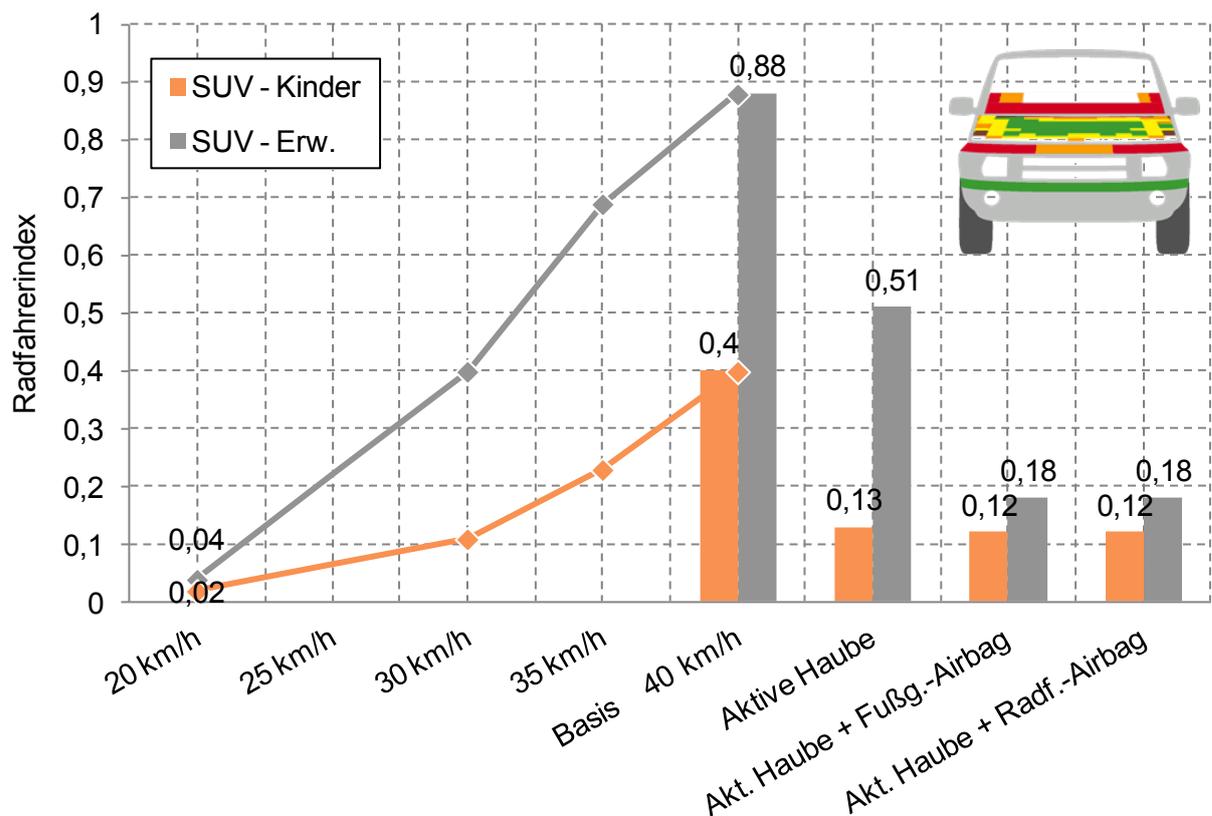


Abb. 4-46: Radfahrerindexwerte für das Beispielfahrzeug der Klasse SUV (Test 2013)

Durch Abbau der Fahrzeuggeschwindigkeit können die Indexwerte beider Gruppen deutlich abgesenkt werden. Vor allem für die Erwachsenen, wo das Risiko einer schweren Kopfver-

letzung beim Basisfahrzeug durch Halbierung der Fahrzeuggeschwindigkeit von 88% auf 4% zurückgeht, ist der Rückgang signifikant. Die Geschwindigkeitsreduzierung führt nicht nur zu deutlich niedrigeren Kopfaufprallgeschwindigkeiten, sondern im Zuge der ausgeprägten Vorverlagerung der Kopfaufprallorte auch zu einem Abfall der Relevanz des kritischen Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereichs auf lediglich 0,2% (zuvor 66%). Doch bereits durch Abnahme der Fahrzeuggeschwindigkeit um 10 km/h kann der hohe Indexwert der Erwachsenen mehr als halbiert werden, während der Kinderwert wie zuvor beim Van auf fast ein Viertel des Ausgangswertes abnimmt.

4.2.5 Beispielfahrzeug der Klasse OneBox

Das Beispielfahrzeug der Klasse OneBox weist von allen bislang betrachteten Fahrzeugen das mit Abstand schlechteste Euro NCAP-Prüfergebnis auf. Der im Fußgängerschutz erzielte Prozentwert liegt im Vergleich zu den Beispielfahrzeugen der anderen Klassen nur halb so hoch, was sich entsprechend auch in den Indexergebnissen bemerkbar macht (Abb. 4-47).

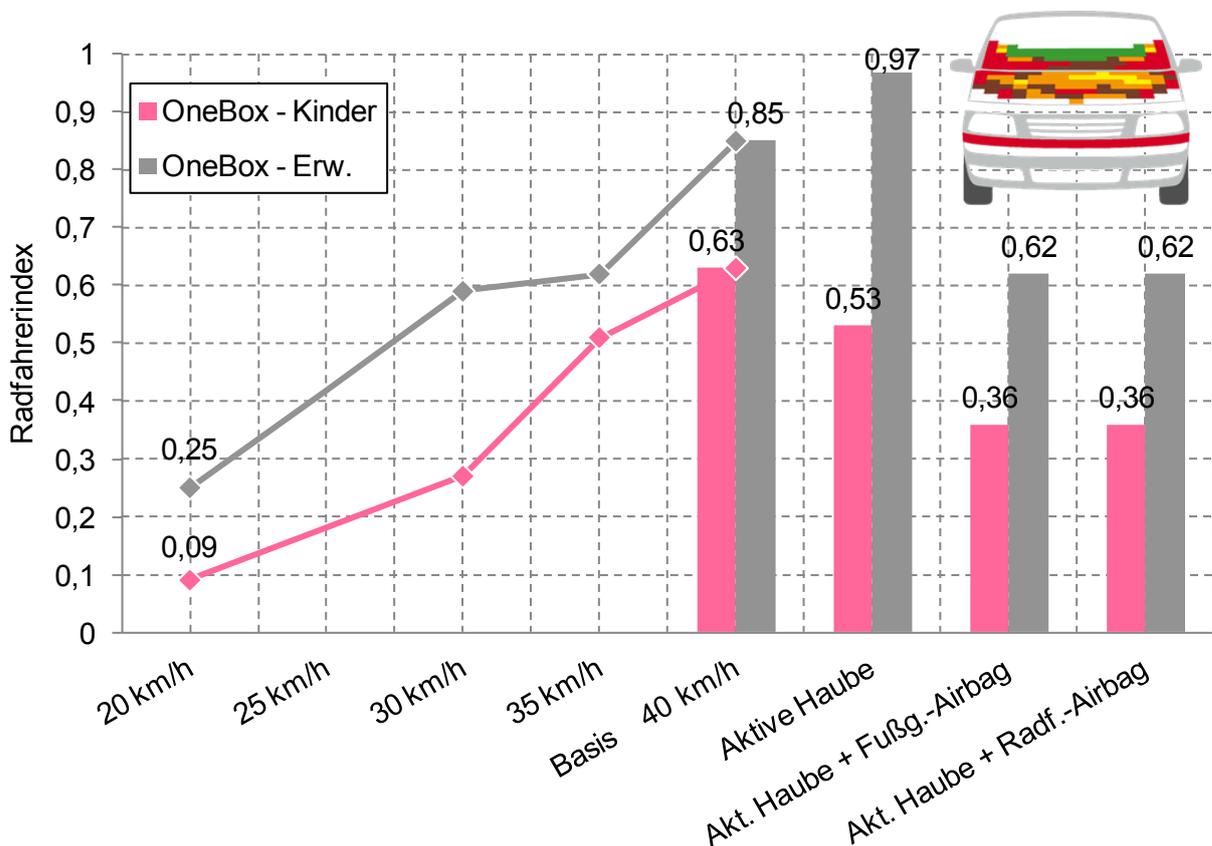


Abb. 4-47: Radfahrerindexwerte für das Beispielfahrzeug der Klasse OneBox (Test 2013)

Der hohe Basisindexwert der Erwachsenen ergibt sich aus einem Zusammenspiel der großen Relevanz des in weiten Teilen roten Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereichs und hohen durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeiten oberhalb von 45 km/h im mittleren Windschutzscheibenbereich. Grund für den hohen Indexwert der Kinder sind die äußerst schlechten HIC-Werte im Haubenbereich. So gibt es hier keinen einzigen grünen

Grid-Punkt und zudem eine Vielzahl brauner Bewertungen, welche mit einem Risiko für eine schwere Kopfverletzung von ca. 90% gleichzusetzen sind. Ein Drittel der Kinder kommt zudem im Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereich auf. Die nur moderate Reduzierung des Kinderindex bei Implementierung einer aktiven Haube ist auf die sich daraus ergebenden erhöhten Kopfaufprallgeschwindigkeiten zurückzuführen, welche bei den Erwachsenen sogar zu einem nochmals deutlichen Anstieg des Indexwertes führen. So steigen die durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeiten im relevanten Haubenbereich je nach WAD-Streifen um 1 bis 3 m/s. Im Windlauf- und Windschutzscheibenbereich liegt die Zunahme für alle WAD-Streifen um die 3 m/s, sodass im mittleren Windschutzscheibenbereich durchschnittliche Kopfaufprallgeschwindigkeiten von 57 km/h erzielt werden. Dadurch kommt auch das Schutzpotential des Windschutzscheibenairbags nur bedingt zur Geltung. Die erzielten Ergebnisse liegen deutlich über dem Niveau der anderen Fahrzeugklassen. Auch die für das Beispielfahrzeug der Klasse OneBox bezüglich einer Reduktion der Fahrzeuggeschwindigkeit berechneten Werte gehören im Vergleich zu den übrigen Fahrzeugen zum oberen Spektrum.

4.2.6 Klasse Sportwagen

Aus der Klasse Sportwagen ist bislang kein Vertreter im Rahmen von Euro NCAP getestet worden. Es liegen somit keine konkreten HIC-Werte vor, sodass zur Diskussion von Indexergebnissen auf eine generische HIC-Verteilung zurückgegriffen werden muss (Abb. 4-48).

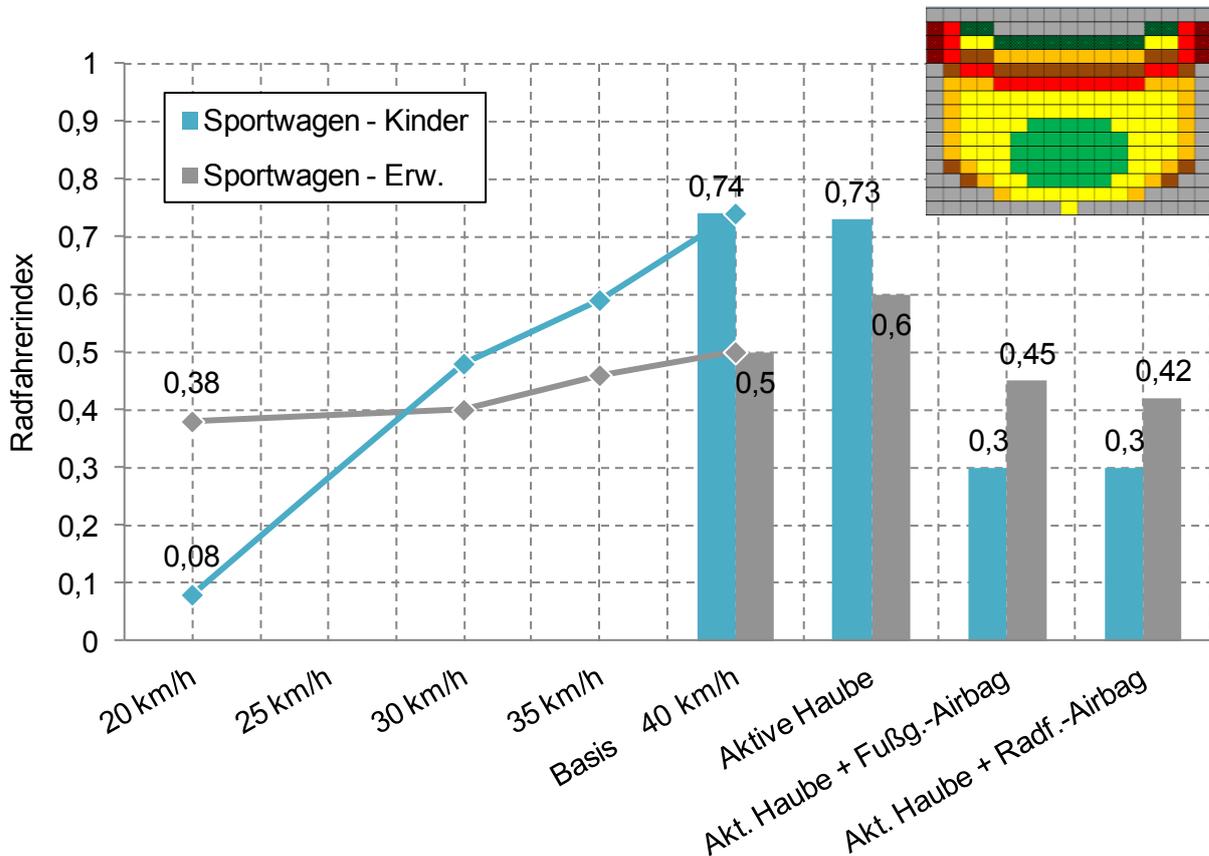


Abb. 4-48: Radfahrerindexwerte für das generische Fahrzeugmodell der Klasse Sportwagen

Die Anwendung des generischen Euro NCAP-Ergebnisses auf den generischen Klassenvertreter ergibt hohe Indexwerte für die Gruppe der Kinder, wobei auffällig ist, dass der Kinderindex für das Basisfahrzeug deutlich höher ausfällt als der Erwachsenenindex, was bei den Fahrzeugen der anderen Klassen nicht der Fall war. Dies liegt darin begründet, dass beim Sportwagen die Radfahrer so weit hinten aufkommen, dass der Windlauf- und untere Windschutzscheibenbereich mit 1,3% kaum noch Relevanz für Erwachsene hat, diese aber für die Kinder bei fast 50% liegt. Abgesehen von einem Anteil von 1,6% des vorderen Dachbereichs, kommen die Erwachsenen ansonsten ausschließlich im mittleren bis oberen Windschutzscheibenbereich auf. Da dieser, außer im A-Säulenbereich, pauschal grün eingestuft ist und die durchschnittliche Kopfaufprallgeschwindigkeit mit 43 km/h zudem unterhalb des Durchschnittswerts im Haubenbereich von knapp 45 km/h liegt, fällt der Erwachsenenindex entsprechend niedriger aus. Bei aktiver Ausführung der Haube kehrt sich das Geschwindigkeitsverhältnis um. So reduzieren sich die Kopfaufprallgeschwindigkeiten im Haubenbereich leicht, während die durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeiten im Windlauf- und Windschutzscheibenbereich zunehmen, was eine entsprechende Erhöhung des Erwachsenenindex hervorruft. Bei den Kindern werden durch die reduzierten HIC-Werte und Kopfaufprallgeschwindigkeiten im Haubenbereich nur 23% des relevanten Kopfaufprallbereichs adressiert. Gleichzeitig erhöht sich die Relevanz des Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereichs infolge der Vorverlagerung der Kopfaufprallorte aus dem mittleren Windschutzscheibenbereich auf 52%, sodass im Zusammenspiel mit den höheren Kopfaufprallgeschwindigkeiten die positiven Effekte der Haubenaufstellung weitestgehend kompensiert werden. Zudem werden beim generischen Fahrzeugmodell der Klasse Sportwagen mit Hinblick auf das Frontdesign die Basis-HIC-Werte in den Randbereichen der Haube beibehalten.

Von einem Windschutzscheibenairbag profitieren aufgrund der Lage der Kopfaufprallorte in erster Linie die Kinder. Erwachsene können fast ausschließlich nur im Bereich der A-Säulen adressiert werden, weisen aber im Zuge der Haubenaufstellung höhere Kopfaufprallgeschwindigkeiten auf. Trotz der insgesamt weit hinten liegenden Kopfaufprallorte ist das zusätzliche Schutzpotential eines Radfahrerairbags eher gering. Bei Reduzierung der Fahrzeuggeschwindigkeit nimmt der Indexwert der Kinder stetig ab und erreicht für 20 km/h einen Betrag von 0,08. Das Risiko einer schweren Kopfverletzung kann also durch Halbierung der Ausgangsgeschwindigkeit und ohne zusätzliche passive Maßnahmen von 74% auf 8% abgesenkt werden. Bei den Erwachsenen wirkt die ab einer Geschwindigkeitsreduktion von 10 km/h stark zunehmende Vorverlagerung der Kopfaufprallorte in den Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereich dem Rückgang des Verletzungsrisikos infolge niedrigerer Kopfaufprallgeschwindigkeiten entgegen. Im vorliegenden Falle ist dieser Effekt so ausgeprägt, dass die Indexwerte für 30 km/h und 20 km/h fast identisch sind, die positiven Auswirkungen des Geschwindigkeitsabbaus also nahezu vollständig durch das erhöhte Risiko im Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereich kompensiert werden.

4.3 Ergebnisse Fußgängerindex

Vergleichend zu den vorgestellten Radfahrerindexwerten innerhalb der einzelnen Klassen werden im Folgenden auch die entsprechenden Ergebnisse für Fußgänger erläutert. Die zu-

grunde liegenden Simulationsdaten sind dabei identisch zum Vorgängerprojekt. Allerdings erfolgt deren Auswertung und die anschließende Indexberechnung gemäß der am Bewertungsverfahren vorgenommenen Anpassungen (Kapitel 4.1). Dazu zählen die bezüglich des Euro NCAP-Grids ausgelegte Fahrzeugfronteinteilung, die Verwendung von Mittelwerten für Kopfaufprallgeschwindigkeit und -winkel im Rahmen der Kinematikparameterdefinition, die Bewertung aktueller und nach der Grid-Prozedur durch Euro NCAP getesteter Fahrzeuge mit genauerer Abbildung der Struktureigenschaften, die Berücksichtigung GIDAS-basierter Größenverteilungen, die Nutzung eines nochmals überarbeiteten HIC-Geschwindigkeits-Kennfeldes sowie die Implementierung einer neuen Kopfverletzungsrisikokurve. Aufgrund der deutlich geringeren durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeiten der Fußgänger fallen deren Indexergebnisse im Vergleich zu den Radfahrern klassenübergreifend entsprechend niedriger aus. Einfluss haben hier auch die tendenziell kürzeren Aufwurfweiten der Fußgänger, wodurch sich die relevanten Kopfaufprallbereiche für Kinder und Erwachsene nach vorne verlagern.

4.3.1 Beispielfahrzeug der Klasse Kompakt

Während beim Beispielfahrzeug der Klasse Kompakt die Basisindexwerte der Kinder und Erwachsenen im Falle der Radfahrer gleich hoch ausfallen (0,51), so liegen sie für Fußgänger deutlich auseinander (Abb. 4-49). Grund sind die höheren durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeiten in den relevanten WAD-Streifen der Erwachsenen, die abgesehen vom oberen Windschutzscheibenbereich aber niedriger als die Fahrzeuggeschwindigkeit ausfallen.

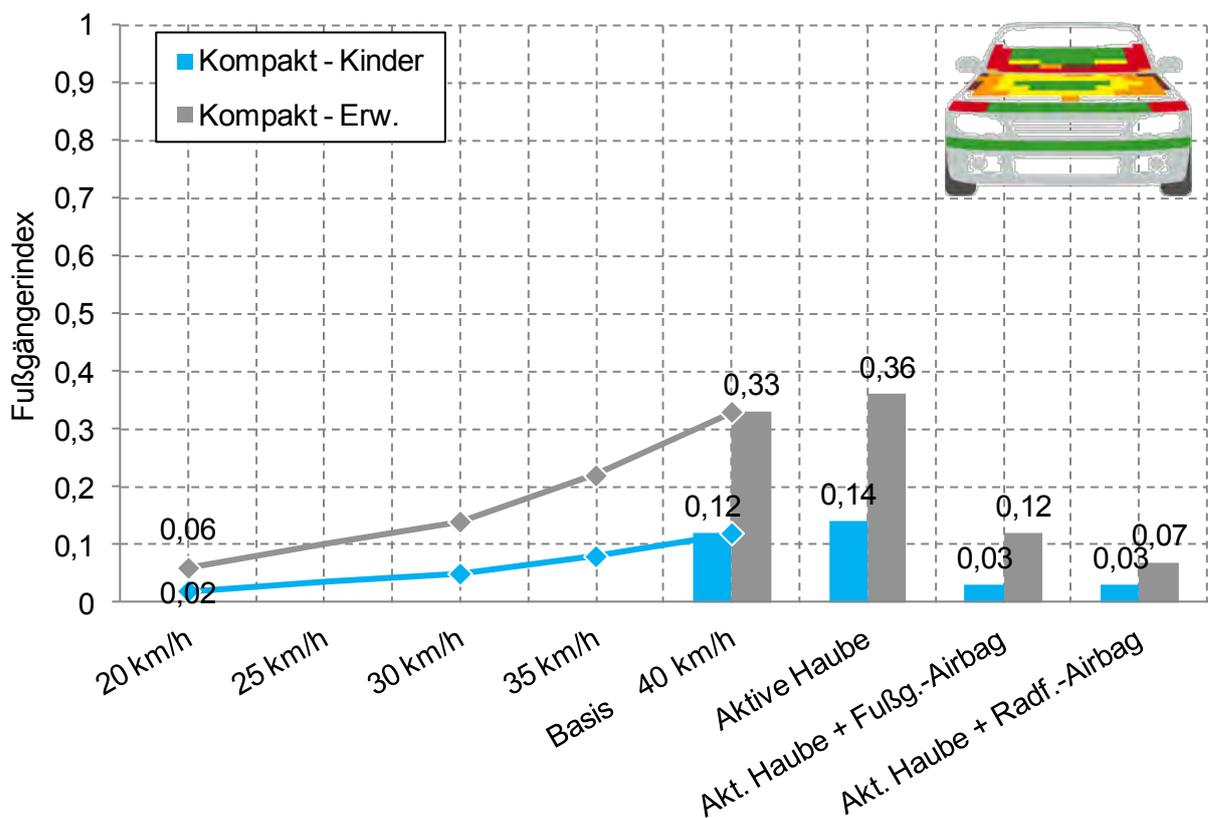


Abb. 4-49: Fußgängerindexwerte für das Beispielfahrzeug der Klasse Kompakt (Test 2013)

Bei aufgestellter Haube nehmen die Kopfaufprallgeschwindigkeiten im Hauben-, Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereich zu, während sie im mittleren und oberen Windschutzscheibenbereich abnehmen. Insgesamt verschlechtern sich dadurch sowohl der Kinder- als auch der Erwachsenenindexwert, da für letzteren die Relevanz des Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereichs im Zuge der Vorverlagerung der Kopfaufprallorte zunimmt. Mit einem Radfahrerairbag können für Kinder und Erwachsene Indexwerte auf gleichem Niveau wie bei einer Halbierung der Fahrzeuggeschwindigkeit erzielt werden. Somit profitieren bei der Klasse Kompakt sowohl Radfahrer als auch Fußgänger von einem erweiterten Windschutzscheibenairbag.

4.3.2 Beispielfahrzeug der Klasse Limousine

Trotz guter Struktureigenschaften fallen die in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Radfahrerindexwerte für das Beispielfahrzeug der Klasse Limousine hoch aus, vor allem mit Hinblick auf Erwachsene. Aufgrund deutlich niedrigerer durchschnittlicher Kopfaufprallgeschwindigkeiten in allen WAD-Streifen der Fronteinteilung stellen sich die Ergebnisse für Fußgänger, welche in Abb. 4-50 dargestellt sind, äußerst positiv dar. Hierbei bleibt zu beachten, dass die Struktureigenschaften des Basisfahrzeuges auf Prüfergebnissen mit aktiver Haube beruhen (Kapitel 4.2.2). Entscheidend ist aber auch, dass die durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeiten im gesamten Haubenbereich unterhalb von 30 km/h liegen. Durch die weiter vorne liegenden Kopfaufprallorte der Fußgänger ist die Relevanz des Haubenbereichs für Erwachsene mit über 55% ebenfalls signifikant, was für Radfahrer nicht der Fall ist (Anteil: 1,7%).

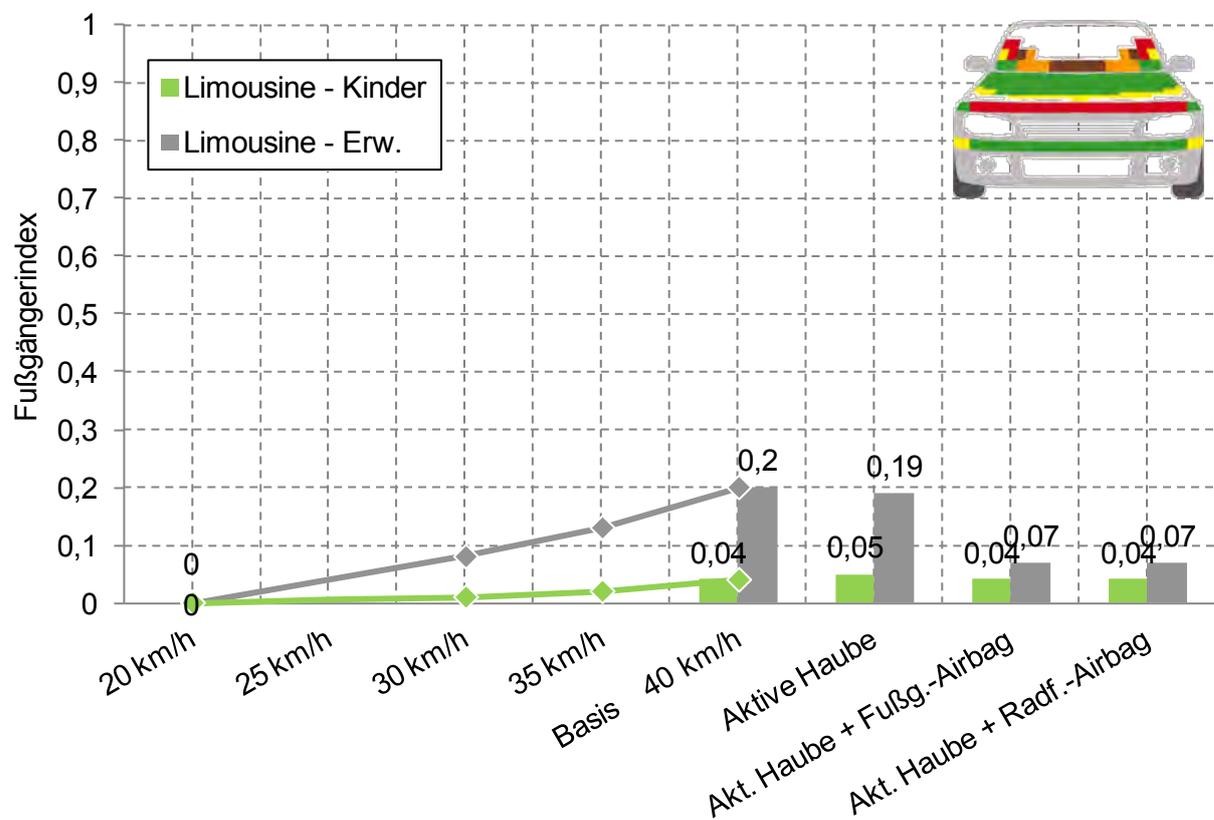


Abb. 4-50: Fußgängerindexwerte für das Beispielfahrzeug der Klasse Limousine (Test 2014)

Durch die guten Eigenschaften des Basisfahrzeuges ist das zusätzliche Schutzpotential weiterer Maßnahmen eingeschränkt. Während ein Airbag für Kinder nicht relevant ist, adressiert er einen Großteil der außerhalb des Haubenbereichs auftretenden Erwachsenen. Des Weiteren reduziert sich das Risiko einer schweren Kopfverletzung für eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 20 km/h auf null.

Für das generische Fahrzeugmodell der Klasse Limousine fallen die Werte aufgrund der definierten generischen HIC-Verteilung erwartungsgemäß etwas höher aus (Abb. 4-51), liegen aber, vor allem für Kinder, deutlich unter den entsprechenden Radfahrerwerten (Abb. 4-44). Als Grund ist hier neben den niedrigeren Kopfaufprallgeschwindigkeiten auch zu nennen, dass trotz der gegenüber dem Beispielfahrzeug etwas kürzeren Front des generischen Fahrzeugmodells der Windlauf- und untere Windschutzscheibenbereich für Fußgänger aus der Gruppe der Kinder mit 6,3% im Gegensatz zu Radfahrern (49,5%) kaum Relevanz hat.

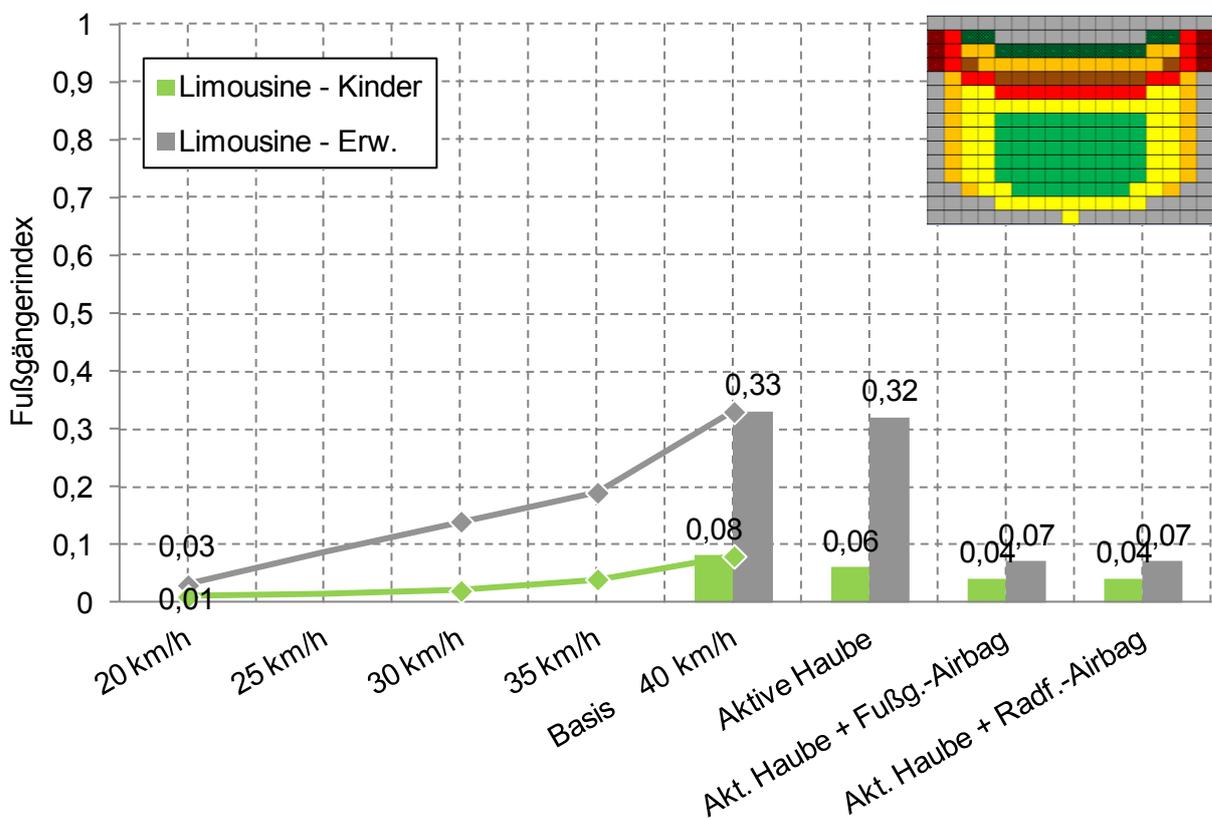


Abb. 4-51: Fußgängerindexwerte für das generische Fahrzeugmodell der Klasse Limousine

Das Schutzpotential der aktiven Haube wird durch höhere durchschnittliche Kopfaufprallgeschwindigkeiten im Haubenbereich beeinträchtigt. Bei optimierter passiver Schutzausstattung, d.h. aktive Haube plus Windschutzscheibenairbag, erzielen das generische Fahrzeugmodell und das Beispielfahrzeug identische Indexwerte, zumal die zugrunde liegenden klassenspezifischen Kinematikparameter einheitlich sind. Aufgrund der schlechteren Struktureigenschaften der generischen HIC-Verteilung kann das Verletzungsrisiko bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 20 km/h nicht ganz auf null abgesenkt werden.

4.3.3 Beispielfahrzeug der Klasse Van

Auch beim Beispielfahrzeug der Klasse Van ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den zuvor betrachteten Fahrzeugen, d.h. deutlich bessere Indexwerte für Fußgänger im Zuge signifikant niedrigerer Kopfaufprallgeschwindigkeiten (Abb. 4-52). Für das Basisfahrzeug beträgt bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h die höchste durchschnittliche Kopfaufprallgeschwindigkeit 36,8 km/h, welche im mittleren Windschutzscheibenbereich erzielt wird.

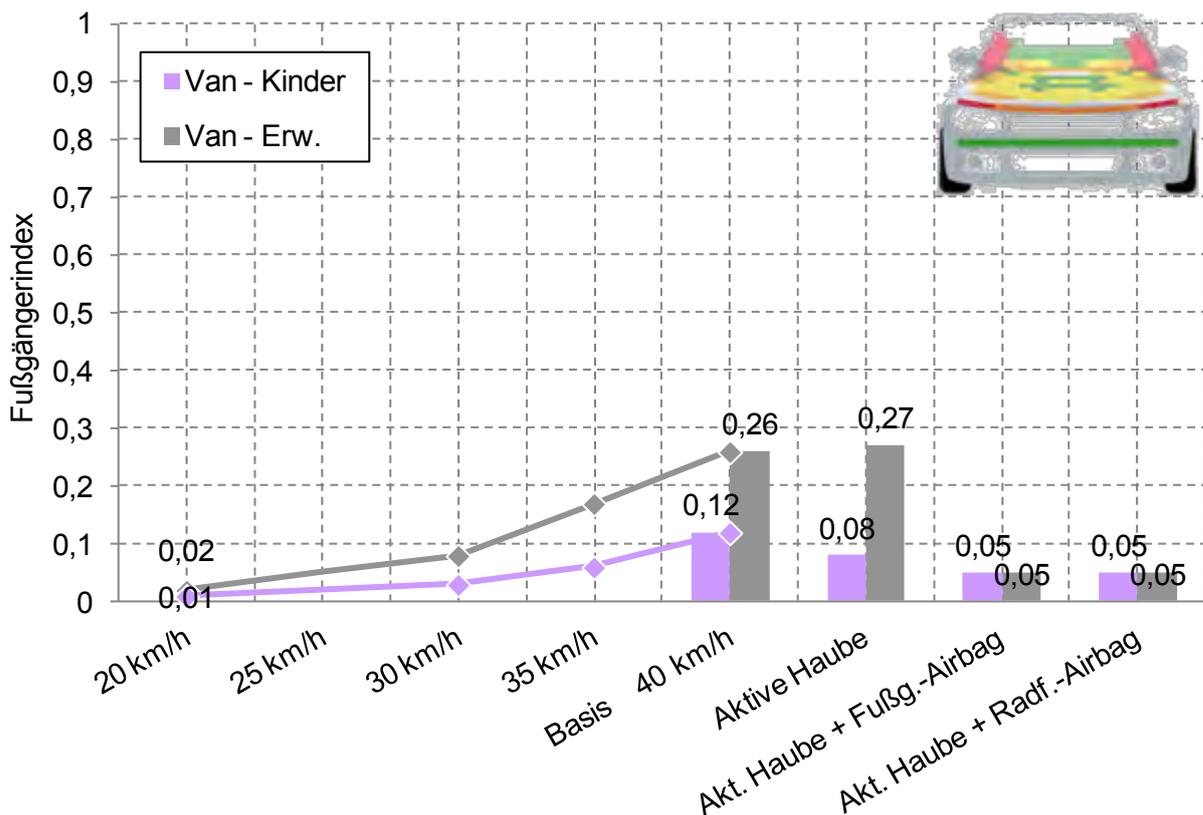


Abb. 4-52: Fußgängerindexwerte für das Beispielfahrzeug der Klasse Van (Test 2013)

Die Struktureigenschaften des Beispielfahrzeuges ermöglichen bei Halbierung der Fahrzeuggeschwindigkeit eine Reduzierung des Risikos einer schweren Kopfverletzung für Erwachsene und Kinder auf nahezu null. Aber bereits für eine Geschwindigkeitsreduktion von 10 km/h liegen die Indexwerte beider Gruppen unter 0,1, was bei Implementierung eines Windschutzscheibenairbags ebenfalls der Fall ist.

4.3.4 Beispielfahrzeug der Klasse SUV

Besonders ausgeprägt ist der Rückgang der Indexwerte der Fußgänger gegenüber den Radfahrern für das Beispielfahrzeug der Klasse SUV. So fällt der Erwachsenenindex des Basisfahrzeuges von 0,88 bei Radfahrern (Abb. 4-46) auf lediglich 0,11 für Fußgänger (Abb. 4-53). Dies resultiert aus einem Zusammenspiel der sich für Fußgänger ergebenden Vorverlagerung der relevanten Kopfaufprallbereiche und der im Falle des SUV besonders ausgeprägten Reduktion der durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeiten. Bezogen auf die Erwachsenen

bedeutet dies, dass die Relevanz des kritischen Windlaufs- und unteren Windschutzscheibenbereichs von 66% auf knapp 7% abnimmt, bei gleichzeitiger Reduktion der durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeiten in diesem Gebiet von 46 km/h auf etwas über 28 km/h. Im für Kinder relevanten Bereich der Haube liegen die durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeiten der Fußgänger allesamt unter 25 km/h, für die relevantesten WAD-Streifen der Erwachsenen unterhalb von 32 km/h.

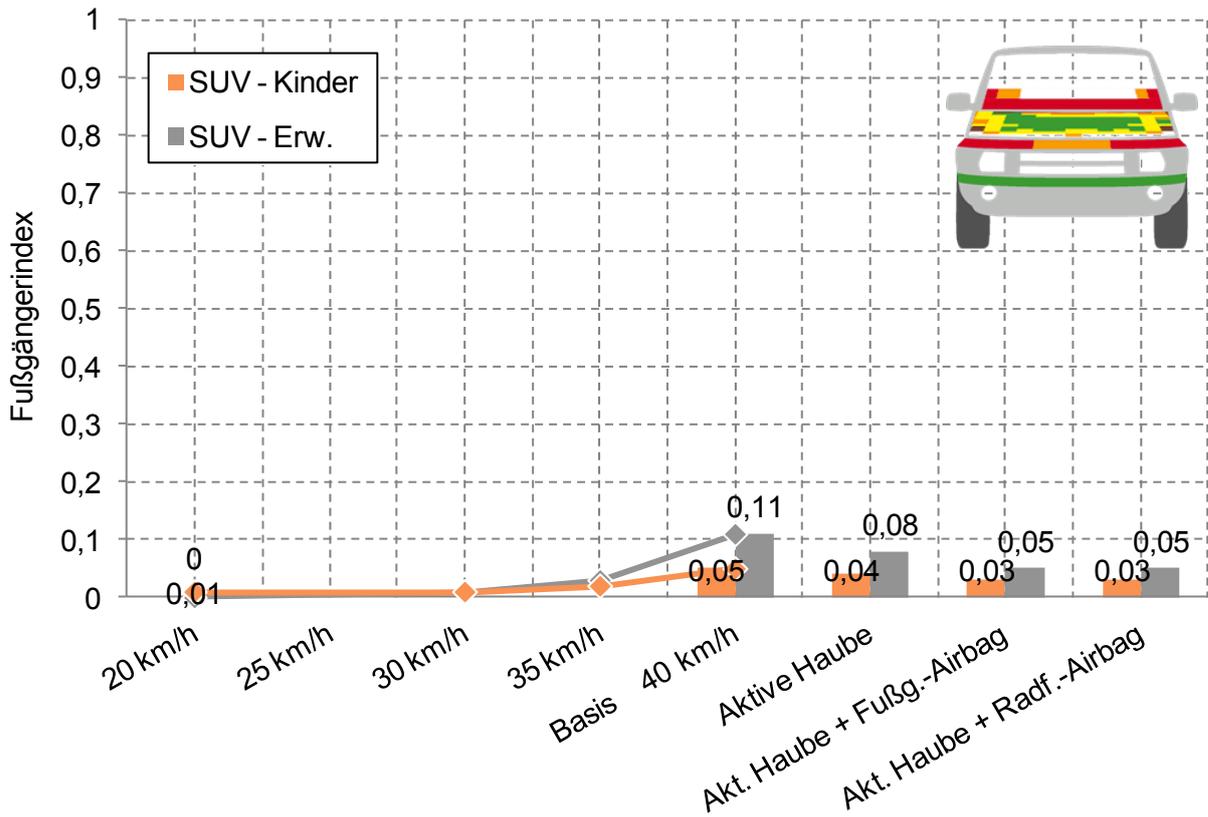


Abb. 4-53: Fußgängerindexwerte für das Beispielfahrzeug der Klasse SUV (Test 2013)

Aufgrund der niedrigen Basisindexwerte tendieren die Ergebnisse für reduzierte Fahrzeuggeschwindigkeiten schon früh gegen null. So betragen bei einer Geschwindigkeitsreduktion um 10 km/h sowohl der Kinderindex als auch der Erwachsenenindex nur noch 0,01, was mit einem AIS3+-Kopfverletzungsrisiko von 1% gleichzusetzen ist.

4.3.5 Beispielfahrzeug der Klasse OneBox

Infolge der schlechteren Struktureigenschaften des Beispielfahrzeuges der Klasse OneBox sind auch die Fußgängerindexwerte des Basisfahrzeuges etwas höher als für die Fahrzeuge zuvor (Abb. 4-54). Da hier die durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeiten für alle WAD-Streifen aber deutlich unterhalb der Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h liegen, fallen die Ergebnisse dennoch moderat aus. Während die Kinder bei Implementierung einer aktiven Haube, abgesehen vom ersten WAD-Streifen (Kapitel 4.1.4.1), von deutlich verbesserten Struktureigenschaften profitieren, kommt den Erwachsenen zusätzlich eine signifikante Reduzierung der Kopfaufprallgeschwindigkeiten in den hinteren Bereichen zugute.

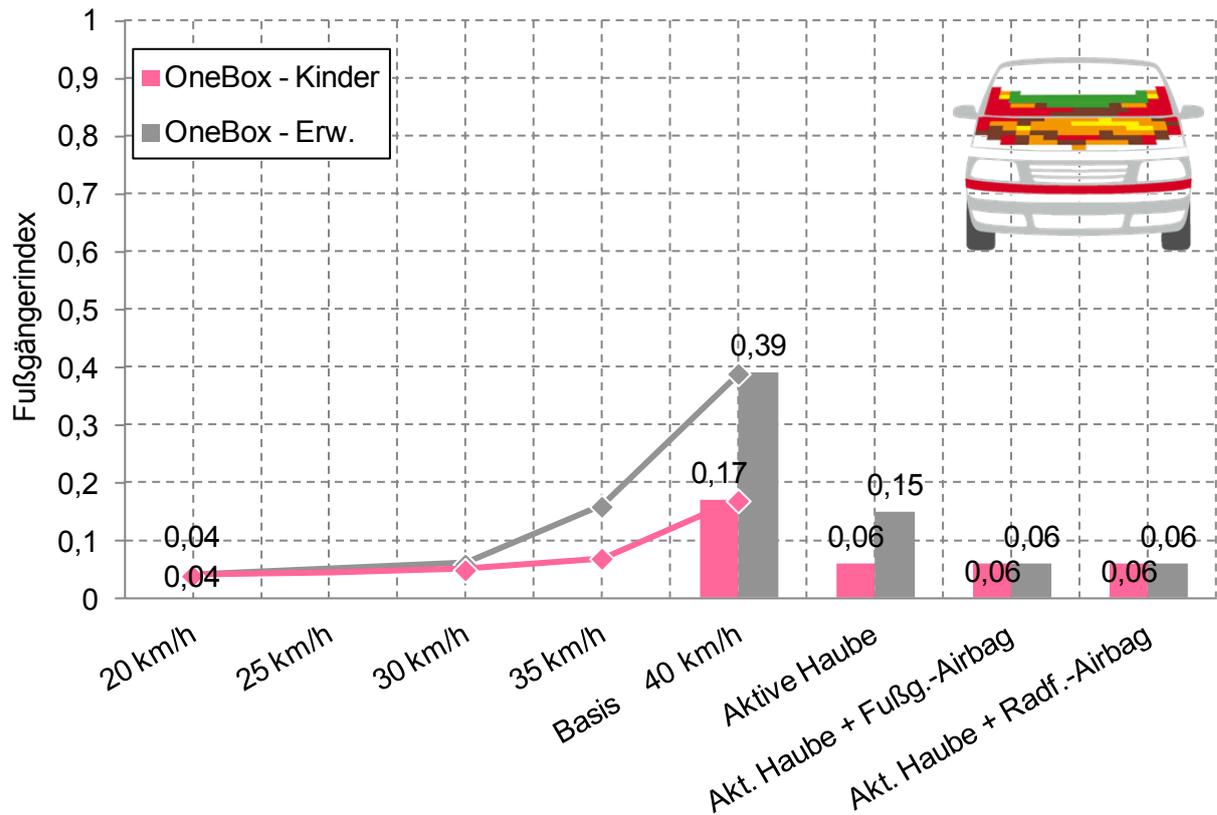


Abb. 4-54: Fußgängerindexwerte für das Beispielfahrzeug der Klasse OneBox (Test 2013)

Durch Erweiterung der aktiven Haube um einen Windschutzscheibenairbag kann der Erwachsenenindex auf das Niveau der Kinder gebracht werden. Aufgrund der im Vergleich zur Fahrzeuggeschwindigkeit generell niedrig ausfallenden Kopfaufprallgeschwindigkeiten des Basisfahrzeuges verringert sich das Kopfverletzungsrisiko bei Reduktion der Fahrzeuggeschwindigkeit entsprechend schnell. Bereits bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 30 km/h liegen sowohl der Kinderindex als auch der Erwachsenenindex unter 0,1.

4.3.6 Klasse Sportwagen

Das Beispielfahrzeug der Klasse Sportwagen erreicht Fußgängerindexwerte auf ähnlichem Niveau wie das OneBox-Fahrzeug. Die durchschnittliche Kopfaufprallgeschwindigkeit im mittleren und oberen Windschutzscheibenbereich, dessen Relevanz für Erwachsene 63% beträgt, liegt deutlich über den Werten der übrigen Bereiche. Da neben einem kleinen Anteil des vorderen Dachbereichs das übrige Drittel im struktursteiferen Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereich aufkommt, fällt der Erwachsenenindex beim Basisfahrzeug im Vergleich zum Kinderindex doppelt so hoch aus. Folglich kann mittels eines Windschutzscheibenairbags eine signifikante Verbesserung diesbezüglich erzielt werden, zumal durch die zugehörige aktive Haube niedrigere Kopfaufprallgeschwindigkeiten im relevanten Aufprallbereich der Erwachsenen hervorgerufen werden. Aber auch der Betrag des Kinderindex reduziert sich deutlich und kann gegenüber einer reinen aktiven Haube nochmals halbiert werden.

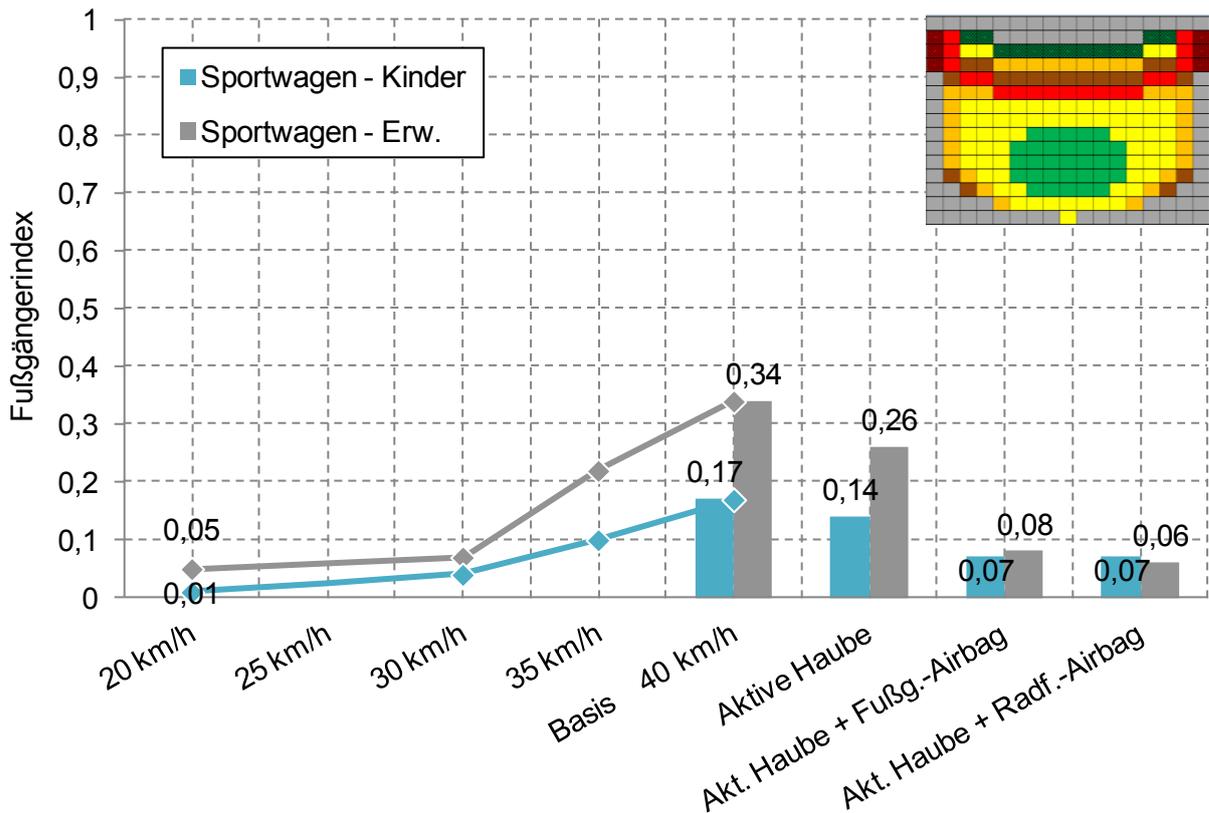


Abb. 4-55: Fußgängerindexwerte für generisches Fahrzeugmodell der Klasse Sportwagen

Bei Reduktion der Fahrzeuggeschwindigkeit um 10 km/h lassen sich der Kinder- und Erwachsenenindex für den Sportwagen ebenfalls unter 0,1 und damit auf Windschutzscheibenairbagniveau absenken. Auch hier bleibt für den Erwachsenenindex bei einer weiteren Reduktion um 10 km/h ein Restrisiko aufgrund der im Zuge der Vorverlagerung der Kopfaufprallorte zunehmenden Relevanz des Windlaufbereichs bestehen.

4.3.7 Fazit

Für alle Fahrzeugklassen fallen die Radfahrerindexwerte deutlich höher aus als die entsprechenden Fußgängerindexwerte. Während für die Fußgänger sämtliche Erwachsenenwerte der Basisfahrzeuge unterhalb von 0,4 und sämtliche Kinderwerte unterhalb von 0,2 liegen, weisen die Radfahrer für Kinder Indexwerte von 0,4 bis 0,74 und für Erwachsene von 0,48 bis 0,88 auf. Der Grund dafür sind die hohen durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeiten der Radfahrer, welche oftmals, vor allem in den relevanten Kopfaufprallbereichen der Erwachsenen, oberhalb der Fahrzeuggeschwindigkeit liegen, was bei den Fußgängern nicht der Fall ist. Zudem nimmt durch die weiter hinten liegenden Kopfaufprallorte der Radfahrer die Relevanz des kritischen Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereichs für Kinder in der Regel zu. Dies hat auch Auswirkungen auf das Schutzpotential einer aktiven Haube, welches für Radfahrer nur beim Beispielfahrzeug der Klasse SUV und weniger ausgeprägt auch beim Van zum Tragen kommt, während sich die Indexwerte der übrigen Fahrzeuge durch eine aktive Haube teilweise sogar verschlechtern. Dies betrifft beim Beispielfahrzeug

der Klasse Kompakt vor allem Kinder, aber auch Erwachsene. In den Klassen Limousine, OneBox und Sportwagen gilt dies jeweils nur für Erwachsene, wobei diesbezüglich beim OneBox-Fahrzeug der höchste Anstieg zu verzeichnen ist. Hier wird aufgrund des bereits hohen Basiswertes (0,85) mit 0,97 der Höchstwert aller berechneten Indexwerte erreicht. Somit ergibt sich für Erwachsene ein nahezu hundertprozentiges Verletzungsrisiko. Zurückzuführen ist dies auf teils deutlich höhere Kopfaufprallgeschwindigkeiten im Zuge der Haubenaufstellung. Darüber hinaus macht sich, vor allem für die Klasse Kompakt, die Berücksichtigung des zusätzlichen Risikos durch den Haubenspalt und die damit verbundene Definition eines Mindest-HIC-Niveaus (Kapitel 4.1.4.1) bemerkbar. Dies gilt auch für die Indexergebnisse der Fußgänger, wobei hier im Falle des OneBox-Fahrzeuges die aktive Haube ein hohes Schutzpotential aufweist.

Ein Windschutzscheibenairbag offenbart für Radfahrer sowohl bei Erwachsenen als auch Kindern ein in der Regel hohes Schutzpotential. Einzig beim SUV werden Kinder aufgrund der langen Haubengeometrie durch einen Windschutzscheibenairbag kaum adressiert. Ein Mehrwert durch die Erweiterung des Fußgängerairbags zu einem Radfahrerairbag ergibt sich in erster Linie für Erwachsene und das hauptsächlich in der Klasse Kompakt bzw. bedingt auch in der Klasse Sportwagen. Dies gilt in stark eingeschränktem Maße ebenfalls für Fußgänger, welche generell von einem Windschutzscheibenairbag profitieren und hierbei Indexwerte auf Niveau einer Geschwindigkeitshalbierung erreichen können. Somit stellt der Windschutzscheibenairbag sowohl für Radfahrer als auch für Fußgänger eine effektive Schutzmaßnahme dar.

Durch Halbierung der Fahrzeuggeschwindigkeit lassen sich sämtliche Fußgängerindexwerte auf einen Betrag deutlich unter 0,1 und in fast allen Fällen sogar unter 0,05 reduzieren. Trotz der hohen Basisindexwerte der Radfahrer werden diese bei halber Fahrzeuggeschwindigkeit in nahezu allen Klassen für Kinder ebenfalls unter einen Betrag von 0,1 abgesenkt. Bei den Erwachsenen geht der Geschwindigkeitsabbau oftmals mit einer Vorverlagerung der Kopfaufprallorte aus dem mittleren und oberen Windschutzscheibenbereich in den kritischeren Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereich einher, wodurch der positive Effekt der reduzierten Kopfaufprallgeschwindigkeiten teilweise kompensiert wird und der Rückgang der Indexwerte weniger ausgeprägt ist. Dennoch werden auch hier signifikante Reduktionen der Basisindexwerte erzielt. Durch Implementierung leistungsstarker aktiver Systeme, welche neben Fußgängern auch Radfahrer zuverlässig erkennen, können für beide Gruppen von ungeschützten Verkehrsteilnehmern sowohl Kinder als auch Erwachsene klassenübergreifend in einem hohen Maße adressiert und geschützt werden. Voraussetzung dafür sind allerdings gute Struktureigenschaften bzw. ein überdurchschnittliches passives Schutzniveau.

5 Full-Scale-Tests

Neben den in den Kapiteln 4.1.5.2 und 4.1.5.3 vorgestellten Kopfpimpaktorversuchsreihen werden zur weiteren Untersuchung der Radfahrerunfallkinematik auch Full-Scale-Tests, d.h. Realversuche mit einem Radfahrerdummy, durchgeführt. Das Versuchsfahrzeug entspricht dabei dem im Rahmen der Kopfpimpaktortests eingesetzten Fahrzeug (Abb. 9-14 links). Anhand der Full-Scale-Tests soll der Einfluss einer reduzierten Kollisionsgeschwindigkeit auf die Radfahrersicherheit demonstriert werden. Dazu wird ein Polar-II Dummy auf einem realen Fahrrad platziert und mit drei verschiedenen Geschwindigkeiten (40 km/h, 30 km/h und 20 km/h) durch das Versuchsfahrzeug angefahren. Dabei wird gleichzeitig auch dem Fahrrad eine Geschwindigkeit durch die Prüfanlage aufgegeben. Die Versuchsrandbedingungen orientieren sich an den in der Simulation betrachteten Fahrzeug-Radfahrer-Unfallkonstellationen. Im Vorfeld der eigentlichen Full-Scale-Tests werden zunächst entsprechende Simulationen mit einem Modell des Versuchsfahrzeuges (Abb. 9-14 rechts) und verschiedenen Anstoßkonstellationen ausgewertet. Mit Hinblick auf den in den Versuchen eingesetzten Polar-II Dummy und dessen anthropometrischen Eigenschaften wird dabei ausschließlich das Radfahrermodell des 50%-Mannes berücksichtigt.

5.1 Simulationen

Auch für die Simulationen mit dem Versuchsfahrzeug werden die in Kapitel 3 für die generischen Modelle definierten Anstoßkonstellationen, d.h. der zentrale rechtwinklige Anprall und der rechtwinklige Eckanprall (Abb. 3-7), berücksichtigt, wiederum für die vier Fahrzeuggeschwindigkeiten 40, 35, 30 und 20 km/h. Daraus ergeben sich für den 50%-Mann insgesamt 32 Simulationen, deren Ergebnisse in Abb. 5-1 für den im Rahmen der Versuche vorgesehenen zentralen Anprall dargestellt sind. Die Ergebnisse für den Eckanprall finden sich in Abb. 9-17 im Anhang.

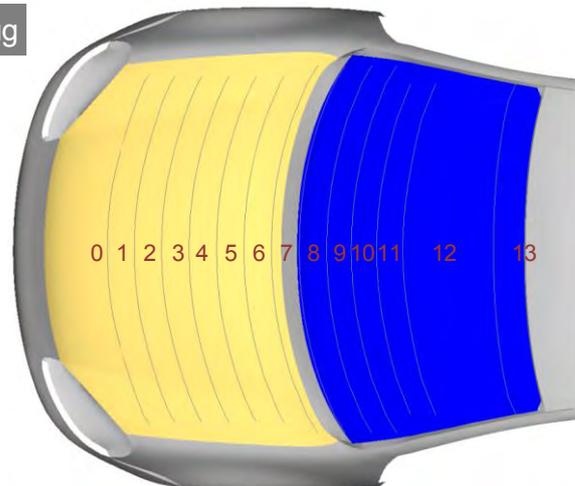
Aufgrund des weiten Geschwindigkeitsspektrums ergibt sich auch ein entsprechend breites Spektrum der Abwickellängen der Kopfaufprallorte, welches beim zentralen Anprall von 1420 mm bis 2085 mm reicht, d.h. vom hinteren Haubenbereich bis in den mittleren Windschutzscheibenbereich. Zudem zeigt sich ein signifikanter Einfluss der Pedalstellung. Auffällig ist die Pedalstellung fahrzeugseitiges Bein oben, die für alle Anprallkonfigurationen die niedrigsten Abwickellängen sowie die kürzesten Kopfaufprallzeiten aufweist. Dies gilt weitestgehend auch für den Eckanprall, wo insgesamt nochmals größere Abwickellängen bis zum Bereich der Dachvorderkante erreicht werden (Abb. 9-17).

Beim zentralen Anprall liegen sämtliche Kopfaufprallgeschwindigkeiten deutlich oberhalb der Fahrzeuggeschwindigkeit, während sie beim Eckanprall, abgesehen von den Konstellationen mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 20 km/h, in der Regel niedriger als die Fahrzeuggeschwindigkeit ausfallen. Der höchste Wert wird bei zentralem Anprall und einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h für die untere Pedalstellung erzielt. Hier beträgt die Kopfaufprallgeschwindigkeit in der Simulation 58 km/h. Bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 20 km/h kommt es für die untere und vordere Pedalstellung zu keinem Kopfanprall auf der Fahrzeug-

front. Der Kopf bewegt sich hier im Zuge der relativ hohen Eigengeschwindigkeit quer zur Fahrtrichtung des Fahrzeugs an der Front vorbei.

50%-Mann $V_{\text{Radf.}} = 15 \text{ km/h}$	Pedal- stellung	$v_{\text{Fzg.}}$ [km/h]	WAD [mm]	WAD Bereich	$v_{\text{rel, Kopf}}$ [km/h]	$\alpha_{\text{rel, Kopf}}$ [°]	t_{Kopf} [ms]	
Zentraler rechtwinkliger Anprall	oben	40	1710	8	49,4	85,8	126	
	unten	40	1995	10	58	85,3	135	
	vorne	40	2085	11	45,4	79,3	146	
	hinten	40	2075	11	54,9	88,3	141	
	oben	35	1670	7	41	82,4	141	
	unten	35	1975	10	41,8	83,4	153	
	vorne	35	2035	11	43,3	85,4	164	
	hinten	35	2030	11	48,2	88,2	157	
	oben	30	1660	7	34	79,9	161	
	unten	30	1925	10	48,6	80,2	179	
	vorne	30	1965	10	36,1	83,7	189	
	hinten	30	1940	10	46,8	81,7	178	
	oben	20	1420	5	21,7	77,1	211	
	unten	20	Kein Kopfanprall					
	vorne	20	Kein Kopfanprall					
	hinten	20	1630	7	28,8	85,3	251	

Versuchsfahrzeug



WAD [mm]	
Dach	
13	2100 - 2467
12	2000 - 2100
11	1900 - 2000
10	1800 - 1900
9	1700 - 1800
8	1600 - 1700
7	1500 - 1600
6	1400 - 1500
5	1300 - 1400
4	1200 - 1300
3	1100 - 1200
2	1000 - 1100
1	1000 - 1100

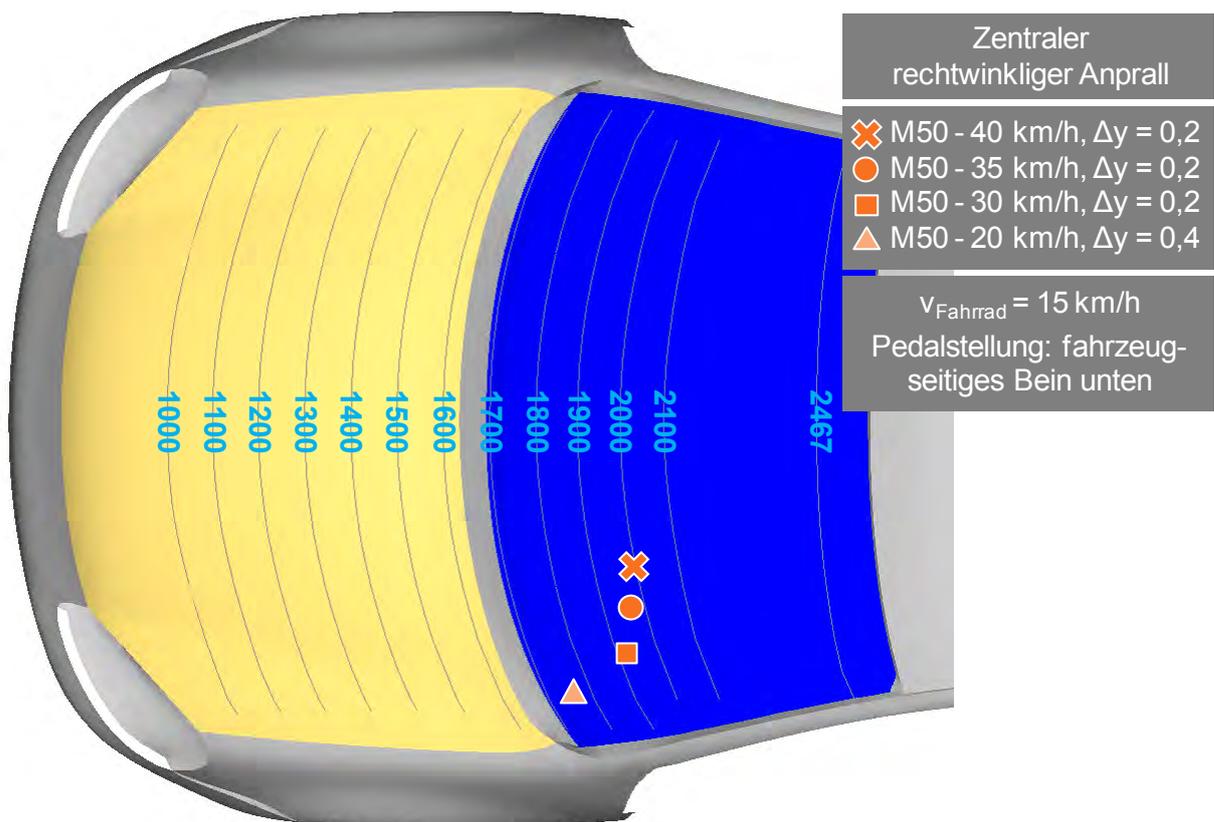
Abb. 5-1: Simulationsergebnisse des Versuchsfahrzeugs für den 50%-Mann bei einer Radfahrgeschwindigkeit von 15 km/h (zentraler rechtwinkliger Anprall)

Zur Vermeidung eines Nichtauftreffens des Kopfes auf die Front bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten, ist für die zentrale Anstoßkonstellation in Kapitel 2.1.3 bereits ein Versatz des Kurbeltretlagers von 20 cm relativ zur Fahrzeuglängsachse und entgegen der Fahrtrich-

tion des Radfahrers definiert worden. Erhöht man diesen auf 30 cm, so kommt es beim Versuchsfahrzeug auch für die untere und vordere Pedalstellung bei 20 km/h zu einem Kopfaufprall auf der Front. Die sich hierbei ergebenden Werte sind in Abb. 5-2 aufgeführt. Mit Hinblick auf die Full-Scale-Tests wird für den Versuch mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 20 km/h allerdings ein nochmals höherer Versatz von 40 cm gewählt (Abb. 5-3). Alle drei Versuche erfolgen dabei mit der Pedalstellung fahrzeugseitiges Bein unten. So ist eine Vergleichbarkeit zu den Full-Scale-Tests im BAST-Projekt gegeben, wo diese Pedalstellung mit Hinblick auf die Untersuchung der Beinbelastung beim Primäranprall ebenfalls definiert wird.

50%-Mann $v_{\text{Radf.}} = 15 \text{ km/h}$	Pedal- stellung	$v_{\text{Fzg.}}$ [km/h]	WAD [mm]	WAD Bereich	$v_{\text{rel, Kopf}}$ [km/h]	$\alpha_{\text{rel, Kopf}}$ [°]	t_{Kopf} [ms]
Zentraler rechth. Anprall $\Delta y = 0,3 \text{ m}$	unten	20	1610	7	34,9	77	235
	vorne	20	1630	7	27,4	87,7	253

Abb. 5-2: Simulationsergebnisse der unteren & vorderen Pedalstellung für eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 20 km/h und Verschiebung der Anstoßposition um 0,1 m



50%-Mann $v_{\text{Radf.}} = 15 \text{ km/h}$	Pedal- stellung	$v_{\text{Fzg.}}$ [km/h]	WAD [mm]	WAD Bereich	$v_{\text{rel, Kopf}}$ [km/h]	$\alpha_{\text{rel, Kopf}}$ [°]	t_{Kopf} [ms]
$\Delta y = 0,4 \text{ m}$	unten	20	1750	7	29,7	83,7	235

Abb. 5-3: Kopfaufprallorte des Versuchsfahrzeugs für den 50%-Mann bei zentralem Anprall mit unterer Pedalstellung und variierender $v_{\text{Fzg.}}$ ($v_{\text{Fahrrad}} = 15 \text{ km/h}$, $n = 4$)

Die sich bei unterer Pedalstellung für verschiedene Geschwindigkeiten des Versuchsfahrzeuges ergebenden Kopfaufprallorte werden in Abb. 5-3 nochmals veranschaulicht, wobei eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 35 km/h im Rahmen der Full-Scale-Tests nicht vorgesehen ist. Erwartungsgemäß nehmen die Abwickellängen mit reduzierter Fahrzeuggeschwindigkeit ab. Allerdings ist die Zunahme des Versatzes in y-Richtung infolge der konstanten Eigengeschwindigkeit des Radfahrers deutlich signifikanter. So erfolgt der Kopfaufprall bei 20 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit, trotz der Verschiebung der Anstoßposition um weitere 20 cm, in unmittelbarer Nähe zur A-Säule.

Während für die Pedalstellung fahrzeugseitiges Bein oben alle Simulationen einen Kopfaufprall auf dem fahrzeugseitigen Arm aufweisen, ist dies für die untere Pedalstellung nur bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 20 km/h der Fall. Es kommt hier zu einer entsprechend kürzeren Abwickellänge (Abb. 5-3). Aber auch die Simulationen mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 30 und 35 km/h weisen vor dem Kopfaufprall zumindest einen Kontakt mit dem Arm auf. Bei der vorderen und hinteren Pedalstellung kommt es dagegen zu keinem vorherigen Kontakt zwischen Kopf und Arm innerhalb der Simulation. Wie die Versuchsergebnisse in Kapitel 5.3 zeigen, ist dieser Aspekt für die Full-Scale-Tests allerdings nicht relevant, da sich der Arm des Polar-II Dummys anders verhält als der des Radfahrers innerhalb der Simulation und es hier zu keinem Kontakt des Kopfes mit dem Arm kommt.

5.2 Versuchsaufbau und Randbedingungen

Der als Versuchsträger ausgewählte VW Golf V (Abb. 9-14) wurde bereits im Vorgängerprojekt eingesetzt und verfügt über eine repräsentative Frontform. Mit Hinblick auf die seitens der verwendeten Fahrzeugmodelle (Abb. 3-1) abgebildeten Fahrzeugkategorisierung ist die Frontgeometrie des Golf V in das untere Spektrum der Klasse Limousine einzuordnen. Sie weist somit eine hohe Relevanz im realen Verkehrsgeschehen auf. Der Golf V erreichte im Euro NCAP-Test von 2004 19 Punkte im Fußgängerschutz, was 3 Sternen gemäß dem alten Ratingverfahren vor 2010 entspricht. Dieses sah noch eine separate Sternebewertung für den Fußgängerschutz vor, bei der maximal 4 Sterne erzielt werden konnten.

Die Versuchsrandbedingungen der mit dem Versuchsfahrzeug durchgeführten Dummyversuche orientieren sich an den in der Simulation betrachteten Fahrzeug-Radfahrer-Unfallkonstellationen (Kapitel 5.1). Dazu wird der Honda Polar-II Dummy auf einem realen, repräsentativen Fahrrad platziert und mit drei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten (± 1 km/h) durch das Versuchsfahrzeug in zentraler rechtwinkliger Anstoßkonstellation ($\pm 0,25$ m) angefahren. Dabei wird analog zur Simulation gleichzeitig auch dem Fahrrad eine für alle Versuche konstante Geschwindigkeit von 15 km/h ($\pm 1,5$ km/h) durch die Prüfanlage aufgegeben. Die sich daraus ergebene Versuchsmatrix ist in Abb. 5-4 dargestellt. Der erste Versuch erfolgt mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h und einem beim Erstkontakt angestrebten Versatz des Fahrrads zur Fahrzeuglängsachse von 0,2 m. Für die beiden weiteren Versuche wird die Fahrzeuggeschwindigkeit jeweils um 10 km/h reduziert, bei einem für den 20 km/h-Versuch entsprechend angepassten y-Versatz von 0,4 m. Mittels der verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten wird der Einfluss einer reduzierten Kollisionsgeschwindigkeit auf die

Radfahrersicherheit untersucht. Dadurch soll neben der generellen Radfahrerkinematik vor allem das Schutzpotential eines aktiven Bremssystems in Bezug auf Radfahrerunfälle veranschaulicht werden. Dabei ist auch die Kopfbelastung im Zuge des Sekundäraufpralls Gegenstand der Betrachtungen.

50%-Mann	Ver-such	Pedal-stellung	$v_{\text{Fzg.}}$ [km/h]	$v_{\text{Radfahrer}}$ [km/h]	Δy [m]	Kollisions-winkel [°]
Zentraler rechtwinkliger Anprall	1	unten	40	15	0,2	90°
	2	unten	30	15	0,2	90°
	3	unten	20	15	0,4	90°

Abb. 5-4: Versuchsmatrix

Der Versuchsaufbau zur Umsetzung von Full-Scale-Tests mit bewegtem Radfahrer geht aus Abb. 5-5 hervor. Der Antrieb des Versuchsfahrzeugs sowie des Radfahrers erfolgen über eine Sattelzugmaschine, die sich geschwindigkeitsgeregelt entgegen der Fahrtrichtung des Versuchsfahrzeugs vom Versuchsaufbau wegbewegt. Damit trotz variierender Fahrzeuggeschwindigkeiten die Radfahrgeschwindigkeit konstant bleibt, ist eine Übersetzungseinheit erforderlich. Der Radfahrer wird dabei über ein Prüfgestell geführt und positioniert. Das Prüfgestell wird kurz vor dem Fahrbahnrand vom Antrieb abgekoppelt und anschließend verzögert, wodurch sich der Radfahrer vom Gestell löst und die letzten drei Meter bis zur Anprallposition frei rollt.

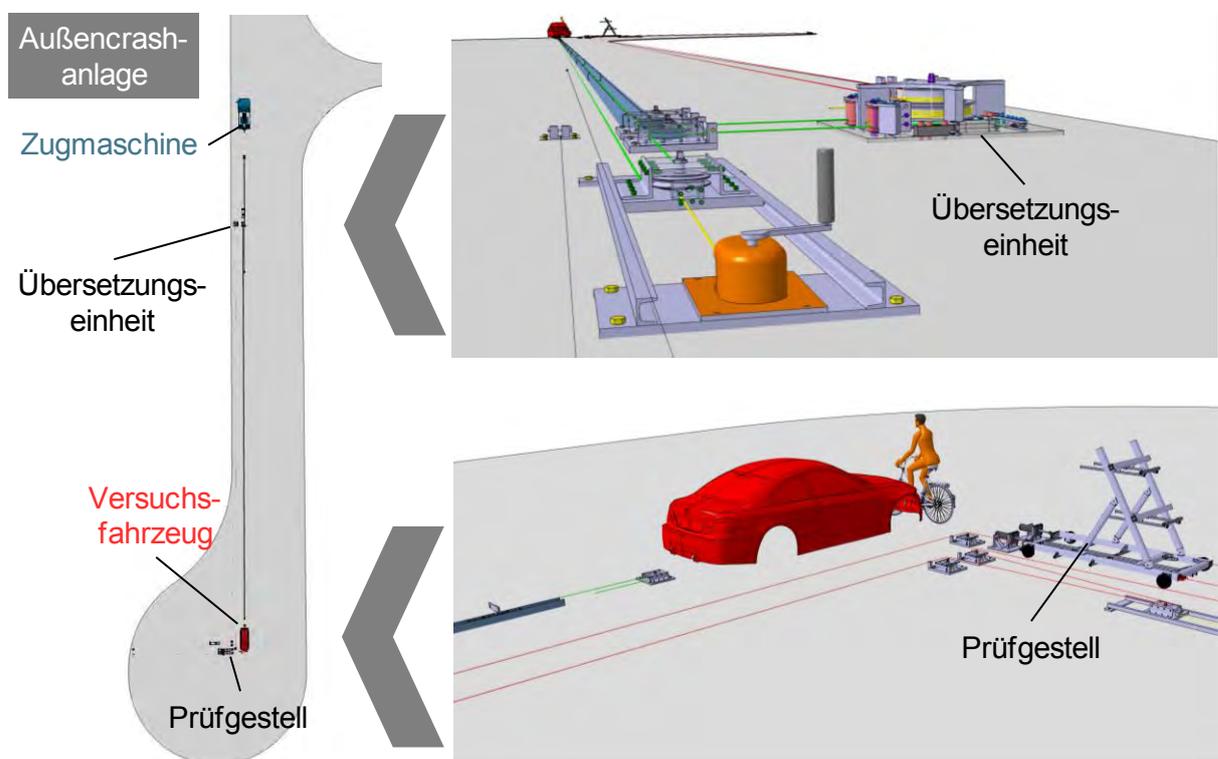


Abb. 5-5: Versuchsauslegung (Dummyaufhängung nicht abgebildet)

Zur Aufrechterhaltung der Körperhaltung und Positionierung des Dummies wird dieser bis unmittelbar vor dem Anprall durch eine oberhalb an einem Stahlseil geführten Aufhängung gehalten, welche mit einem magnetischen Auslösemechanismus verbunden ist. Der Versuchsaufbau geht aus Abb. 5-6 hervor. Die Versuchsaufzeichnung erfolgt mit drei Hochgeschwindigkeitskameras von der Seite, von oben sowie von vorne.

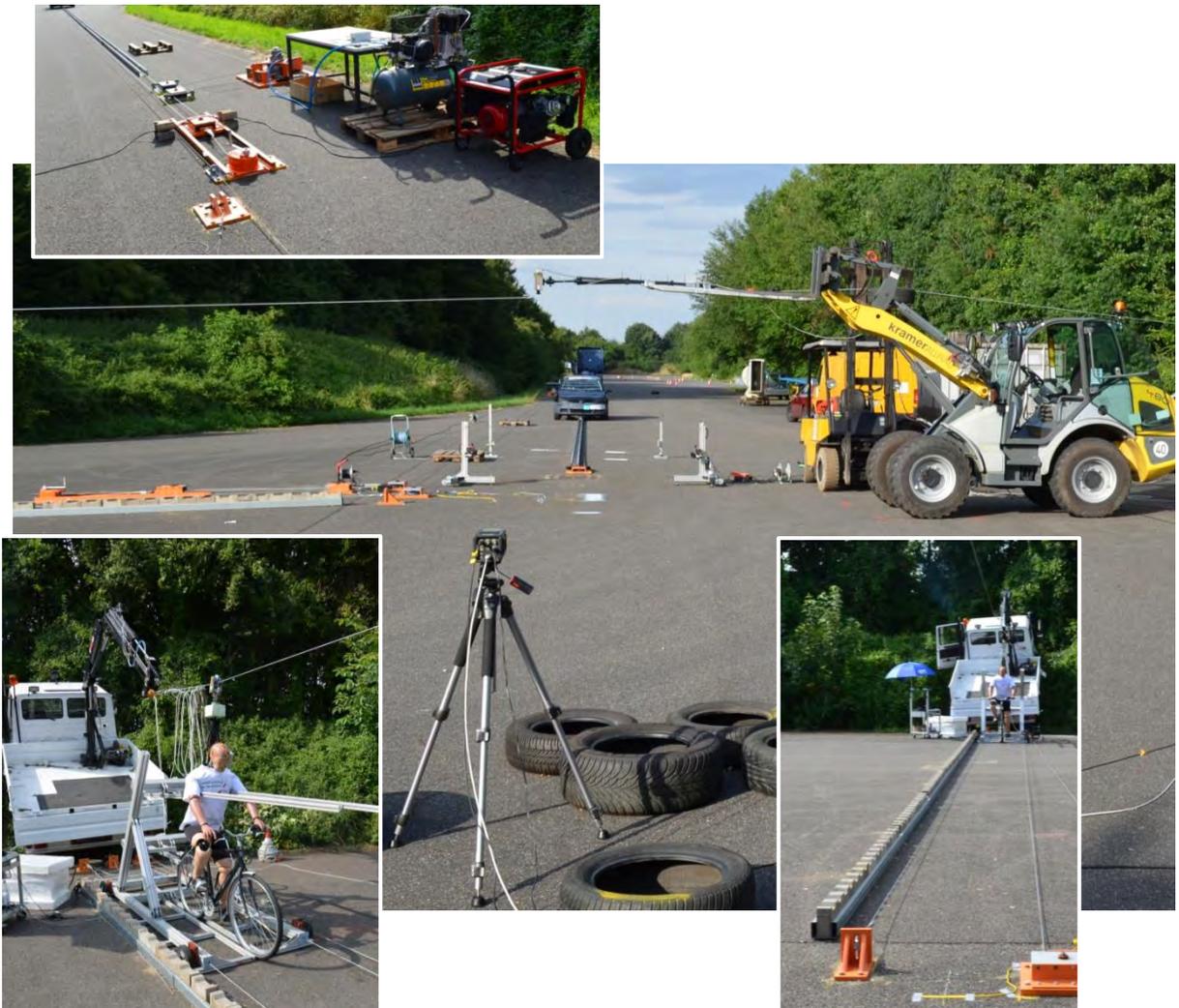


Abb. 5-6: Versuchsaufbau Außencrashanlage (20 km/h Versuch)

Vor den Versuchen werden die Schweinwerfer sowie das Markenemblem des Fahrzeugs abgeklebt und die WAD-Linien 1000 mm, 1500 mm, 1700 mm, 1900 mm, 2100 mm und 2300 mm am Fahrzeug markiert (Abb. 5-7 links). So lassen sich in den späteren Videosequenzen die Aufprallbereiche leichter zuordnen. Zur Verzögerung des Versuchsfahrzeugs nach dem Dummyanprall wird dieses mit einer Bremsaktuatorik versehen (Abb. 5-7 rechts unten). Durch Schaltung eines Ventils wird der Pneumatikzylinder der Bremsaktuatorik mit Druck beaufschlagt. Die ausfahrende Kolbenstange leitet daraufhin durch Betätigung der Fußbremse eine Vollbremsung ein. Da der Versuch mit laufendem Motor durchgeführt wird, ist der Bremskraftverstärker entsprechend mit Unterdruck versorgt.



Abb. 5-7: Versuchsfahrzeug

Der für die Versuche eingesetzte Polar-II Dummy von Honda wurde speziell zur Durchführung von Full-Scale-Tests zum Fußgängerschutz entwickelt und soll durch die Abbildung der beim Fußgängeranprall relevantesten Körperteile die Kinematik und Belastungen in einer Fahrzeug-Fußgänger-Kollision möglichst realitätsgetreu wiedergeben. Im Rahmen dieses Projektes wird er durch Platzierung auf einem Fahrrad zur Untersuchung der Unfallkinematik bei Fahrzeug-Radfahrer-Kollisionen eingesetzt. Der Aufbau des Polar-II Dummys gliedert sich in acht Körperregionen mit jeweils eigenen Messwertaufnehmern (Abb. 5-8). Durch diese umfassende Ausstattung lassen sich die verletzungsverursachenden Teile einer Fahrzeugfront identifizieren. An jeder Seite der Lendenwirbelsäule ist ein Datenerfassungssystem angebracht, sodass der Dummy während des Versuchs autark betrieben werden kann. Die Bewegungsfreiräume für Kopf, obere Wirbelsäule, Brustkorb und Hüfte sind im Rahmen der Entwicklung in Japan mittels Leichenversuchen validiert worden. Der Polar-II Dummy verfügt über eine detaillierte Abbildung des Brustkorbs (Thorax) und weist im Unterschied zu Insassendummys ein komplexes Kniegelenk auf. Die Tibia wird durch ein Rundprofil aus Faserverbundkunststoff zwischen Knie- und Fußgelenk abgebildet und kann wie im realen Unfall brechen.

Die Positionierung des Dummys und des dazu passend ausgewählten Versuchsfahrrads erfolgen gemäß den Randbedingungen in der Simulation, d.h. Referenzpunkt für die Position des Fahrrads vor dem Fahrzeug bildet der Mittelpunkt des Kurbeltretlagers. Die Körperhaltung des Dummys ergibt sich zum einen durch die beiden Gurte der Dummyaufhängung, welche direkten Einfluss auf die Oberkörperneigung hat, sowie durch die am Fahrrad fixierte

untere Pedalstellung der fahrzeugzugewandten Seite. Die Dummyfüße stehen mit entsprechendem Schuhwerk auf den Pedalen auf. Innerhalb des Prüfgestells wird der Dummy zusätzlich durch unter den Armen verlaufende Profile gestützt, die diesen bei Ausfahrt aus dem Gestell führen (Abb. 5-6 unten links & Abb. 5-9). Das Fahrrad wird durch das Gestell am Gepäckträger in Position gehalten und unten über eine Schiene geführt. Mittels Klebeband beidseitig um Mittelfinger und Lenkergriff sowie um Pedale und Schuhe erfolgt eine Fixierung des Dummys auf dem Fahrrad, welche unmittelbar beim Erstkontakt reißt. Kurz zuvor erfolgt die magnetische Auslösung der Dummyaufhängung, sodass ab diesem Zeitpunkt Dummy und Fahrrad frei von jeglicher Führung sind.

Körperteil	Messgrößen
Kopf	Beschleunigungen
Halswirbelsäule	Kräfte, Momente
Thorax	Beschleunigungen, Verschiebungen
Abdomen	Beschleunigungen, Verschiebungen
Becken	Beschleunigungen
Oberschenkel	Kräfte, Momente
Knie	Kräfte, Momente, Beschleunigungen
Unteres Bein	Kräfte, Momente

Abb. 5-8: Messgrößen am Polar-II Dummy [TAK07] [POL08]

Die Anbringung von Crashmarkern an Dummy und Fahrzeug dient der späteren Bestimmung der Kopfaufprallgeschwindigkeit mittels Punktverfolgung. Zudem werden an Kopf, Schulter, Hüfte und fahrzeugseitigem Knie Farbmarkierungen angebracht (Abb. 5-9 links), sodass die Anprallorte der jeweiligen Körperregionen später anhand der entsprechenden Abdrücke am Fahrzeug vermessen werden können. Die sich für den auf dem Fahrrad platzierten Dummy ergebenden Höhen der markierten Körperteile gehen ebenfalls aus Abb. 5-9 hervor.

Durch Vorbeifahrt des Versuchsfahrzeuges an einem Trigger wird der Auslösemechanismus der Dummyaufhängung aktiviert. Dies erfolgt ca. 30 ms vor dem Aufprall. Ein Verrutschen und Zusammensacken des Dummys aufgrund des Eigengewichts, der Eigengeschwindigkeit und der fehlenden Muskulatur wird so minimiert. Zur Absicherung der Auslösung von Dummy und Messtechnik werden zusätzliche Trigger am fahrzeugseitigen Dummybein angebracht (Abb. 5-9). Die Kameraaufzeichnung startet per Lichtschranke. Beim Überfahren einer auf der Fahrbahn befindlichen Reflektionsfläche durch eine laserbasierte Sende-/Empfangsein-

heit am Fahrzeugheck wird nach der Kollision eine Vollbremsung eingeleitet. Die Vorgabe aus [SAE07], dass die Verzögerung des Fahrzeugs nicht vor dem Primäraufprall des Kopfes erfolgen sollte, wird dabei erfüllt.

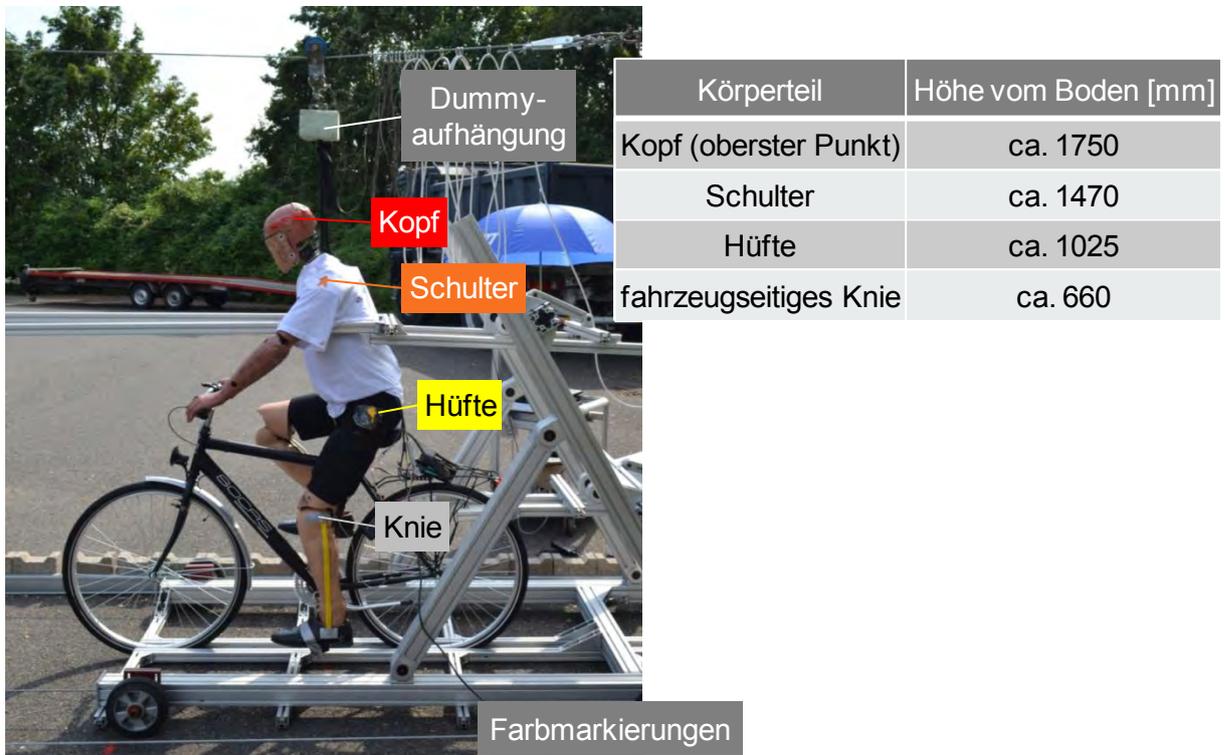


Abb. 5-9: Farbmarkierungen am Dummy & Höhen der jeweiligen Körperteile

Da der Sekundäraufprall Teil der Untersuchungen ist, werden im erwarteten Aufprallbereich keine Schutzmaßnahmen, d.h. Auslegung von Styroporplatten oder Autoreifen, ergriffen und auch keine Kameras platziert. Diese sind für die jeweiligen Tests in ausreichendem Abstand zur Anprallstelle positioniert. Somit erfolgt ein direkter Anprall des Dummies auf dem Asphalt.

5.3 Versuchsauswertung

Im Folgenden werden die Radfahrerkinematik sowie die Kopf- und Beinbelastung bis zum Primäraufprall für die jeweiligen Fahrzeuggeschwindigkeiten ausgewertet und abschließend mit den Simulations- und Komponententestergebnissen verglichen. Relevante Daten der anderen Körperregionen sind jeweils im Anhang aufgeführt. Des Weiteren wird für jeden Test die Aufprallkinematik sowie die Kopfbelastung beim Sekundäraufprall betrachtet.

5.3.1 Zentraler rechtwinkliger Anprall mit 40 km/h

Die Ausgangsgeschwindigkeit der Versuchsreihe, bei der jeweils der zentrale rechtwinklige Anprall eines Radfahrers betrachtet wird, beträgt 40 km/h (vgl. Abb. 5-4). In Abb. 5-10 ist die Kinematik bis zum Primäraufprall des Kopfes für die drei Kameraperspektiven dargestellt. Der Zeitpunkt $t = 0$ ms markiert den Erstkontakt zwischen Radfahrer und Fahrzeug.

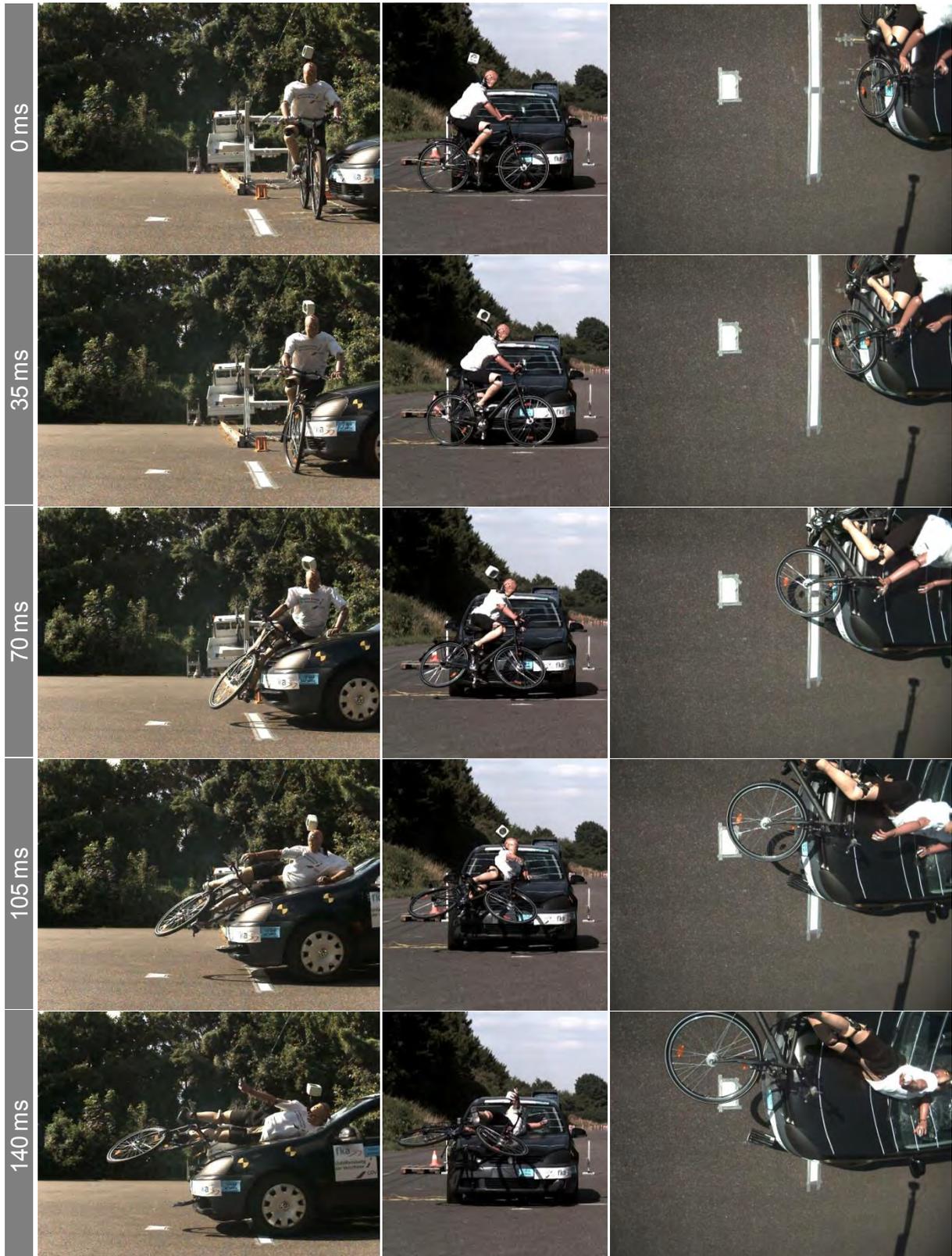


Abb. 5-10: Zentraler rechtwinkliger Anprall mit $v_{\text{Fzg}} = 39,9 \text{ km/h}$ und $v_{\text{Radfahrer}} = 14,1 \text{ km/h}$

Unmittelbar nach dem Erstkontakt des Radfahrers mit der Fahrzeugfront kommt es neben dem Kühlergrill zum Anprall des Knies am rechten Frontscheinwerfer (WAD ca. 640 mm,

Versatz zu y_0 ca. 440 mm), gefolgt vom Oberschenkel im Bereich der Haubenvorderkante. Nach ca. 60 ms kommt es zum Hüftaufprall. Die hier auf der rechten Haubenseite hinterlassene gelbe Markierung erstreckt sich in einem WAD-Bereich von 1090 bis 1150 mm, wobei der Versatz zur Fahrzeuglängsachse bei ca. 430 mm liegt (Abb. 5-11). Es werden dabei keine Deformationen auf der Haube verursacht. Nach 95 ms erfolgt der Anprall des fahrzeugseitigen Ellenbogens im unteren Windschutzscheibenbereich hinter der WAD 1900 Linie. Der anschließende Schulteranprall hinterlässt ca. 30 mm versetzt zur Fahrzeugmitte, allerdings bereits auf der Fahrerseite, eine orange Farbmarkierung bei einer WAD von ca. 1790 mm. Dies macht die diagonale Aufwurfbewegung des Radfahrers im Zuge der quer zum Fahrzeug gerichteten Eigengeschwindigkeit deutlich. Schließlich findet der Kopfanprall auf die vorgeschädigte Scheibe nach 140 ms bei einer Abwickellänge von etwa 2200 mm (rote Markierung reicht von WAD 2150 bis 2250 mm) statt. Die mittels Punktverfolgung bestimmte Kopfrelativgeschwindigkeit beträgt ca. 65 km/h.



Abb. 5-11: Beschädigungen & Unfallspuren bei $v_{Fzg} = 39,9$ km/h ($v_{Radfahrer} = 14,1$ km/h)

Generell ist hinsichtlich der zur Ermittlung der Kopfrelativgeschwindigkeit im Versuch verwendeten Methodik der Punktverfolgung anzumerken, dass diese eine gewisse Unschärfe beinhaltet. Die Grundlage der Punktverfolgung bildet die seitliche Kameraperspektive, sodass der Geschwindigkeitsvektor zwangsläufig nicht vollständig erfasst wird, d.h. die Geschwindigkeit in y-Richtung kann nur anhand der gemessenen Radfahrgeschwindigkeit in die Berechnung einfließen. Allgemein wird die Ungenauigkeit bei der Berechnung größer, je weiter der Kopf sich aus der kalibrierten Anfangsperspektive in die vordere oder hintere Ebene des Bildes dreht. Dennoch sollten die ermittelten Werte eine gute Annäherung an die reale Kopfrelativgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Kopfaufpralls darstellen.

Nach dem Primärprall des Kopfes setzt sich die Rotationsbewegung des Dummies fort, so dass sich der gesamte Körper um den Kopf drehend nach oben bewegt und die Beine schließlich senkrecht in der Luft stehen, bevor der Dummy im Zuge der eingeleiteten Vollverzögerung des Versuchsfahrzeugs nach vorne abgeworfen wird. Dabei beschädigt der herabfallende rechte Fuß die A-Säule und die Hüfte trifft abermals auf der Haube auf, was eine zweite gelbe Farbmarkierung auf der linken Haubenseite, ca. 300 mm versetzt zur Fahrzeuglängsachse, hinterlässt (Abb. 5-11). Anschließend treffen die Füße und Beine des Dummies unmittelbar vor dem noch verzögernden Fahrzeug zuerst auf der Fahrbahnoberfläche auf, gefolgt vom Oberkörper und letztendlich dem Kopf. Nach einer kurzen Rutschphase erreicht der Dummy seine Endlage (Abb. 5-11 rechts), welche vom Anprallort aus gemessen eine Längswurfweite des Kopfes von ca. 16 m und eine Querwurfweite von ca. 1,1 m aufweist. Das Fahrrad wird durch das Versuchsfahrrad nach oben weggeschleudert, beschreibt eine klassische Wurfparabel und prallt schließlich gegen ein Hindernis am Rande der Teststrecke. Es erzielt, gemessen vom Kurbeltretlager, eine Längswurfweite von ca. 22,5 m, bei einer Querwurfweite von ca. 4,5 m (Abb. 5-11 unten rechts).

Die Auswertung der vom Dummy aufgezeichneten Messdaten zeigt hinsichtlich der Kopfbeschleunigung und des sich daraus ergebenden HIC-Wertes beim Primärprall, trotz der berechneten Kopfaufprallgeschwindigkeit von 65 km/h, eine moderate Belastung (Abb. 5-12). So beträgt die Maximalbeschleunigung 125,6 g, woraus ein HIC-Wert von 598 resultiert. Hierbei sollte allerdings die Vorschädigung der Windschutzscheibe durch den Ellenbogen- und Schulteranprall einen signifikanten Effekt auf die Kopfbelastung haben. Die zweite, deutlich kleinere Spitze im Beschleunigungssignal wird durch den Kontakt des Kopfes mit der Instrumententafel hervorgerufen.

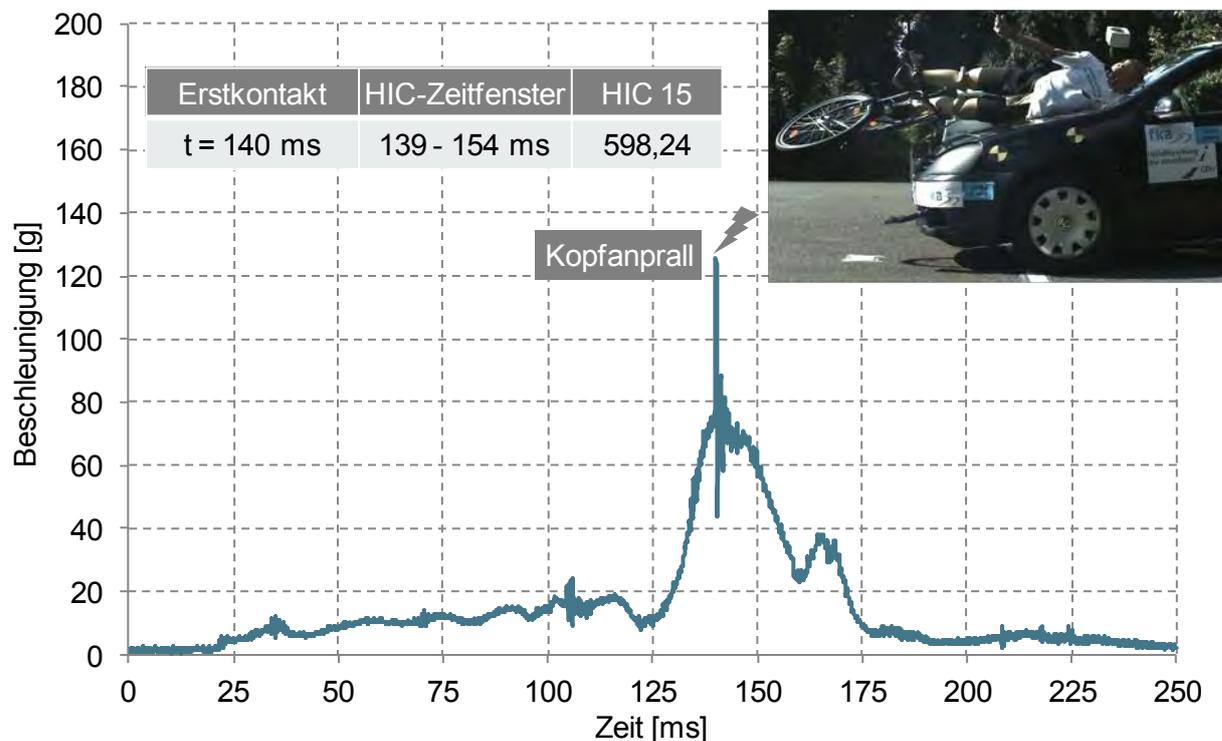


Abb. 5-12: Resultierende Kopfbeschleunigung bei $v_{Fzg} = 39,9$ km/h ($v_{Radfahrer} = 14,1$ km/h)

Die Maximalwerte der resultierenden Kraft im oberen und unteren Nackenbereich betragen beim Primärprall 2980 N bzw. 3129 N und werden beim Erstkontakt des Kopfes erzielt (Abb. 9-18). Das resultierende Moment erreicht Maximalwerte von 42 Nm bzw. 94 Nm (Abb. 9-19).

Die Verläufe der resultierenden Beschleunigung des Torsos sowie des Beckens sind im Anhang in Abb. 9-20 und Abb. 9-21 aufgeführt. Die maximale Torsobeschleunigung ist hoch und beträgt 226 g, während das Becken einen Maximalwert von 64 g erreicht. Für den Bereich oberes Schienbein/Knie ergibt sich in y-Richtung eine vielfach höhere maximale Beschleunigung (Abb. 5-13). Das Koordinatensystem des Dummies ist dabei so orientiert, dass die x-Achse von der Körpermitte aus nach vorne gerichtet ist, während die y-Achse nach rechts, d.h. weg vom Fahrzeug, zeigt. Die hohe Beschleunigungsspitze von 620 g wird durch Interaktion des Dummybeins mit dem Fahrrad hervorgerufen, welches im Zuge des Fahrzeuganpralls ebenfalls beschleunigt wird. Dies liegt deutlich über den Grenzwerten des bis 2014 bei Euro NCAP eingesetzten EEVC-Beinprüfkörpers, bei dem die untere Grenze für die Tibia Beschleunigung 150 g (20% Risiko für Unterschenkelbruch) bzw. die obere Grenze 200 g (40% Risiko) beträgt. Die Tibia des Dummies bricht im Versuch allerdings nicht.



Abb. 5-13: Beschleunigung a_y des fahrzeugseitigen Knies/Schienbeins (Knee/Tibia)

Die Verläufe der resultierenden Kraft auf Femur und Tibia gehen aus Abb. 5-14 hervor. Dabei ist der Höchstwert im unteren Tibiabereich (Nähe Fußgelenk) mit 2223 N ähnlich hoch wie im oberen Tibiabereich (Nähe Kniegelenk), wo ein Betrag von 2054 N erreicht wird. Die maximale Femurbelastung liegt auf höherem Niveau und wird etwas später erreicht. Hier ergibt sich bei $t = 42$ ms ein Höchstwert von 4322 N.

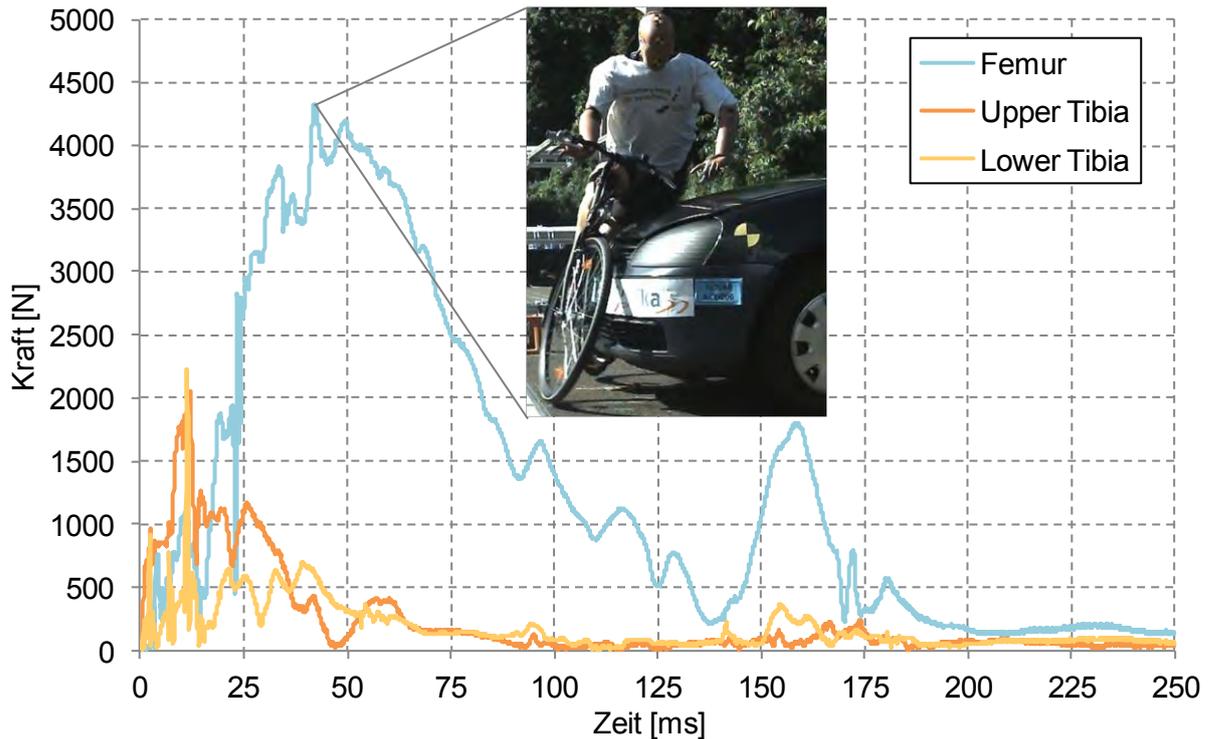


Abb. 5-14: Resultierende Kraft auf fahrzeugseitige Tibia & Femur

Hinsichtlich des Biegemomentes M_x liegen nur Daten für die Sensoren Upper Tibia und Femur vor, mit Maxima von -168 Nm im Tibia- bzw. -286 Nm im Femurbereich (Abb. 5-15). Die beim Flex PLI-Impaktor für die Tibia geltende obere Grenze von 340 Nm wird nicht erreicht.

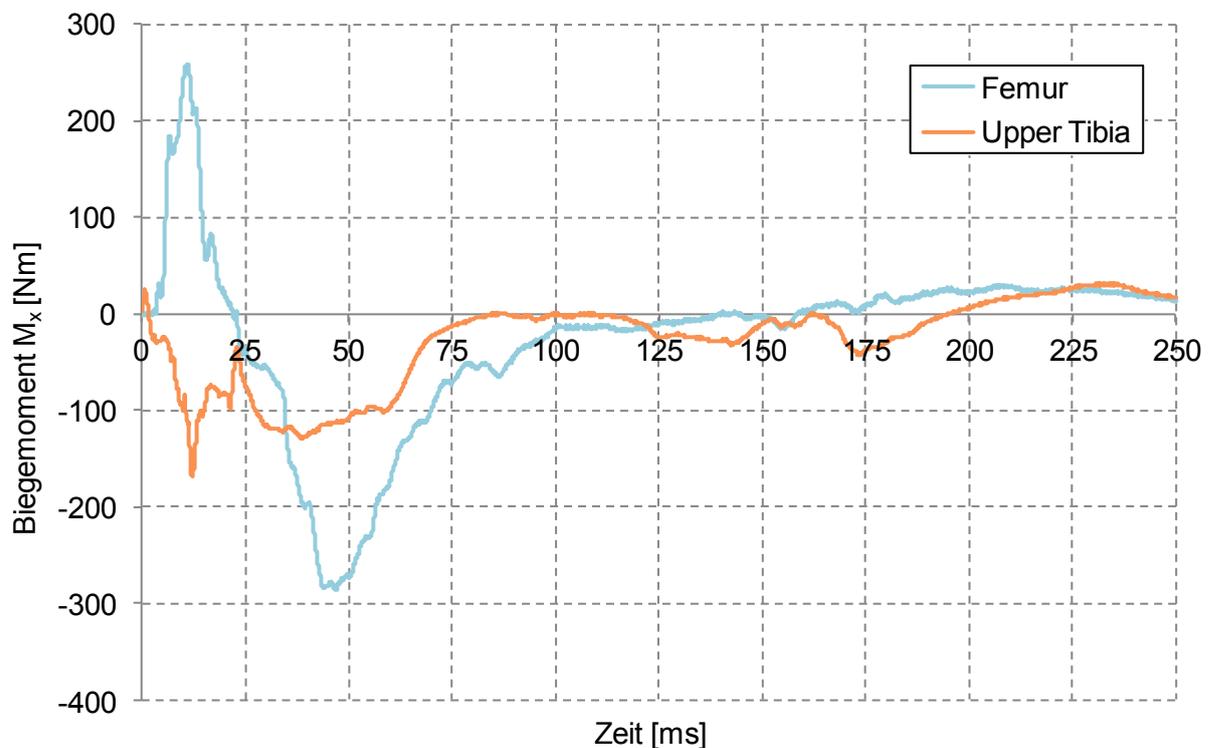


Abb. 5-15: Biegemoment M_x für fahrzeugseitige Tibia & Femur

Das Tibia-Maximum wird im Zuge des Kontakts mit dem Fahrradrahmen hervorgerufen, während der Höchstwert im Femur-Bereich beim anschließenden Anprall auf die Fahrzeugfront erreicht wird. Aber auch hier führt der vorherige Kontakt mit dem Fahrradrahmen zu einem hohen Biegemoment, welches mit 259 Nm nur knapp unterhalb des absoluten Maximums liegt, allerdings mit umgekehrten Vorzeichen.

Betrachtet man die Kopfbelastung beim Sekundäraufprall, so fällt diese im Vergleich zum Primäranprall erheblich höher aus. Der Kopf prallt 1,67 s nach Erstkontakt des Radfahrers mit dem Fahrzeug (t_0) auf dem Asphalt auf. Dabei wird eine resultierende Kopfbeschleunigung von 1645 g erreicht, d.h. die maximale Verzögerung des Kopfes ist hier mehr als dreizehnfach höher als beim Primäranprall. Entsprechend ergibt sich mit 31901 ein extremer HIC-Wert. Dies wird vor allem bei Vergleich mit der Verletzungsrisikokurve in Abb. 4-35 deutlich, welche bereits ab einem HIC-Wert von 2000 ein Risiko für eine AIS3+ Verletzung von über 98% angibt. Bezogen auf Euro NCAP, wo ab einem HIC-Wert von 1700 eine rote Bewertung erfolgt, bedeutet dies, dass der Grenzwert für den vorliegenden Sekundäraufprall um mehr als das achtzehnfache überschritten wird. Auch die resultierende Kraft im oberen Nackenbereich fällt mit 5348 N deutlich höher aus als beim Primäranprall. Die anderen Körperregionen sind verglichen mit den Belastungen beim Primäranprall nicht auffällig.

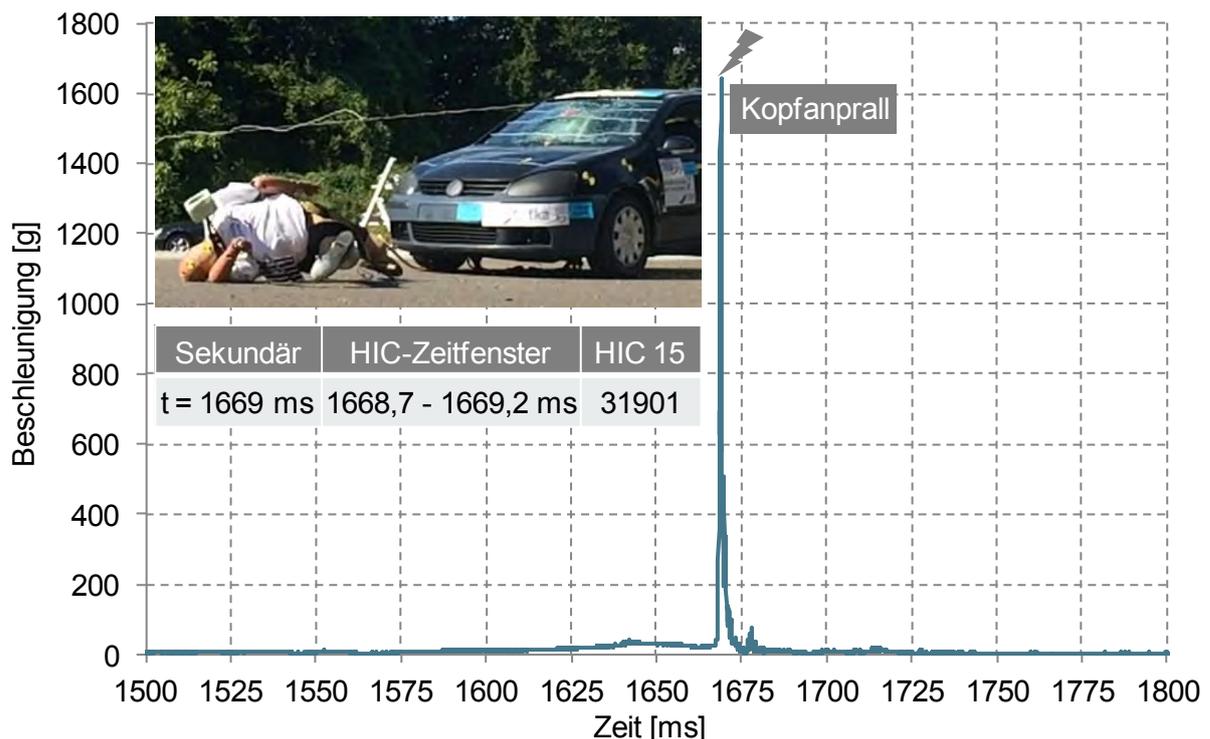


Abb. 5-16: Resultierende Kopfbeschleunigung bei $v_{Fzg} = 39,9$ km/h ($v_{Radfahrer} = 14,1$ km/h)

5.3.2 Zentraler rechtwinkliger Anprall mit 30 km/h

Für eine Reduzierung der Fahrzeuggeschwindigkeit um 10 km/h geht die Kinematik des Radfahrers bis zum Primäranprall des Kopfes aus Abb. 5-17 hervor.

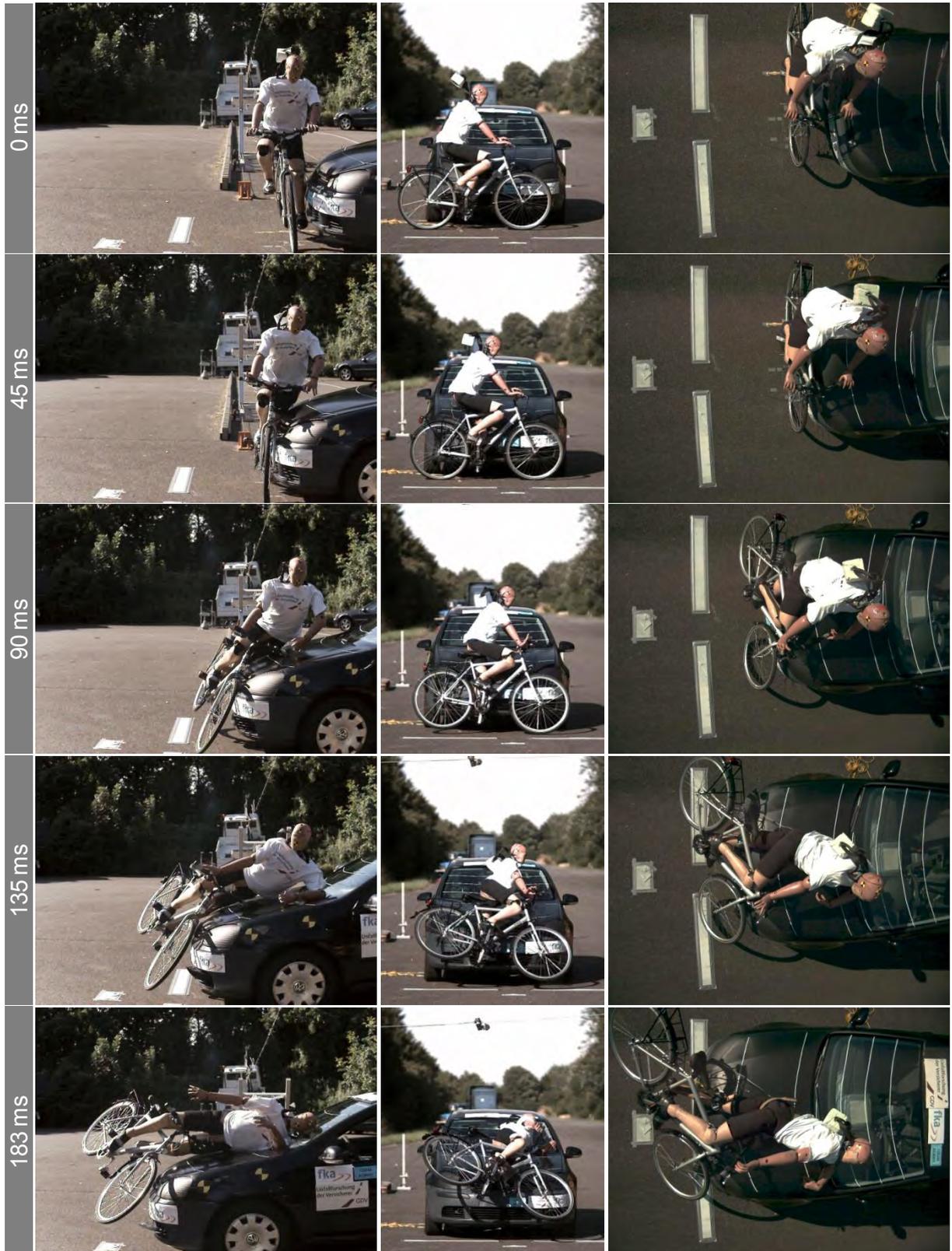


Abb. 5-17: Zentraler rechtwinkliger Anprall mit $v_{\text{Fzg}} = 29 \text{ km/h}$ und $v_{\text{Radfahrer}} = 13,5 \text{ km/h}$

Der Erstkontakt erfolgt an der fahrzeugseitigen Tibia des Radfahrers ca. 0,25 m versetzt zur Fahrzeuglängsachse. Etwa 15 ms später kommt es zum Anprall des Knies an der rechten

Seite des Kühlergrills (WAD 590 mm - 725 mm, Versatz zu y_0 ca. 200 mm). Die entsprechenden grauen Farbspuren gehen aus Abb. 5-18 hervor. Der anschließende Anprall des Oberschenkels führt zu einer leichten Deformation im Bereich der Haubenvorderkante. Nach ca. 80 ms folgt der Hüftanprall bei einer Abwickellänge von ca. 1085 mm und einem Versatz zu y_0 von ca. 210 mm. Im Zuge der rotatorischen Bewegung des Dummys in Richtung Fahrzeugfront trifft der fahrzeugseitige Ellenbogen nach ca. 130 ms den unteren Windschutzscheibenbereich (WAD 1710 mm, Versatz zu y_0 ca. -375 mm), gefolgt vom Thoraxaufprall im Bereich der Haubenhinterkante. Der Schulteranprall erfolgt bei einer Abwickellänge von 1840 mm fast zeitgleich mit dem Anprall des Kopfes, welcher nach 181 ms die Windschutzscheibe bei einer Abwickellänge von 2035 mm auf der Fahrerseite trifft. Der Versatz des Kopfaufprallortes zur Fahrzeuglängsachse beträgt dabei ca. 370 mm. Hier wird abermals die diagonale Aufwurftrajektorie des sich quer zum Fahrzeug bewegenden Radfahrers deutlich. Die Kopfrelativgeschwindigkeit beträgt beim Aufprall ca. 47,5 km/h. Nach dem Kopfaufprall kommt die Hüfte nochmals mit der Haube in Kontakt und hinterlässt hier links versetzt zu y_0 eine zweite gelbe Farbmarkierung in einem WAD-Bereich von 1340 mm bis 1520 mm.



Abb. 5-18: Beschädigungen & Unfallspuren bei $v_{Fzg} = 29$ km/h ($v_{Radfahrer} = 13,5$ km/h)

Nach dem Primäranprall des Kopfes ist die Rotationsbewegung des Dummys weit weniger ausgeprägt als beim 40 km/h Versuch. Der Körper nimmt hier eine eher horizontale Lage ein, bevor er infolge der Fahrzeugverzögerung nach vorne abgeworfen wird. Hierbei fällt der Dummy entlang des linken Kotflügels und Frontscheinwerfers vor dem noch verzögernden Fahrzeug zu Boden. Die unteren Extremitäten prallen zuerst auf die Fahrbahnoberfläche. Der Dummy kommt anschließend auf dem Gesäß auf, um dann rücklings mit dem Kopf ca.

1,4 s nach dem Erstkontakt des Radfahrers mit dem Fahrzeug auf dem Asphalt aufzuschlagen. Dies erfolgt noch innerhalb der Rutschphase, an deren Ende der Dummy eine Längswurfweite, gemessen vom Kopf, von ca. 10,9 m und eine Querswurfweite von ca. 2,3 m erreicht. Das Fahrrad bleibt unmittelbar neben dem Dummy liegen (Abb. 5-18 rechts). Vom Kurbeltretlager gemessen beträgt die Längswurfweite 10,4 m und die Querswurfweite 3,1 m.

Bei der Auswertung der Messdaten ergibt sich für die resultierende Kopfbeschleunigung mit 85 g erwartungsgemäß ein im Vergleich zum vorherigen Versuch niedrigerer Maximalwert (Abb. 5-19). Entsprechend fällt auch der HIC-Wert mit 178 deutlich kleiner aus und weist mit Hinblick auf die Verletzungsrisikokurve in Abb. 4-35 ein Risiko für eine AIS 3+ Verletzung von nur 2% auf. Beim 40 km/h Versuch liegt dieses für den Primärkontakt des Kopfes bei 18%. Bei beiden Versuchen bleibt zu beachten, dass die Windschutzscheibe zum Zeitpunkt des Kopferstkontaktes bereits vorgeschädigt ist. Die zweite Spitze von 60 g im Beschleunigungssignal wird wiederum durch den Kontakt des Kopfes mit der Instrumententafel hervorgerufen, welcher auch durch das HIC-Zeitfenster erfasst wird.

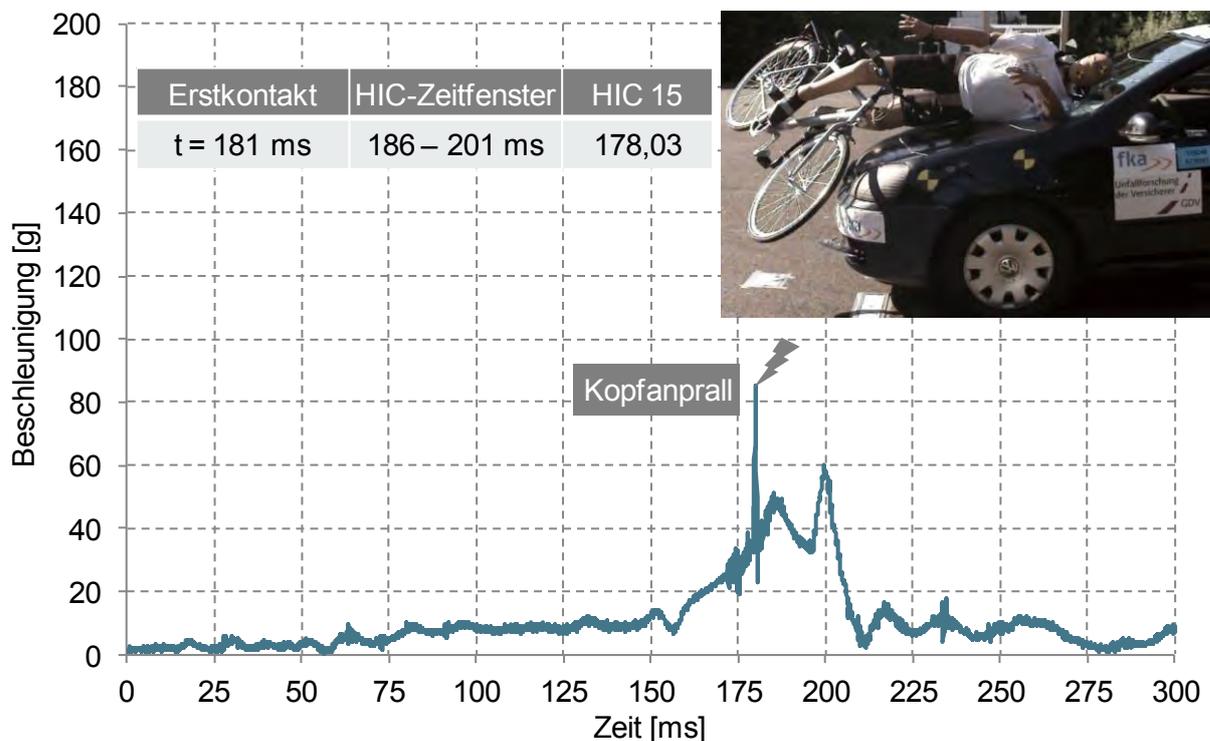


Abb. 5-19: Resultierende Kopfbeschleunigung bei $v_{Fzg} = 29$ km/h ($v_{Radfahrer} = 13,5$ km/h)

Im Nackenbereich ergeben sich für die resultierende Kraft Maximalwerte von 2496 N oben und 2357 N unten (Abb. 9-22), was ebenfalls deutlich unterhalb des Niveaus des vorherigen Versuchs liegt. Die Maxima treten im Zeitraum des Kopfanpralls auf die Instrumententafel auf. Das resultierende Moment erreicht im oberen Nackenbereich erst nach 220 ms den Maximalwert von 83 Nm (Abb. 9-23), also auch im Zuge des Kopfanpralls auf die Instrumententafel. Der Höchstwert im unteren Nackenbereich fällt mit 82 Nm fast identisch aus, wird aber bereits nach 131 ms erzielt, d.h. zum Zeitpunkt des Ellenbogenanpralls. Die Beschleu-

nigungen von Torso und Becken gehen aus Abb. 9-24 und Abb. 9-25 im Anhang hervor. Die maximale Torsobeschleunigung beträgt 69 g, das Becken erzielt ein Maximum von knapp 39 g. Den Verlauf für das obere Schienbein/Knie zeigt Abb. 5-20.

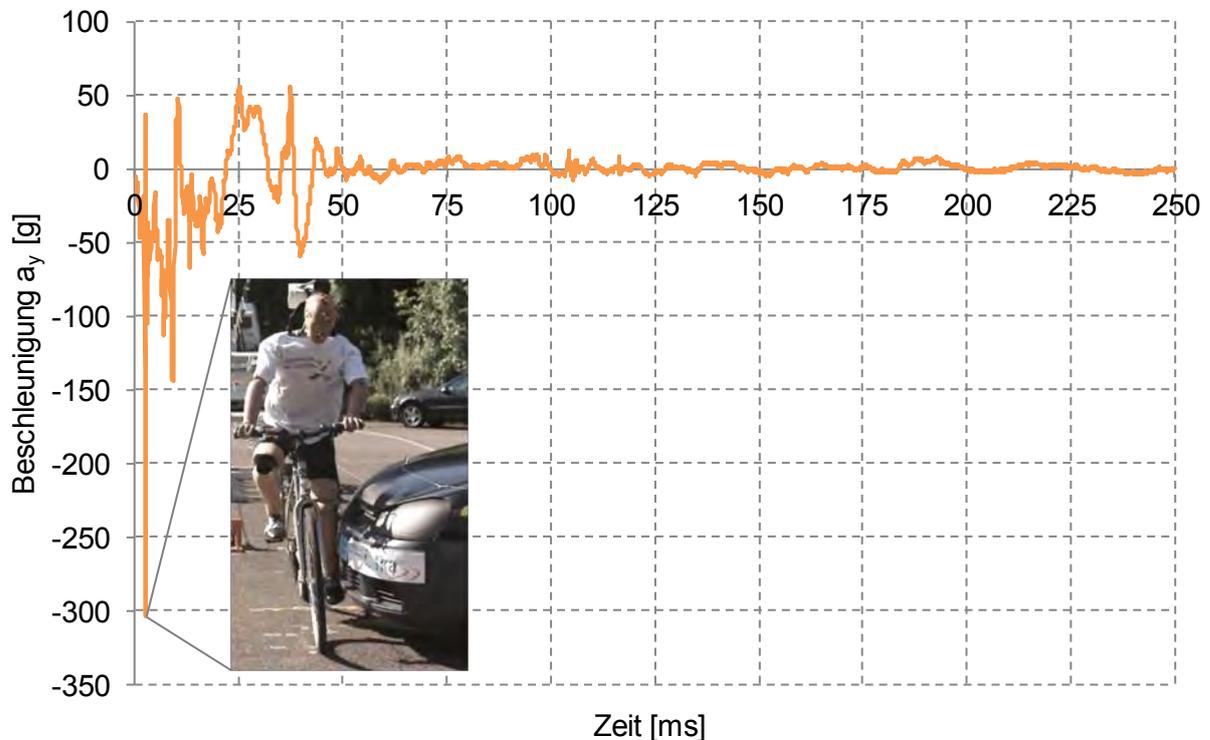


Abb. 5-20: Beschleunigung a_y des fahrzeugseitigen Knies/Schienbeins (Knee/Tibia)

Die maximale Beschleunigung des Tibia/Knie-Bereichs in y-Richtung beträgt -304 g. Die Interaktion mit dem Fahrrad, die nach 25 ms durch ein zweites Maximum (56 g) mit umgekehrten Vorzeichen gekennzeichnet wird, fällt hier weit weniger stark ins Gewicht als im vorherigen Versuch.

Die Verläufe der resultierenden Kraft auf Femur und Tibia sind in Abb. 5-21 dargestellt. Der Höchstwert im oberen Tibiabereich (Nähe Kniegelenk) ist mit 1480 N etwas niedriger als im unteren Tibiabereich (Nähe Fußgelenk, 1589 N). Die Tibiabelastung fällt damit um ca. 600 N geringer aus als im 40 km/h Versuch. Die Reduzierung der Belastung ist im Femur-Bereich nochmals signifikanter. Hier beträgt das Maximum, welches nach 53 ms erreicht wird, 2264 N, was gegenüber dem vorherigen Versuch fast einer Halbierung Kraft der Kraft gleichkommt.

Hinsichtlich des Biegemomentes M_x zeigen die Sensoren Upper Tibia und Femur Maximalwerte von -148 Nm im Tibia- bzw. -211 Nm im Femurbereich (Abb. 5-22), was ebenfalls unterhalb des Niveaus des vorherigen Versuches liegt. Daten für den Lower Tibia Sensor liegen nicht vor. Für den Femurbereich ergibt sich vor dem eigentlichen Maximum nach 69 ms ein zweites Maximum des Biegemomentes, welches bereits nach 11 ms erreicht wird und ein umgekehrtes Vorzeichen aufweist. Dabei wird ein Wert von 162 Nm erzielt.

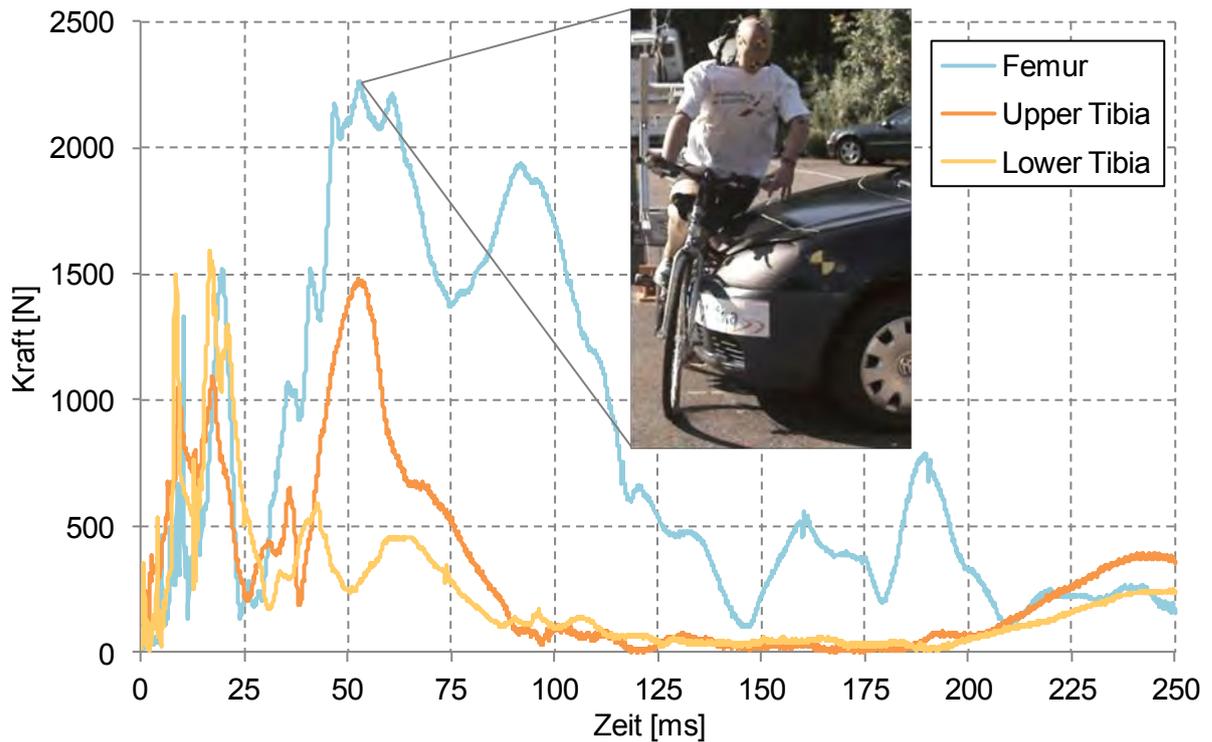
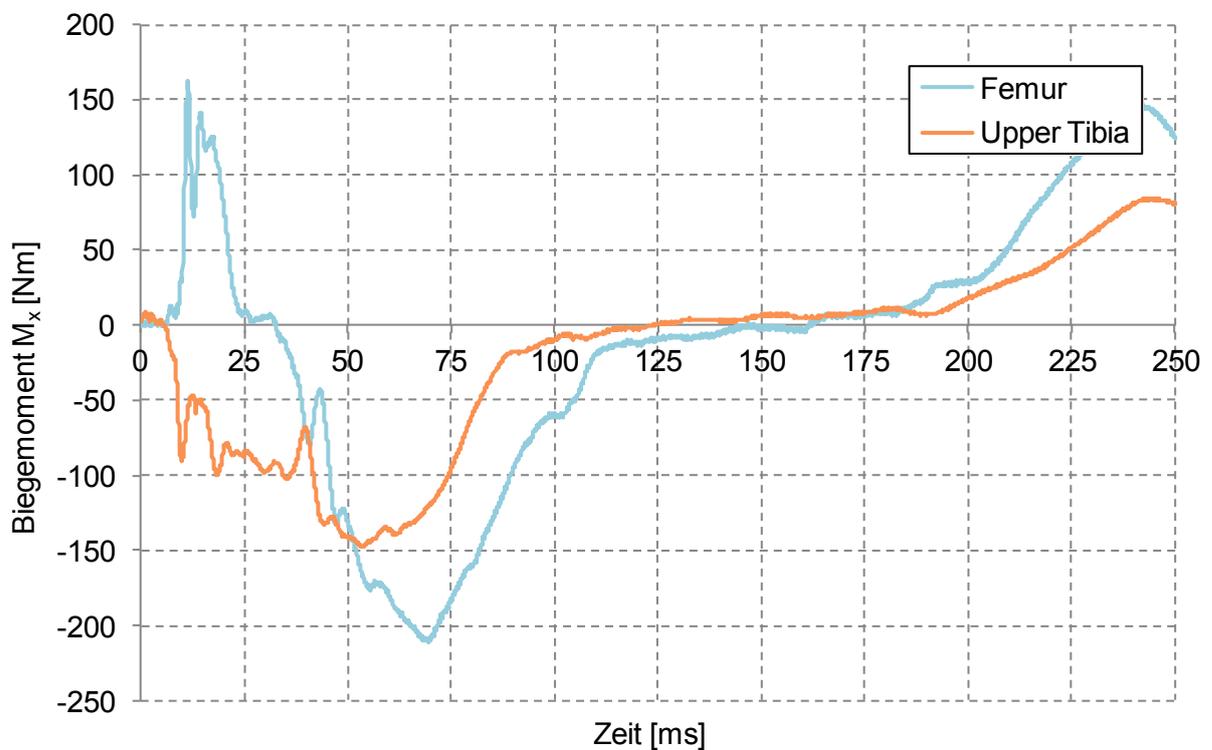


Abb. 5-21: Resultierende Kraft auf fahrzeugseitige Tibia & Femur

Abb. 5-22: Biegemoment M_x für fahrzeugseitige Tibia & Femur

Auch beim 30 km/h-Versuch fällt die Kopfbelastung beim Sekundäraufprall deutlich höher aus als beim Primäraufprall, wie aus Abb. 5-23 hervorgeht.

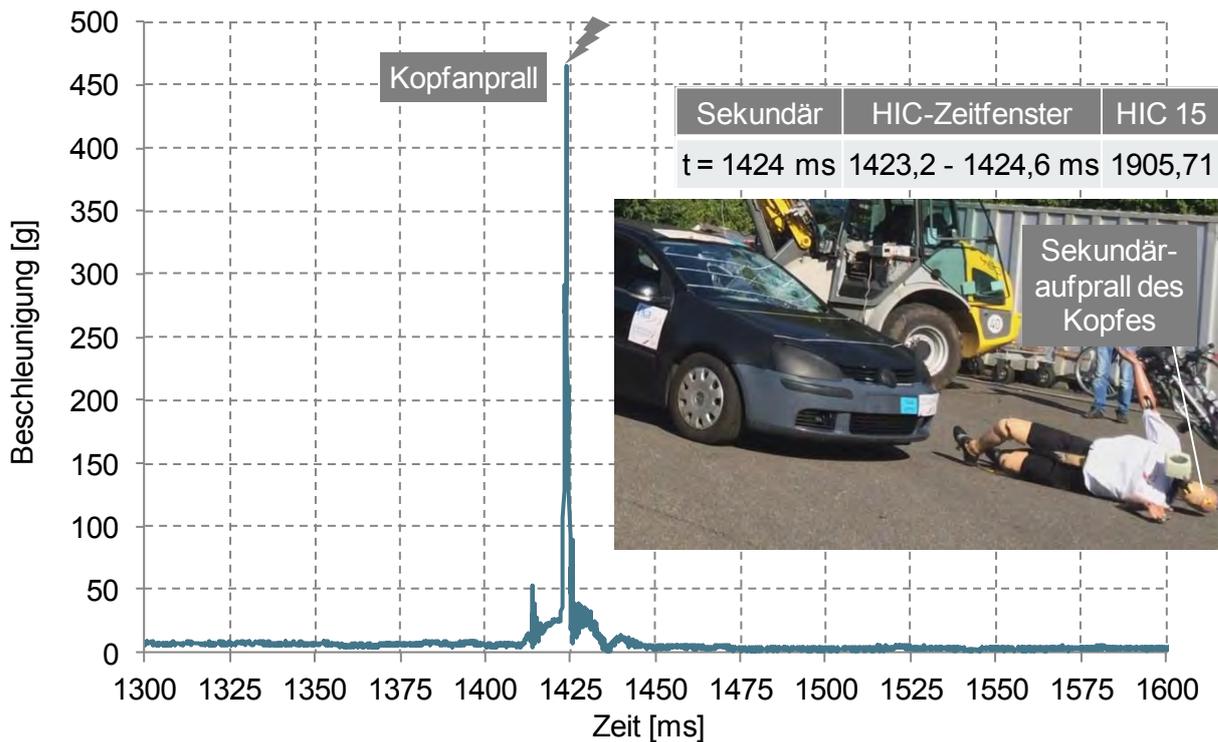


Abb. 5-23: Resultierende Kopfbeschleunigung bei $v_{Fzg} = 29$ km/h ($v_{Radfahrer} = 13,5$ km/h)

Der nach 1,42 s stattfindende Sekundäraufprall des Kopfes ruft eine resultierende Kopfbeschleunigung von 465 g hervor. Die maximale Verzögerung des Kopfes ist hier also um das 5,5 fache höher als beim Primäranprall. Daraus resultiert ein HIC-Wert von 1906, welcher zwar deutlich niedriger ist als beim 40 km/h-Test, der aber nach Euro NCAP-Vorgaben immer noch rot eingestuft werden würde und mit einem Risiko für eine AIS3+ Verletzung von über 97% gleichzusetzen ist. Die resultierenden Kräfte im Nackenbereich fallen mit 1947 N und 1964 N niedriger aus als beim Primäranprall. Die anderen Körperregionen sind verglichen mit den Belastungen beim Primäranprall ebenfalls nicht auffällig.

5.3.3 Zentraler rechtwinkliger Anprall mit 20 km/h

Im dritten Versuch ergibt sich nicht die angestrebte Anstoßkonstellation mit einem Versatz des Fahrrads von 0,4 m rechts zur Fahrzeuginnenachse (Abb. 5-4), denn das Versuchsfahrzeug bleibt hier nicht in der Spur sondern bewegt sich nach rechts. Dadurch erfolgt der Anprall des Radfahrers später und um ca. 0,6 m nach links versetzt, was anhand der Bildfolge in Abb. 5-24 deutlich wird. Im Zuge dieser Verlagerung des Erstkontaktpunktes kommt es im weiteren Verlauf der Kollision zu keinem Kopfanprall an der Fahrzeugfront, sondern zu einem direkten Aufprall auf die Fahrbahnoberfläche. Letztendlich wird so allerdings die für den Radfahrer ungünstigste Konstellation im Rahmen eines Unfalls mit niedriger Fahrzeuggeschwindigkeit abgebildet. Wie schon die Ergebnisse des 30 km/h-Versuchs gezeigt haben, sind für den 20 km/h-Versuch keine kritischen Belastungen bei einem Kopfanprall auf die Fahrzeugfront zu erwarten. Vielmehr ergibt sich durch den mit dem Kopf voraus erfolgenden Anprall auf die Fahrbahn ein wesentlich höheres Verletzungsrisiko. Zudem zeigen die Simu-

lationen in Bezug auf eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 20 km/h ohnehin eine generell hohe Wahrscheinlichkeit für einen ausbleibenden Kopfaufprall auf dem Fahrzeug.

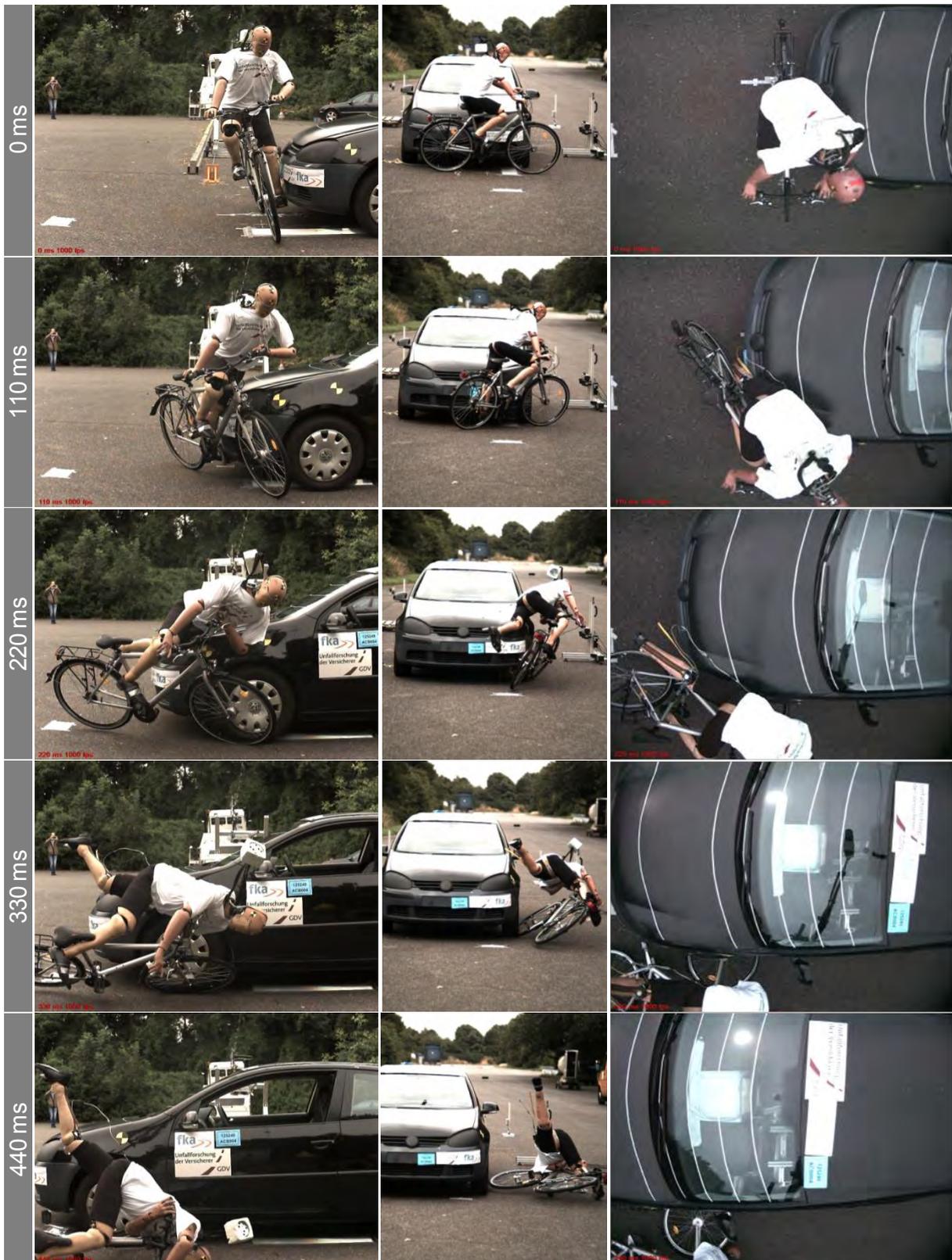


Abb. 5-24: Zentraler rechtwinkliger Anprall mit $v_{Fzg} = 19 \text{ km/h}$ und $v_{\text{Radfahrer}} = 14 \text{ km/h}$

Die im Versuch gemessene Fahrzeuggeschwindigkeit beträgt 19 km/h, die des Radfahrers 14 km/h. Der Erstkontakt zwischen Radfahrer und Fahrzeug findet im Bereich des Fußgelenks und der unteren Tibia statt. Der Anprall des Knies hinterlässt bei einer Abwickellänge von ca. 580 mm und einem Versatz von knapp 300 mm links zur Fahrzeuginnenachse eine graue Farbmarkierung (Abb. 5-25). Durch den nachfolgenden Anprall des Hinterrades in der Mitte des Fahrzeuges wird das Fahrrad nach außen wegbewegt, wobei es sich um 90° um seine Hochachse dreht. Im Zuge dieser Bewegung haben außer dem Femurbereich keine weiteren Körperregionen mehr direkten Kontakt zur Fahrzeugfront. Der Dummy bewegt sich mit dem Fahrrad am Fahrzeug vorbei und fällt dabei neben dem Kotflügel kopfüber zu Boden. Der Erstkontakt des Kopfes mit der Fahrbahnoberfläche findet nach 444 ms statt. Aufgrund der Spurabweichung des Versuchsfahrzeuges kommt es zu keiner Auslösung der Bremsaktuatorik. Allerdings wäre die Vollverzögerung zeitlich erst nach dem Kopfaufprall erfolgt, sodass sich hier keine Änderungen bezüglich der Kinematik ergeben hätten.

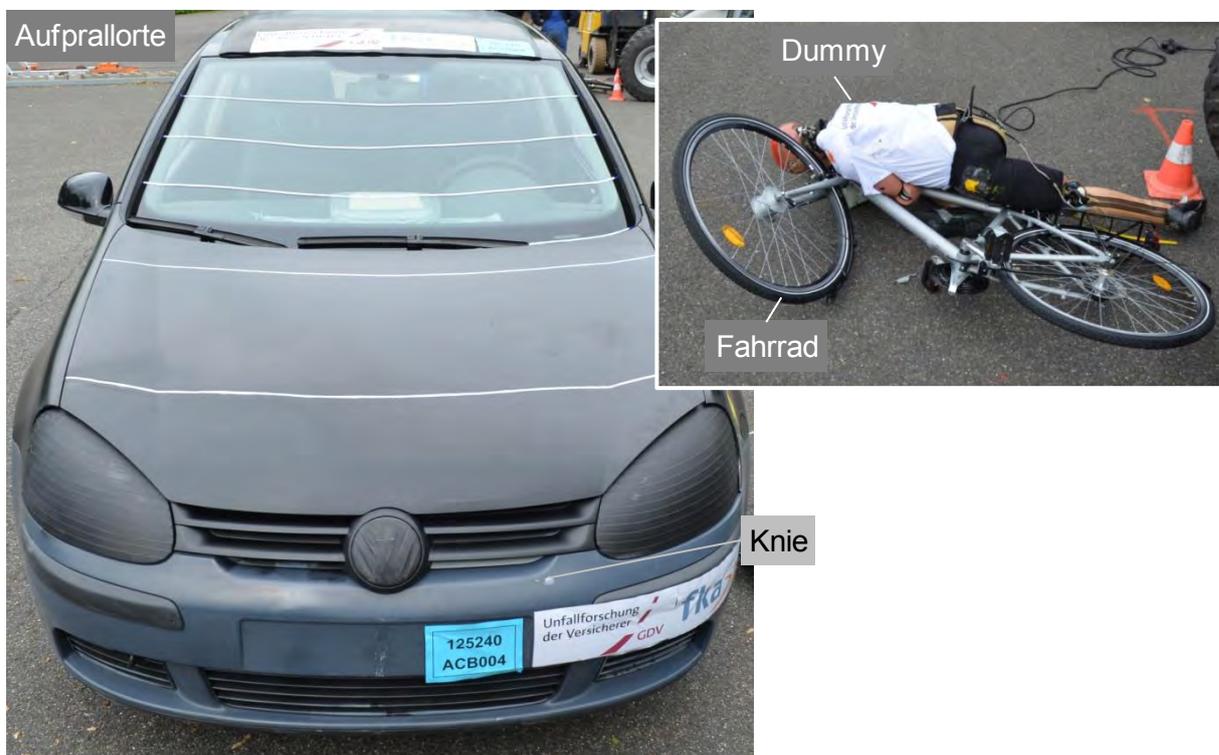


Abb. 5-25: Beschädigungen & Unfallspuren bei $v_{Fzg} = 19$ km/h ($v_{Radfahrer} = 14$ km/h)

Die Auswertung der vom Dummy aufgezeichneten Messdaten zeigt hinsichtlich der Kopfbeschleunigung und des sich daraus ergebenden HIC-Wertes eine hohe Belastung (Abb. 5-26). So beträgt die Maximalbeschleunigung 442 g, was nur knapp unterhalb des Wertes für den Sekundäraufprall beim 30 km/h-Versuch liegt (465 g). Folglich resultiert mit 1787 ein HIC-Wert, der nachwievor im Rahmen von Euro NCAP eine rote Bewertung erhalten würde. Das zugehörige AIS3+ Verletzungsrisiko (Abb. 4-35) beträgt 96%. Die Maximalwerte der resultierenden Kraft im oberen und unteren Nackenbereich (Abb. 9-26) betragen 3890 N bzw. 4206 N und fallen damit höher aus als beim 30 km/h-Versuch. Das resultierende Moment erreicht Maximalwerte von 35 Nm bzw. 40 Nm (Abb. 9-27).

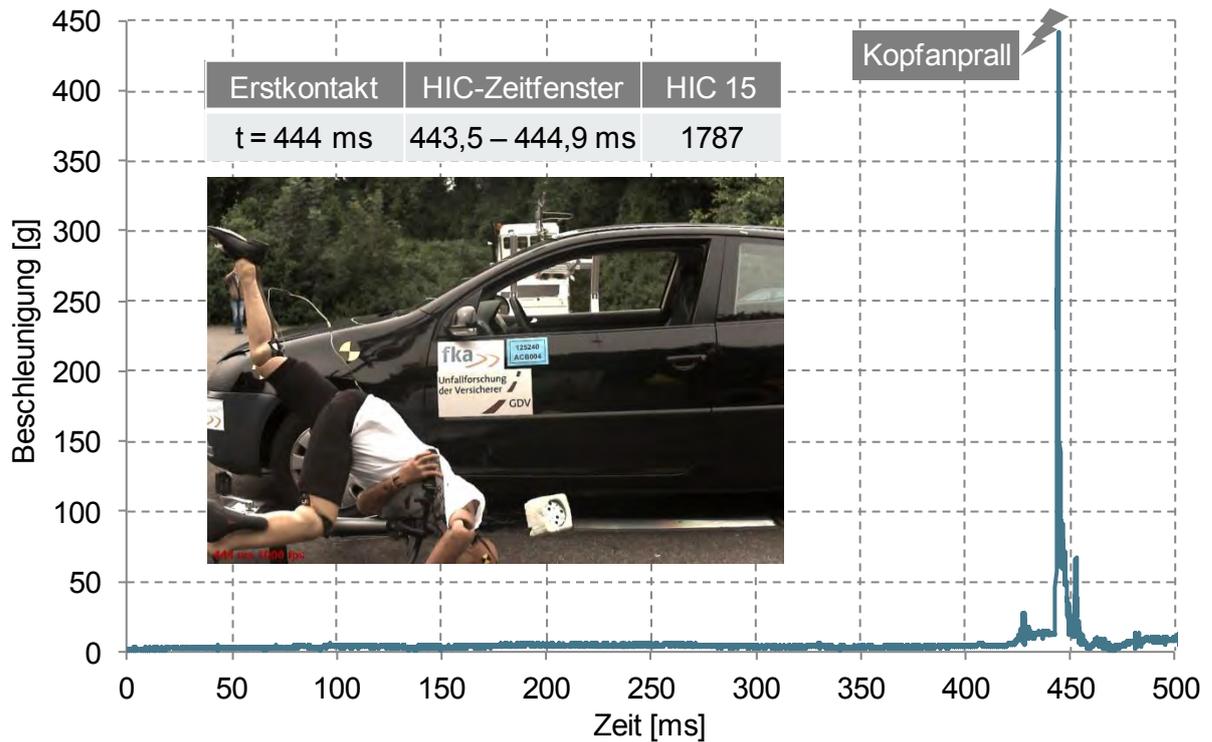


Abb. 5-26: Resultierende Kopfbeschleunigung bei $v_{\text{Fzg}} = 19 \text{ km/h}$ ($v_{\text{Radfahrer}} = 14 \text{ km/h}$)

Die Beschleunigungen des Torsos und Beckens sind in Abb. 9-28 und Abb. 9-29 im Anhang dargestellt. Die Maxima von 48 g für den Torso und 26 g für das Becken werden jeweils beim Aufprall auf die Fahrbahn erreicht, liegen aber unterhalb der Maximalwerte des 30 km/h-Versuchs. Für das obere Schienbein/Knie geht der Verlauf aus Abb. 5-27 hervor.

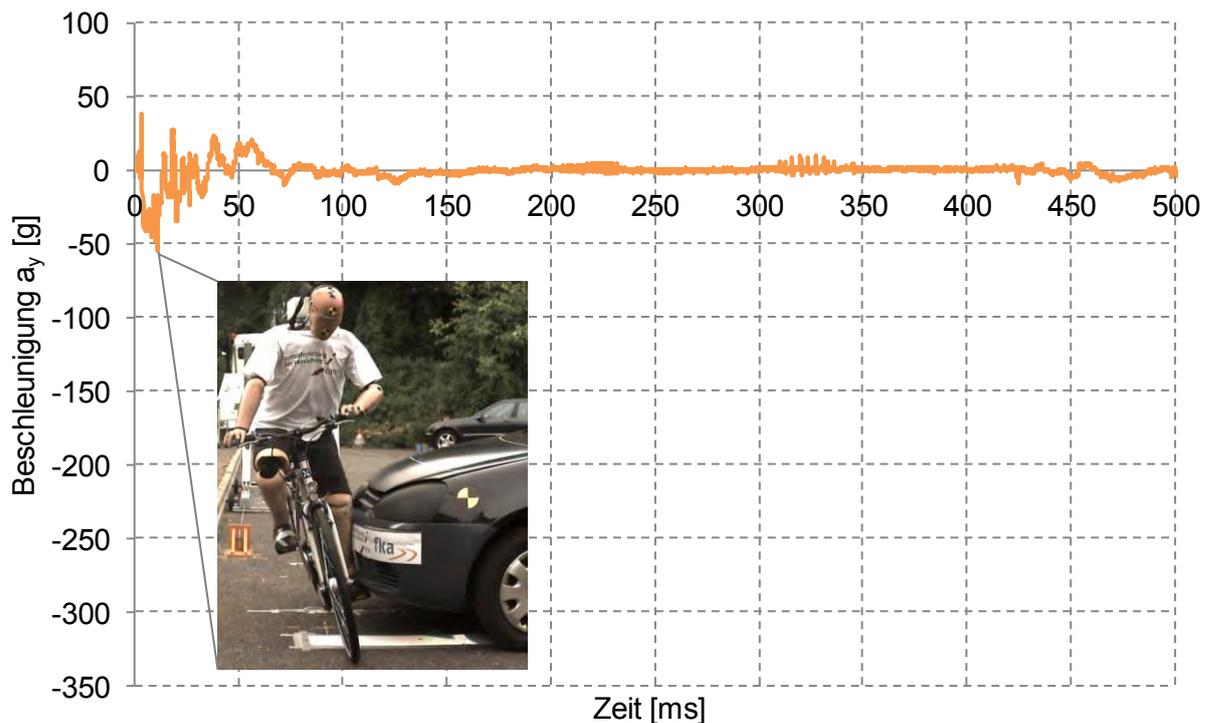


Abb. 5-27: Beschleunigung a_y des fahrzeugseitigen Knies/Schienbeins (Knee/Tibia)

Die maximale Beschleunigung des Tibia/Knie-Bereichs in y-Richtung beträgt -55 g. Diese wird knapp 11 ms nach dem Erstkontakt erreicht und fällt deutlich niedriger aus als beim 30 km/h-Versuch. Abb. 5-28 zeigt die Verläufe der resultierenden Kraft auf Femur und Tibia.

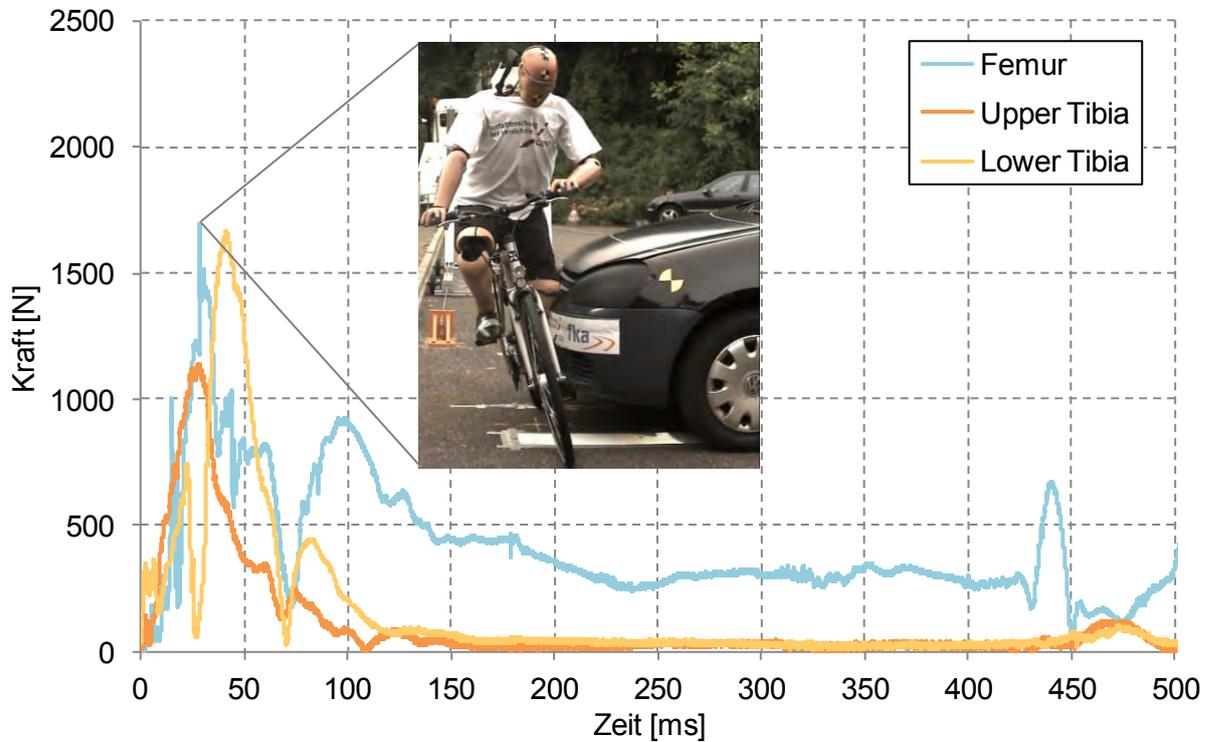


Abb. 5-28: Resultierende Kraft auf fahrzeugseitige Tibia & Femur

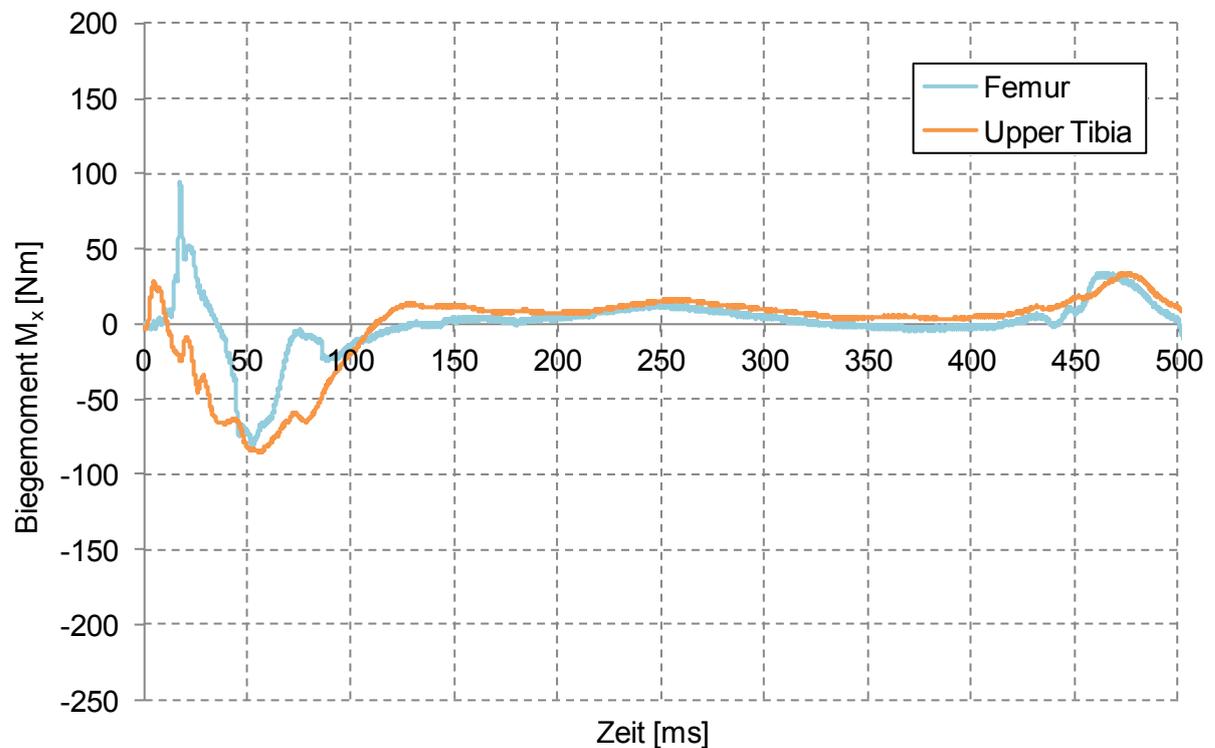


Abb. 5-29: Biegemoment M_x für fahrzeugseitige Tibia & Femur

Während die Maximalwerte für den Femur- und oberen Tibiabereich (Nähe Kniegelenk) mit 1701 N und 1140 N nicht das Niveau des 30 km/h-Versuchs erreichen, liegt die Belastung im unteren Tibiabereich (oberhalb Fußgelenk) mit 1667 N etwas darüber. Hierbei ist zu beachten, dass sich der Radfahrer im Falle des 20 km/h-Versuchs in einer Schräglage befindet, sodass sich entsprechende Unterschiede in der Beinanprallkinematik ergeben. Die Maxima im Femur- und oberen Tibiabereich treten jeweils nach ca. 28 ms auf. Für den unteren Tibiabereich ist dies nach ca. 41 ms der Fall.

Bezüglich des Biegemomentes M_x messen die Sensoren Upper Tibia und Femur Maximalwerte von -86 Nm im Tibia- bzw. 94 Nm im Femurbereich (Abb. 5-29), was verglichen mit dem 30 km/h-Versuch erneut deutlich niedriger ist. Im Femurbereich wird das Maximum des Biegemomentes bereits nach 18 ms erreicht. Ein zweites Maximum nach ca. 53 ms weist ein negatives Moment von -81 Nm auf. In diesem Zeitraum kommt es zur Interaktion des gesamten Tibiabereichs mit dem Fahrradrahmen. Entsprechend ergibt sich hier nach ca. 56 ms auch das Maximum im oberen Tibiabereich.

5.4 Fazit

Vergleicht man die Versuchsergebnisse mit den im Vorfeld durchgeführten Simulationen, so zeigt sich eine generell gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch, wie aus Abb. 5-30 bis Abb. 5-32 für den 40 km/h bzw. den 30 km/h-Test hervorgeht.

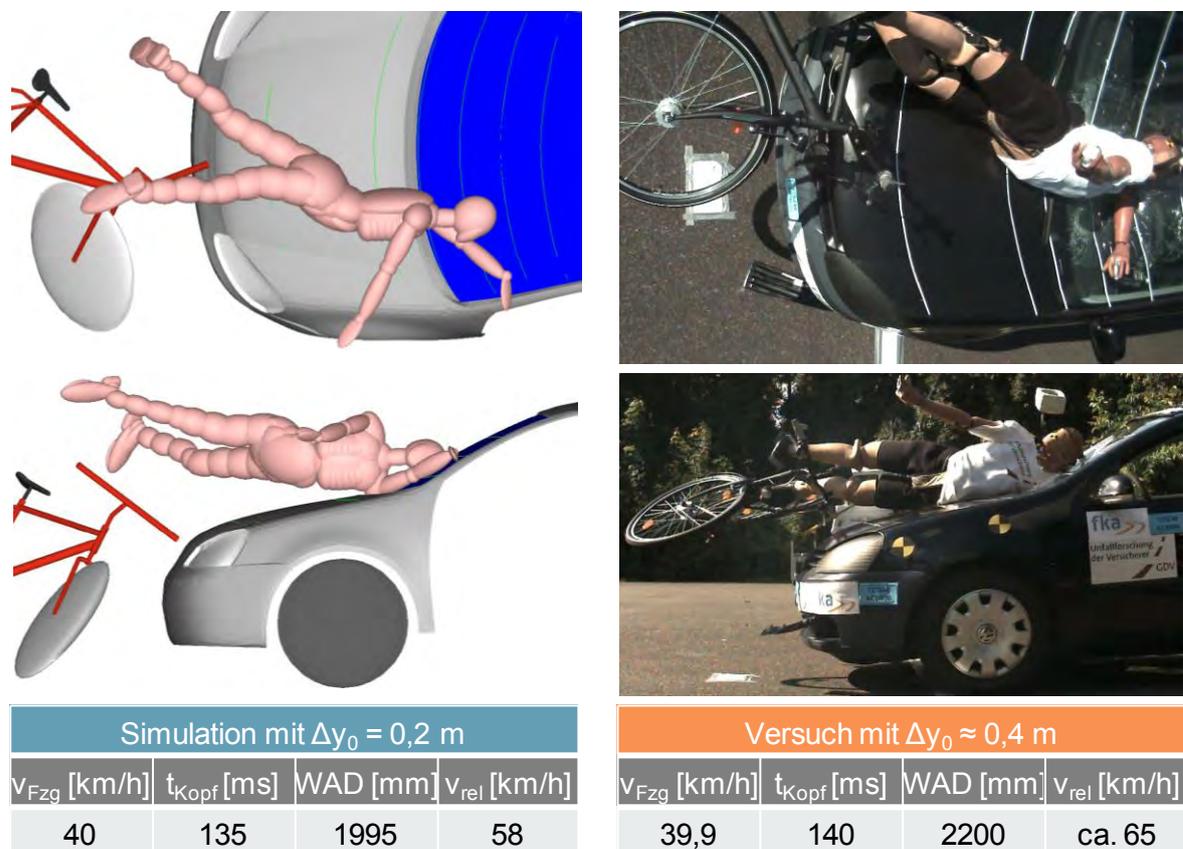


Abb. 5-30: Vergleich Simulation & Versuch mit 40 km/h ($v_{Radfahrer} = 15$ & 14,1 km/h)

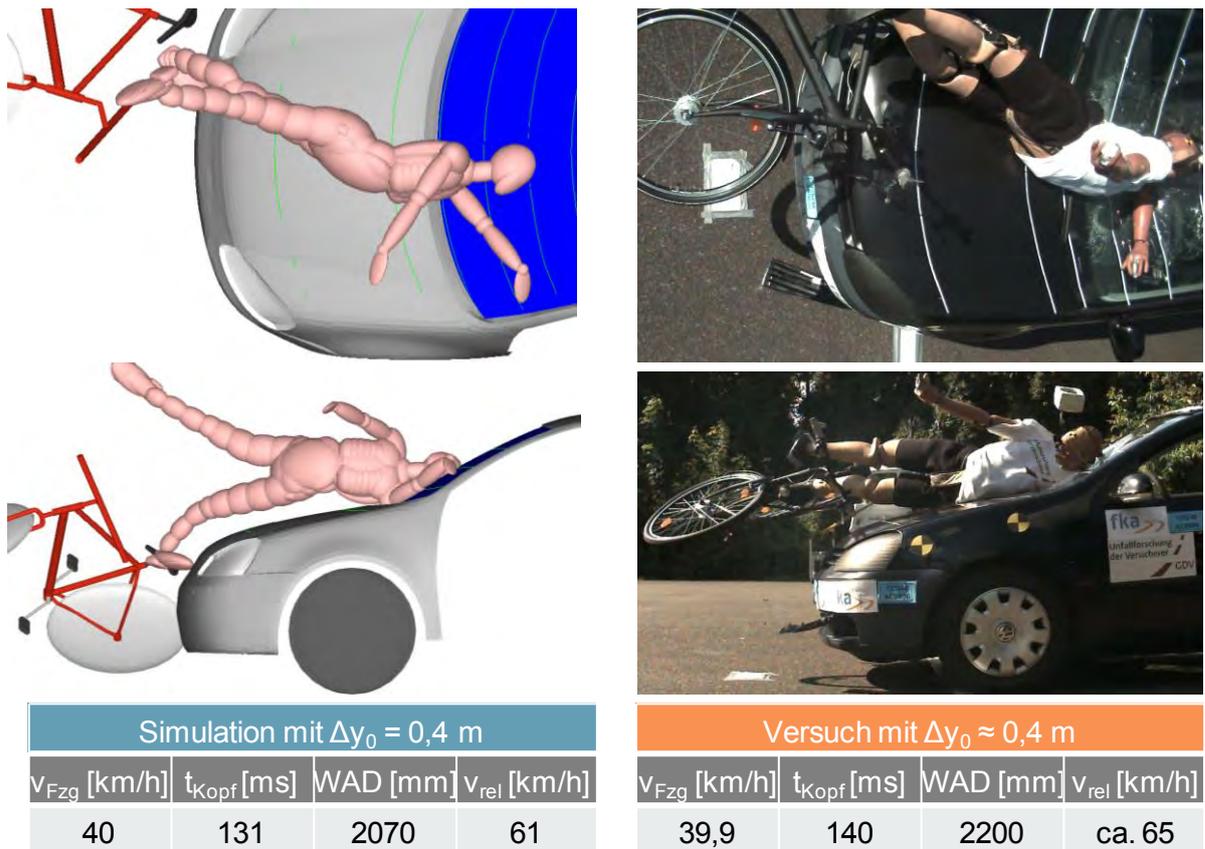


Abb. 5-31: Vergleich Simulation mit $\Delta y_0 = 0,4$ & Versuch mit 40 km/h ($v_{Radf} = 15$ & 14,1 km/h)

Abb. 5-30 stellt die Daten des 40 km/h-Versuchs zunächst den Ergebnissen der im Vorfeld durchgeführten Simulation gegenüber. Beim Versuch erfolgt der Anstoß des Radfahrers in Bezug auf die Fahrzeuglängsachse (y_0) ca. 20 cm weiter außen als in der Simulation, wodurch sich eine tendenziell größere Abwickellänge für den Kopfaufprallort ergibt. Entsprechend fällt diese im Versuch um ca. 200 mm länger aus, bei vergleichbarer Kopfaufprallzeit und -geschwindigkeit. Letztere liegt mit ca. 65 km/h deutlich über der Fahrzeuggeschwindigkeit. Somit bestätigt der Versuch sowohl das für Radfahrer hohe Niveau der Kopfaufprallgeschwindigkeiten als auch die im Vergleich zu Fußgängern tendenziell größeren Kopf-abwickellängen. Die Simulationsergebnisse bei gemäß den Versuchsrandbedingungen angepasster Anstoßkonstellation gehen aus Abb. 5-31 hervor. Gegenüber der vorherigen Simulation kann die Übereinstimmung mit dem Versuch nochmals verbessert werden. Es ergibt sich eine entsprechend größere Kopf-abwickellänge sowie eine nochmals höhere Kopfaufprallgeschwindigkeit. Auch wenn die Kopf-abwickellänge aus dem Versuch nachwievornicht ganz erreicht wird, deckt sich die Lage des Kopfaufprallortes in y -Richtung und damit die diagonale Aufwurf-bewegung des Radfahrers sehr gut mit der Simulation. Dies gilt nur bedingt für die Kinematik des fahrzeugseitigen Arms, da der Ellenbogen im Versuch die Windschutzscheibe durchschlägt.

Trotz der sehr hohen Kopfaufprallgeschwindigkeit ergibt sich für den 40 km/h-Versuch ein relativ niedriger HIC-Wert von 598. Dies wird auch anhand der in Kapitel 4 vorgestellten Impak-

tortestergebnisse im Windschutzscheibenbereich deutlich (Abb. 4-27). Hier wird für einen Impaktorschuss mit 40 km/h auf einen vergleichbaren Windschutzscheibenpunkt mit einer Abwickellänge von 2100 mm (WSS 3, Abb. 4-25) bereits ein HIC-Wert von 1085 erreicht. Allerdings erfolgt der Aufprall des Impaktors auf eine intakte Windschutzscheibe, während diese im Dummy-Versuch durch den Ellenbogen- und Schulteraufprall massiv vorgeschädigt wird und somit keine ausgeprägte Kopfverzögerung mehr hervorruft. Diese liegt mit einem Höchstwert von 125,6 g (Abb. 5-12) deutlich unter der im Impaktortest erreichten Maximalverzögerung von 200,2 g.

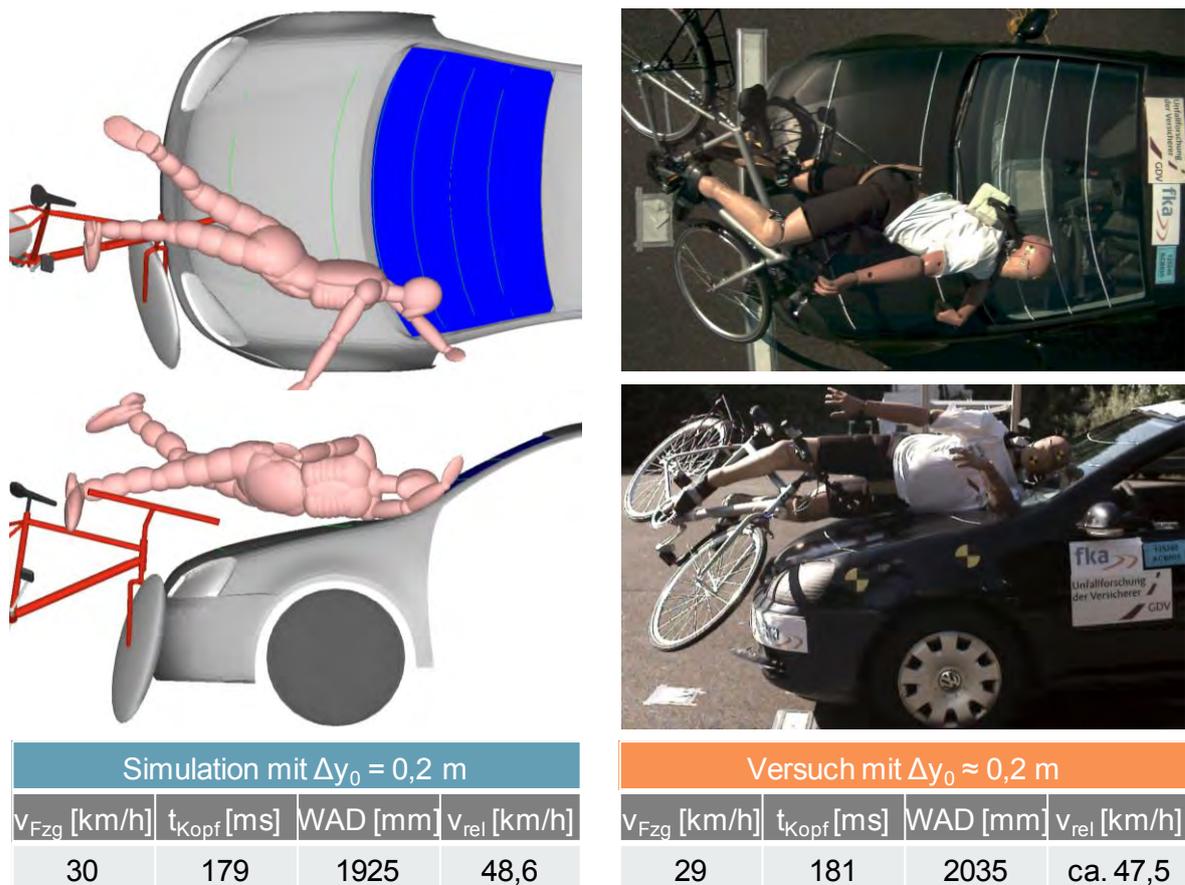


Abb. 5-32: Vergleich Simulation & Versuch mit 30 km/h ($v_{Radfahrer} = 15$ & 13,5 km/h)

Im Falle des 30 km/h Versuchs weicht der Versatz des Radfahrers zur Fahrzeuglängsachse beim Erstkontakt kaum von der im Vorfeld festgelegten Anstoßkonstellation ab. Es ergeben sich hier sowohl bezüglich der Kopfaufprallzeit als auch bezüglich der Kopfaufprallgeschwindigkeit fast identische Werte im Vergleich zur Simulation. Die Kopfabwickellänge fällt im Versuch wiederum etwas größer aus. Der Aufprall von Ellenbogen und Schulter ruft eine Vorschädigung der Windschutzscheibe im unteren Rahmenbereich hervor (vgl. Abb. 5-18), was trotz einer nachwievor oberhalb des Prüfniveaus bei Euro NCAP liegenden Kopfaufprallgeschwindigkeit zu einem äußerst niedrigen HIC-Wert von 178 führt (Abb. 5-19). Somit kann das aus den durchgeführten Impaktortests bzw. aus den Euro NCAP-Prüfergebnissen hervorgehende Kopfverletzungsrisiko anhand der Dummyversuche nicht bestätigt werden.

Diese Problematik zeigt sich auch bei den Full-Scale-Tests im Rahmen von SaveCAP (Kapitel 2.8). Hier werden bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h in den Anstoßkonstellationen 1 und 2 (Abb. 2-33) HIC-Werte von 502 bzw. 753 (Abb. 9-12) erzielt [SCH12a]. Während für Test 1 keine Kopfaufprallgeschwindigkeit angegeben ist beträgt diese bei Test 2 über 53 km/h. Der im dritten Test ermittelte HIC-Wert von 1433 beruht auf einem Kopfaufprall auf die untere A-Säule und ist damit nicht vergleichbar, genauso wie der rückseitige Anprall in Test 4.

Auch wenn die durchgeführten Dummy-Versuche keine eindeutigen Aussagen zum Kopfverletzungsrisiko beim Primäranprall zulassen, so sind die Ergebnisse zum Sekundäraufprall umso deutlicher. Sie zeigen selbst bei niedriger Fahrzeuggeschwindigkeit kritische Belastungswerte. Betrachtet man zunächst den 40 km/h-Versuch, so liegt die hier beim Sekundäraufprall erreichte Maximalverzögerung mit einem Wert von 1645 g und einem HIC-Wert von 31901 (Abb. 5-16) weit jenseits aller im Rahmen der Impaktortests auf die Fahrzeugfront erreichten Verzögerungswerte. Zieht man zum Vergleich einen im BAST-Radfahrerprojekt durchgeführten Impaktortest mit 40 km/h in unmittelbarer Nähe zur A-Säule heran, so führt der Kontakt des Impaktors mit dem A-Säulenrand hier zu einem HIC-Wert von 2694, bei einer Maximalverzögerung von 272 g, welche sechsmal niedriger ausfällt als beim Sekundäraufprall im 40 km/h-Dummyversuch. Es zeigt sich also eine äußerst hohe Relevanz des Sekundäraufpralls. Neben dem notwendigen Eigenschutz des Radfahrers durch das Tragen eines Fahrradhelmes, kann ein effektiver fahrzeugseitiger Schutz, abgesehen von einer Fixierung des Radfahrers auf der Front, nur durch eine signifikante Reduzierung der Kollisionsgeschwindigkeit erfolgen. Wie die Versuchsergebnisse zeigen, kommt es auch bei einer um 10 km/h reduzierten Fahrzeuggeschwindigkeit noch zu unzulässig hohen Kopfbelastungswerten beim Sekundäraufprall (Abb. 5-23). Die hier kurzzeitig erreichte maximale Kopfverzögerung beträgt 465 g und führt zu einem HIC-Wert von 1906. Selbst bei einer Halbierung der Fahrzeuggeschwindigkeit auf 20 km/h kann der Aufprall des Kopfes auf der Fahrbahn noch einen rot einzustufenden HIC-Wert hervorrufen, wie die Anstoßkonstellation im entsprechenden Dummyversuch zeigt (Abb. 5-26). Hier kommt es im Zuge einer Ausweichbewegung des Fahrzeuges zu keinem Kopfaufprall auf der Fahrzeugfront, vielmehr geht der Dummy kopfüber neben dem Fahrzeug zu Boden (Abb. 5-24). Die hierbei auftretende Maximalverzögerung des Kopfes ist mit 442 g fast identisch zum 30 km/h Versuch und ruft mit 1787 ebenfalls einen roten HIC-Wert hervor. Hinsichtlich der beschriebenen Radfahrerkinematik im 20 km/h-Versuch ist allerdings anzumerken, dass eine ähnliche Konstellation auch im Rahmen eines Alleinunfalles des Radfahrers denkbar ist und im Sinne eines ganzheitlichen Radfahrerschutzes somit eine alleinige Fokussierung auf fahrzeugseitige Maßnahmen nicht ausreichend ist.

Da der Sekundäraufprall im Rahmen der gesetzlichen und verbraucherseitigen Prüfverfahren nicht berücksichtigt wird, fließt er trotz der im Rahmen der Full-Scale-Tests deutlich gewordenen hohen Relevanz nicht in das erarbeitete Bewertungsverfahren ein. Zur Einbindung des Sekundäraufpralls in die Indexberechnung fehlt die Bewertungsgrundlage in Form entsprechender fahrzeugspezifischer Prüfergebnisse. Denkbar wäre lediglich ein pauschaler, fahrzeugklassenspezifischer Ansatz, ähnlich der Vorgehensweise im Vorgängerprojekt. Auch

wenn die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Simulationen zum Sekundäraufprall (Kapitel 3.6.9) das hohe und oftmals über dem Niveau des Primäraufpralls liegende Kopfverletzungsrisiko bestätigen, ist zu beachten, dass die Radfahrermodelle für die Untersuchung des Sekundäraufpralls weder ausgelegt noch validiert sind. Demnach wäre eine auf entsprechenden Simulationen aufbauende Bewertung unzureichend und aufgrund der zahlreichen Einflussparameter auch nicht pauschal bzw. klassenspezifisch durchführbar. Aus diesen Gründen und unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus dem Vorgängerprojekt, wird auf eine allgemeine Bewertung des Sekundäraufpralls im Rahmen dieses Projektes verzichtet.

Eine Übersicht über die Belastung des Nackens, welche mittels der geltenden Prüfverfahren ebenfalls nicht abgebildet werden kann, zeigt Abb. 5-33. Auffällig sind der Sekundäraufprall beim 40 km/h-Versuch sowie die hohen Werte beim 20 km/h Versuch, welche hier aus dem direkten Kopfaufprall auf die Straße resultieren. Entsprechend kann nicht zwangsläufig von niedrigeren Belastungen im Zuge einer Reduzierung der Fahrzeuggeschwindigkeit ausgegangen werden. Entscheidend ist letztendlich die Kopfkinematik.

Versuchsfzg. M50	Upper Neck $F_{res,max}$ [N]		Lower Neck $F_{res,max}$ [N]		Upper Neck $M_{res,max}$ [Nm]		Lower Neck $M_{res,max}$ [Nm]	
	Primär	Sekund.	Primär	Sekund.	Primär	Sekund.	Primär	Sekund.
fzgs. Bein unten								
40 km/h	2980	5348	3129	3594	42	87	94	61
29 km/h	2496	1947	2357	1964	83	31	82	69
19 km/h	3890		4206		35		40	

Abb. 5-33: Übersicht Versuchsergebnisse zur Nackenbelastung (Maximalbeträge)

Die resultierenden maximalen Beschleunigungen des Torsos und des Beckens gehen aus Abb. 5-34 hervor. Für den Primäranprall am Fahrzeug nimmt die Belastung mit der Fahrzeuggeschwindigkeit ab. Allerdings weist das Becken beim Sekundäraufprall deutlich höhere Werte auf als beim Primäranprall.

Versuchsfzg. M50	Torso $a_{res,max}$ [g]		Becken $a_{res,max}$ [g]	
	Primär	Sekundär	Primär	Sekundär
fzgs. Bein unten				
40 km/h	226	55	64	154
29 km/h	69	69	39	408
19 km/h	48		26	

Abb. 5-34: Übersicht Versuchsergebnisse zur Torso- & Beckenbelastung (Maximalbeträge)

Betrachtet man abschließend die Beinbelastung beim Primäranprall, so zeigt sich für das fahrzeugseitige Bein erwartungsgemäß eine mit der Reduzierung der Fahrzeuggeschwindigkeit einhergehende Reduzierung der Beschleunigungen, Kräfte und Momente. Die in den je-

weiligen Versuchen im Femur- und Tibiabereich gemessenen Maxima sind in Abb. 5-35 nochmals zusammengefasst.

Versuchsfzg., M50, fzgs. Bein unten	Knie / Tibia $a_{y,max}$ [g]	Upper Tibia $F_{res,max}$ [N]	Lower Tibia $F_{res,max}$ [N]	Femur $F_{res,max}$ [N]	Upper Tibia $M_{x,max}$ [Nm]	Femur $M_{x,max}$ [Nm]
40 km/h	620	2054	2223	4322	-168	-286
29 km/h	-304	1480	1589	2264	-148	-211
19 km/h	-55	1140	1667	1701	-86	94

Abb. 5-35: Übersicht Versuchsergebnisse zur Beinbelastung (Maximalbeträge)

Im Gegensatz zum Fußgängerunfall kann es beim Radfahrerunfall in Abhängigkeit der Anstoßkonstellation zu einer signifikanten Beeinflussung bzw. Steigerung der Beinbelastung durch das Fahrrad kommen. Dabei erfährt das Bein im Zuge einer Interaktion mit dem Fahrrad kurzzeitig eine hohe Beschleunigung sowie eine hohe Belastung des Tibia-Bereichs. Dies bestätigt die Ausführungen in Kapitel 3.6.10, wo im Rahmen der Simulationsauswertungen die Höchstwerte im Beinbereich oftmals nicht beim Erstkontakt mit der Fahrzeugfront sondern, in Abhängigkeit von der Pedalstellung und der Fahrzeuggeometrie, beim unmittelbar folgenden Kontakt mit dem Fahrrad erreicht werden.

6 Zusammenfassung

Obwohl Fahrradfahrer in der amtlichen Unfallstatistik in Deutschland bezüglich der Anzahl der schwer- und leichtverletzten Verkehrsteilnehmer noch deutlich vor den Fußgängern liegen und hier Unfälle unter Beteiligung von Kraftfahrzeugen besonders schwerwiegend sind, werden sie weder in den gesetzlichen noch in den Verbraucherschutzseitigen Tests hinreichend berücksichtigt. Ziel dieses Projektes war es, trotz eines fehlenden radfahrerspezifischen Prüfverfahrens, die im vorherigen Forschungsprojekt „Fußgängerschutz am Kraftfahrzeug“ erarbeitete integrierte Methodik weiterzuentwickeln und um eine fahrzeugspezifische Bewertung des Radfahrschutzes zu erweitern. Den Ausgangspunkt bildet dabei eine vertiefende Analyse des Pkw-Radfahrer-Unfallgeschehens.

Im Rahmen der Unfallanalyse sind zwei repräsentative Radfahreranstoßkonstellationen für das Bewertungsverfahren definiert worden. Zudem wurden die relevanten Kopfaufprallbereiche sowie die Verletzungsschwere und -häufigkeit der einzelnen Körperregionen aber auch die Verletzungsverursachenden Fahrzeugteile näher beleuchtet. Mit zunehmender Verletzungsschwere erweist sich der Kopf als die mit Abstand am häufigsten verletzte Körperregion, mit der Windschutzscheibe und hier vor allem dem Windschutzscheibenrahmen als relevantesten Verletzungsverursachenden Frontbereich. Auch Verletzungen der unteren Extremitäten sowie des Thorax sind von hoher Relevanz. Ein wesentliches Merkmal von Radfahrer-Pkw-Frontalkollisionen im Vergleich zu Fußgängerfrontalunfällen sind die tendenziell weiter hinten liegenden Kopfaufprallorte.

Grundlage für die Weiterentwicklung des Bewertungsverfahrens bilden umfangreiche Simulationen mit verschiedenen repräsentativen Fahrzeugfrontgeometrien. Auf Basis von Rechercheergebnissen bezüglich gängiger Radgrößen, Bauformen und Sitzpositionen sind repräsentative Fahrradmodelle für die in der Simulation berücksichtigten Radfahrergrößen hergeleitet und in einer CAD-Umgebung aufgebaut worden. Die Rekonstruktion eines Realunfalls zur Validierung der definierten Simulationsparameter, wie Kontaktsteifigkeiten und Reibwerte, hat gezeigt, dass die Unfallkinematik einer Radfahrer-Pkw-Kollision mittels der verwendeten Modelle in der Simulation realitätsgetreu wiedergegeben werden kann. Gemäß der definierten Simulationsmatrix sind insgesamt 960 Simulationen im Rahmen der anschließenden Unfallkinematikanalyse durchgeführt worden. Daraus ergeben sich bezüglich der berücksichtigten Fahrzeuggeschwindigkeiten für jedes Fahrzeugmodell die für Radfahrer relevanten Aufprallbereiche sowie entsprechende Werte zur Kopfaufprallgeschwindigkeit und zum Kopfaufprallwinkel. Die Simulationen zeigen für einen Großteil der Konstellationen einen ausgedehnten Kopfaufprallbereich sowie hohe Durchschnittswerte für die Kopfaufprallgeschwindigkeiten und -winkel. Neben der Bereitstellung der für die Bewertung zum Radfahrerschutz erforderlichen Simulationsdaten, sind im Rahmen zweier Simulationsstudien zusätzlich die Themen Pedelecs und Sekundäraufprall näher untersucht worden.

Von der Überarbeitung und Erweiterung des Bewertungsverfahrens sind sämtliche Module betroffen. So ist die zugrunde liegende Fahrzeugfronteinteilung an die Entwicklungen bei Euro NCAP angepasst worden und erlaubt im Zuge dessen eine genauere und umfassen-

dere Abbildung der Struktureigenschaften. Ferner sind Änderungen bei der Definition der für die Bewertung herangezogenen Kinematikparameter sowie bei der Bewertung crashaktiver Systeme erfolgt. Auch sind radfahrer- sowie fußgängerspezifische GIDAS-Daten zur Größenverteilung in das Bewertungsverfahren implementiert worden, wodurch ein direkter Bezug zum realen Unfallgeschehen gewährleistet werden kann. Das Verfahren ermöglicht nachwievor eine versuchsunabhängige und automatisierte Bewertung, welche seitens des Anwenders allein die Euro NCAP-Fußgängerschutzdaten des Fahrzeuges erfordert. Dieser Prozess konnte durch Einbindung eines nochmals überarbeiteten HIC-Geschwindigkeits-Kennfeldes weiter verbessert werden. Auf Basis der Ergebnisse dreier Kopfimpaktorversuchsreihen im Hauben- und Windschutzscheibenbereich ist zudem die Anwendung des Geschwindigkeits- und Winkelfaktors neu definiert worden. Auch die Indexberechnung selbst hat durch die Verwendung einer neuen Verletzungsrisikokurve, welche bezüglich des HIC realistischere Risikowerte ausgibt, eine Überarbeitung erfahren. Das neue Verfahren erlaubt nun für Radfahrer die fahrzeugspezifische Bewertung von Schutzmaßnahmen der passiven und aktiven Sicherheit auf einer gemeinsamen Skala sowie jeweils den Vergleich mit dem entsprechenden Verletzungsrisiko für Fußgänger.

Durch Bewertung verschiedener Schutzmaßnahmen für jeweils einen aktuellen Vertreter jeder Fahrzeugklasse konnten die fahrzeugklassenübergreifende Anwendbarkeit des Verfahrens sowie die Plausibilität der entsprechenden Indexwerte sowohl für Radfahrer als auch für Fußgänger aufgezeigt werden. Für alle Fahrzeugklassen fallen die Radfahrerindexwerte deutlich höher aus als die entsprechenden Fußgängerindexwerte. Der Grund dafür sind die hohen durchschnittlichen Kopfaufprallgeschwindigkeiten der Radfahrer, welche oftmals, vor allem in den relevanten Kopfaufprallbereichen der Erwachsenen, oberhalb der Fahrzeuggeschwindigkeit liegen, was bei den Fußgängern nicht der Fall ist. Zudem nimmt durch die weiter hinten liegenden Kopfaufprallorte der Radfahrer die Relevanz des kritischen Windlauf- und unteren Windschutzscheibenbereichs für Kinder in der Regel zu.

Im Zuge dreier Realversuche mit Fahrzeuggeschwindigkeiten von 40, 30 und 20 km/h sind die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse zur Radfahrerunfallkinematik bestätigt worden. Der von rechts kommende Radfahrer weist dabei in allen Versuchen eine Eigengeschwindigkeit von 15 km/h auf und wird durch einen auf einem realen Fahrrad platzierten Polar-II Dummy abgebildet. Dazu sind im Vorfeld zunächst Simulationen mit einem entsprechenden Modell des Versuchsfahrzeuges erfolgt. Hier zeigt sich im Hinblick auf die Radfahrerkinematik eine generell gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch. So treten die hohen Kopfaufprallgeschwindigkeiten aus der Simulation auch im Versuch auf. Allerdings fallen die HIC-Werte beim Primäranprall relativ niedrig aus, was hauptsächlich auf die Vorschädigung der Windschutzscheibe durch den vor dem Kopfaufprall stattfindenden Ellenbogen- bzw. Schulteraufprall zurückzuführen ist. Deutlich kritischer sind die im Versuch, auch bei niedriger Fahrzeuggeschwindigkeit, um ein Vielfaches höheren Belastungswerte beim Sekundäraufprall. Auch wenn im Zuge dieser Ergebnisse eine Einbindung des Sekundäraufpralls in die Indexberechnung sinnvoll wäre, fehlt hierzu eine entsprechende Bewertungsgrundlage in Form fahrzeugspezifischer gesetzlicher oder verbraucherschutzseitiger Prüfergebnisse.

7 Formelzeichen und Indizes

Formelzeichen	Einheit	
α_{Kopf}	°	Kopfaufprallwinkel
$v_{\text{Fzg},x}$	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit in x-Richtung
$v_{\text{Kopf},x}$	m/s	Kopfgeschwindigkeit in x-Richtung
$v_{\text{Kopf},y}$	m/s	Kopfgeschwindigkeit in y-Richtung
$v_{\text{Kopf},z}$	m/s	Kopfgeschwindigkeit in z-Richtung
$v_{\text{rel,Kopf}}$	m/s	Relativgeschwindigkeit des Kopfes

Abkürzungen

AIS	Abbreviated Injury Scale - medizin. Klassifizierung der Verletzungsschwere
APROSYS	Integrated Project on Advanced Protection Systems
CAD	Computer-Aided Design
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.
GIDAS	German In-Depth Accident Study
HIC	Head Injury Criterion - Kenngröße für die Kopfbelastung
HIT	Head Impact Time
LFC	Large Family Car
MAIS	Maximum Abbreviated Injury Scale (maximaler AIS-Wert)
MKS	Mehrkörpersystem
MPV	Multi-purpose Vehicle
NCAP	New Car Assessment Programme - Verbraucherschutztestprogramm
STRADA	Swedish Traffic Accident Data Acquisition
SUV	Sport Utility Vehicle

UDV	Unfallforschung der Versicherer
WAD	Wrap Around Distance - Abwickellänge
WSS	Windschutzscheibe
VERPS	Vehicle Related Pedestrian Safety

8 Literatur

- [BIS95] BISCHOFF, D. C.
Final Economic Assessment, FMVSS No. 201, Upper Interior Head Protection
Docket 92-28-No4-002 (60FR43031, August 8, 1995)
National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)
Office of Regulatory Analysis
Plans and Policy
Juni, 1995
- [BMW12] HELMER
Unfallszenarien zwischen Pkw und Fahrrädern in Deutschland - Aktuelle
Entwicklung und Vergleich mit Pkw-Fußgänger Unfällen
BMW Unfallforschung
Crash.tech 2012
München, 24. April 2012
- [CAR05] CARTER, E.
Definition of vehicle and pedestrian / cyclist impact conditions
APROSYS SP3
Deliverable D3.1.1 - AP-SP31-005R
März 2005
- [COL12] N.N.
European Bicycle Market - 2012 edition
Industry & Market Profile (2011 statistics)
COLIBI, Association of the European Bicycle Industry
Brüssel, August 2012
- [COL13] N.N.
European Bicycle Market - 2013 edition
Industry & Market Profile (2012 statistics)
COLIBI, Association of the European Bicycle Industry
Brüssel, Oktober 2013
- [DAC12] CANDAPPA, N.; CHRISTOPH, M.; VAN DUIJVENVOORDE, K.; VIS, M.;
THOMAS, P.; KIRK, A.; BROWN, L.; YANNIS, G.; EVGENIKOS, P.;
PAPANTONIOU, P.; BROUGHTON, J.; BRANDSTAETTER, C.; PACE, J. F.;
TORMO, M. T.; SANMARTÍN, J.; HADDAK, M.; PASCAL, L.; LEFÈVRE, M.;
AMOROS, E.
Traffic Safety Basic Facts 2012 - Cyclists
DaCoTA Project, European Road Safety Observatory
European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport, 2012

- [EUN13] N.N.
European New Car Assessment Programme (Euro NCAP)
OPEL_Adam_2013_Ped_Markup2.jpg
2013
- [EUN14] N.N.
European New Car Assessment Programme (Euro NCAP)
Pedestrian Testing Protocol
Version 8.0
Juni 2014
- [FLÜ86] FLÜGEL, B.; GREIL, H.; SOMMER, K.
Anthropologischer Atlas – Alters- und Geschlechtsvariabilität des Menschen
Frankfurt/Main: Edition Wötzel, 1. Auflage, 1986
- [FRE12] FREDRIKSSON, R.; ROSÉN, E.
Priorities for Bicyclist Protection in Car Impacts – a Real life Study of Severe
Injuries and Car Sources
IRCOBI Konferenz 2012
Paper IRC-12-83
Dublin, September 2012
- [GID14] DOBBERSTEIN, J.
Radfahrergrößenverteilung - Auswertung GIDAS-Datenbank
BASt
25. April 2014
- [HAM10] HAMACHER, M.
Fußgängerschutz am Kraftfahrzeug - Forschungsprojekt 85210
Abschlussbericht
Auftraggeber: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV)
Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen
Dezember 2010
- [HAM13] HAMACHER, M.; ECKSTEIN, L.; KÜHN, M.; HUMMEL, T.
Integrated Pedestrian Safety Assessment Procedure
The 23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of
Vehicles (ESV)
Paper 13-0268
Seoul, Mai 2013

- [HAM14] HAMACHER, M.
Integriertes Fußgängerschutz-Bewertungsverfahren für Kraftfahrzeuge
Schriftenreihe Automobiltechnik – ISBN 978-3-940374-81-3
Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen University
Aachen, November 2014
- [KAE86] KAESER, R.; GAEGAUF, M.
Motor car design for pedestrian injury prevention
Int. journal of vehicle design, Sonderheft Vehicle Safety, S. 215-231
Institute of Lightweight Structures, Swiss Federal Institute of Technology
Zurich, 1986
- [KRA09] KRAMER, F.
Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen
Biomechanik - Simulation - Sicherheit im Entwicklungsprozess
3., überarbeitete Auflage
Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009
- [KÜH07] KÜHN, M.; FRÖMING, R.; SCHINDLER, V.
Fußgängerschutz
Unfallgeschehen, Fahrzeuggestaltung, Testverfahren
Springer-Verlag, Berlin
2007
- [KÜH12] KÜHN, M.; LANG, A.; BENDE, J.
Typical Accident Scenarios for Pedestrians and Cyclists
Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. - Unfallforschung
der Versicherer
Crash.tech 2012
München, 24.-25. April 2012
- [LIE11] LIERS, H.
Analyse des Unfallgeschehens zwischen PKW und Fahrrädern im Hinblick auf
passive Schutzmaßnahmen
VUFO GmbH
6. Praxiskonferenz Fußgängerschutz
Bergisch Gladbach, Juni 2011
- [LIE11b] LIERS, H.
Fußgänger-Größenverteilung - Auswertung GIDAS-Datenbank 1999-2010
Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH (VUFO)
Dresden, Oktober 2011

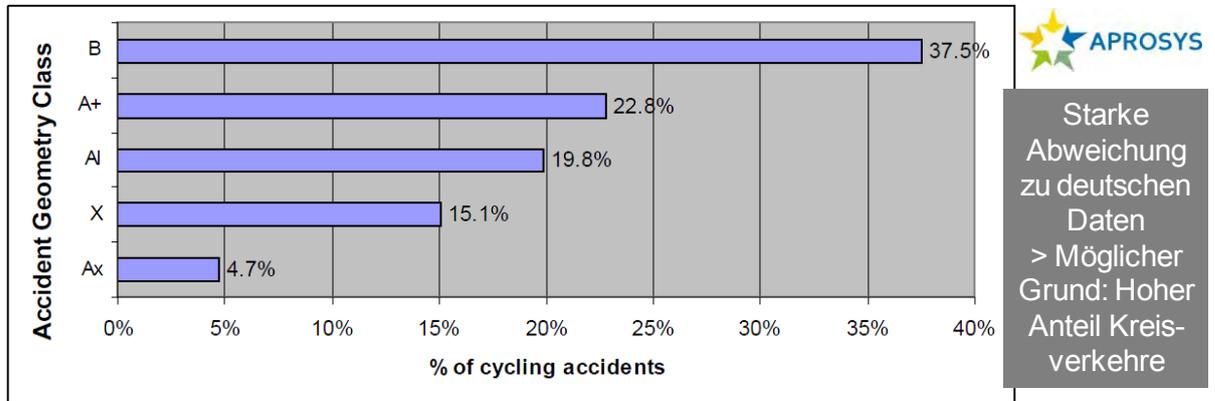
- [MAR06] MARTINEZ, L.; GUERRA, L. J.; FERICHOLA, G.; GARCIA, A.; YANG, J.; YAO, J.
APROSYS SP3
Stiffness Corridors for the Current European Fleet
Deliverable D3.1.2.B, Report Nr. AP-SP31-009R
Brüssel, 2006
- [MEI07] MEINECKE, M. M.; OBOJSKI, M. A.
Forschungsprojekt AKTIV-AS
Unfallanalyse und Funktionsspezifikation (AP1000)
Sicherheit für Fußgänger und Radfahrer – SFR
Version 1.10
2007
- [OLS12] OLSSON, J.
VP Research Autoliv Inc
Vortrag Autoliv
SaveCAP Demonstration Event
Helmond, 8. November 2012
- [POL08] N.N.
POLAR II User's Manual
Version 2.2
HONDA R&D CO., LTD. TOCHIGI R&D CENTER
Japan, 2008
- [ROD12] RODARIUS, C.; DE HAIR, S.; VAN SCHIJNDEL, M.
The SaveCAP project: Cyclist and pedestrian protection
7. Praxiskonferenz Fußgängerschutz
Bergisch Gladbach, Juni 2012
- [SAE07] N.N.
Surface Vehicle Recommended Practice
SAE International Document j2782
Dummy Task Group, Draft Recommended Practice for Pedestrian Dummy
Performance Specifications for a 50th Percentile Male Pedestrian Dummy
SAE International, 2007
- [SCH12] SCHRAM, R.
New Euro NCAP Pedestrian Protocols
Euro NCAP
7. Praxiskonferenz Fußgängerschutz
Bergisch Gladbach, Juni 2012

- [SCH12a] VAN SCHIJNDEL, M.; DE HAIR, S.; RODARIUS, C.; FREDRIKSSON, R.
Cyclist kinematics in car impacts reconstructed in simulations and full scale testing with Polar dummy
IRCOBI Konferenz 2012
Paper IRC-12-85
Dublin, September 2012
- [SCH12b] VAN SCHIJNDEL-DE NOOIJ, M.
SaveCAP – Project Summary
<http://www.savecap.org/content/information-download>
2012
- [SIM09] SIMMS, C.; WOOD, D.
Pedestrian and Cyclist Impact – A Biomechanical Perspective
Solid Mechanics and its Applications, Volume 166
Springer Dordrecht Heidelberg London New York
2009
- [STA13] N.N.
Verkehrsunfälle - Zeitreihen - 2012
Artikelnummer: 5462403127005
Statistisches Bundesamt
Wiesbaden, 10. Juli 2013
- [STA13a] N.N.
Verkehrsunfälle – Zweiradunfälle im Straßenverkehr
Artikelnummer: 5462408127004
Statistisches Bundesamt
Wiesbaden, 3. September 2013
- [TAK07] TAKAHASHI, Y.; AKIYAMA, A.; OKAMOTO, M.
Honda R&D Co., Ltd., Japan
Polar-II Pedestrian Dummy
1. VKU Konferenz Fußgängerunfälle und Fußgängerschutz
Aachen, Dezember 2007
- [TNO13] N.N.
MADYMO Human Models Manual - Release 7.5
TNO, Juni 2013
- [UDV13] KÜHN, M.; LANG, A.; HUMMEL, T.
Accidents with Bicyclists
Unfallforschung der Versicherer (UDV)
Auswertungen der UDV Datenbank
Berlin, September 2013

- [VKU15] N.N.
Zweiradwarner von Jaguar
VKUonline.de - Aktuelle Nachrichten
Januar 2015
- [WAL07] WALLENTOWITZ, H.; BOVENKERK, J.
Institut für Kraftfahrzeuge RWTH Aachen
Abschlussbericht Forschungsprojekt FE 82.229/2002
Schutz von Fußgängern beim Scheibenaufprall
BASt-Forschungsbericht
Bergisch Gladbach, 2007
- [WAT09] WATSON, J.; HARDY, R. N.
Additional/alternate test methods for cyclists
APROSYS SP3
Deliverable D3.3.3E - AP-SP3-023R
März 2009
- [ZAN12] ZANDER, O.; GEHRING, D. U.; LEßMANN, P.
Schutz von Fahrradfahrern bei Kollisionen mit Kraftfahrzeugen und bei
Alleinunfällen
BASt
Crash.tech 2012
München, 24.-25. April 2012
- [ZAN13] ZANDER, O.; GEHRING, D. U.; LEßMANN, P.
Improved Safety of Bicyclists in the Event of a Collision with MotorVehicles and
during single Accidents
ESV Paper 13-0180
2013
- [ZIV13] N.N.
ZIV-Jahresbericht 2013
Zweirad-Industrie-Verband e.V. (ZIV)
Bad Soden a.Ts., April 2013

9 Anhang

9.1 Unfallszenarien APROSYS



A: vehicle is approximately moving straight ahead, in particular:
 A+ : Cyclist is crossing lateral to vehicle heading direction
 Al : Cyclist is moving in same or opposite direction
 Ax : Unknown / ambiguous cyclist motion
 B: Vehicle is not moving straight ahead
 X: Unknown / ambiguous vehicle motion

Kategorie	Anteil [%]
A	50 (78)
B	39 (20)
X	11 (2)

(Anteil Fußgänger)

Abb. 9-1: Britische Daten [CAR05]

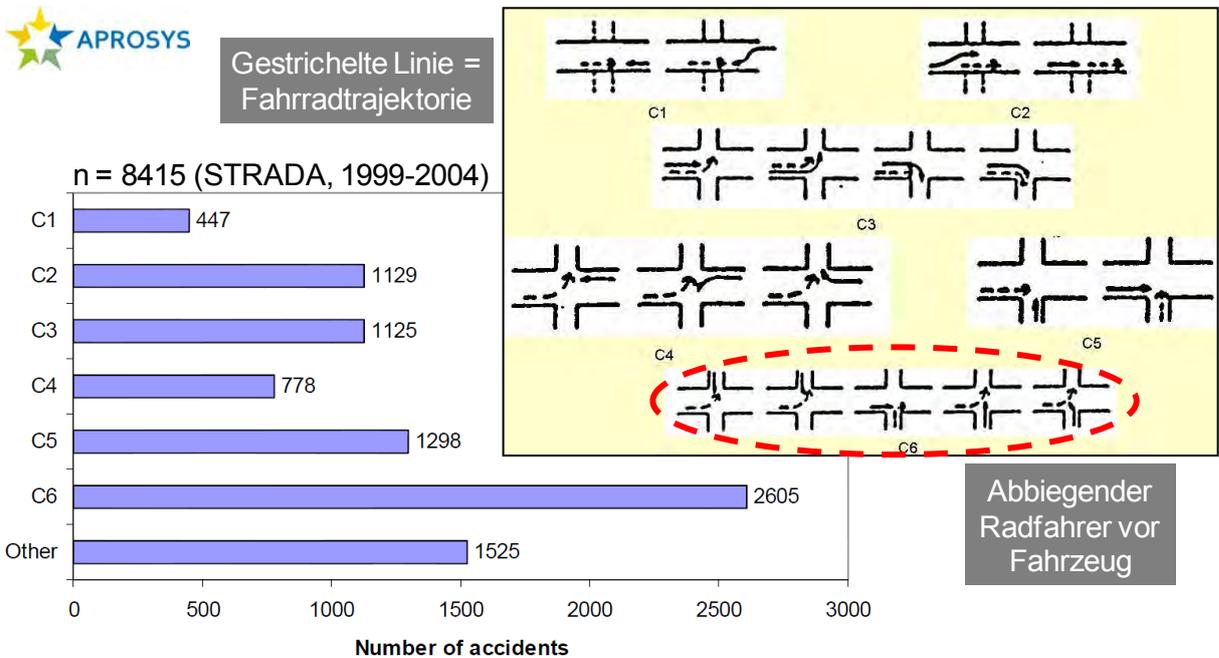


Abb. 9-2: Schwedische Daten [CAR05]

9.2 Alter und Größe verunglückter Radfahrer

Szenario	Perzentile Alter Fahrradaufsassende						
	5	10	25	50	75	90	95
1	9	12	19	32	55	68	74
2	9	13	20	35	53	68	75
3	12	17	24	34	47	61	66
4	12	16	24	37	51	64	67
7	6	19	26	43	54	78	84

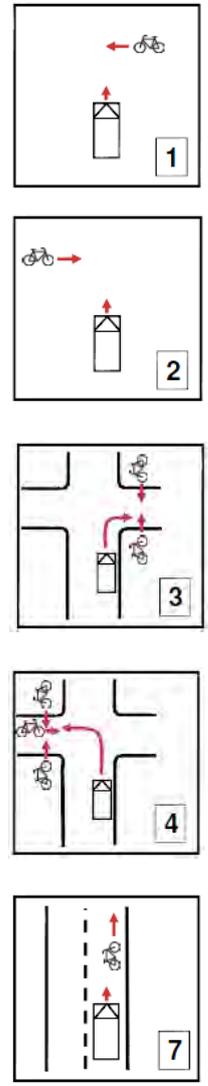
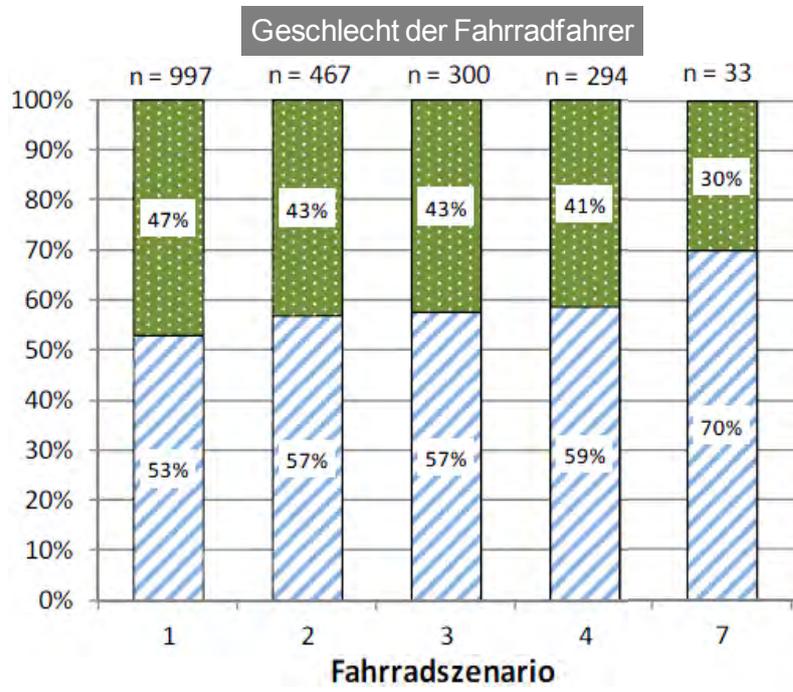


Abb. 9-3: Verteilung von Alter und Größe verunglückter Radfahrer (GIDAS, n=2840) [BMW12]

9.3 Definition der Fahrradrahmengemeometrien

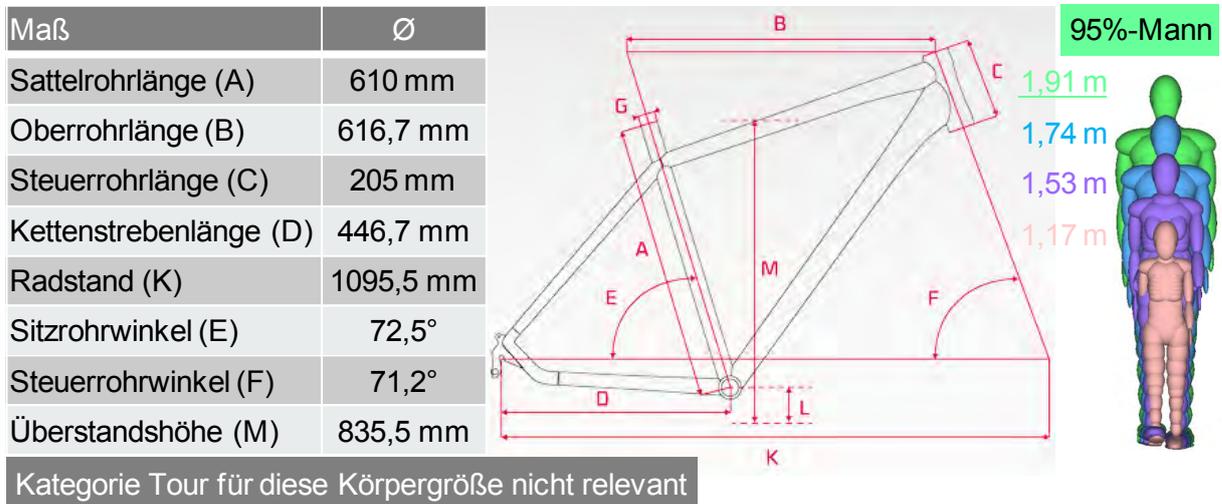


Abb. 9-4: Definition einer repräsentativen Fahrradrahmengemeometrie für den 95%-Mann

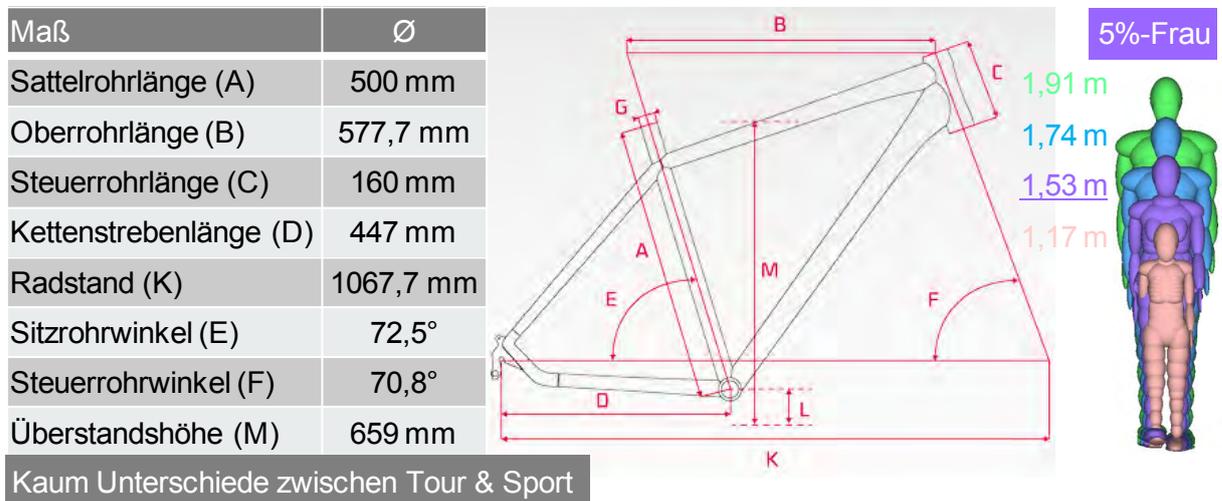


Abb. 9-5: Definition einer repräsentativen Fahrradrahmengemeometrie für die 5%-Frau

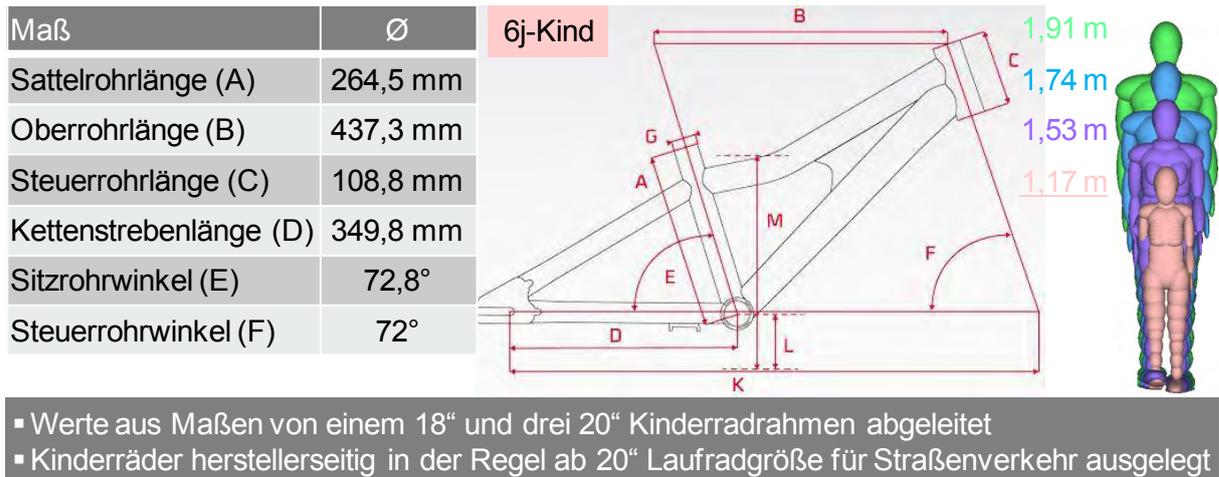


Abb. 9-6: Definition einer repräsentativen Fahrradrahmengenometrie für das 6-jährige Kind

9.4 Fahrzeugmodellparameter im SaveCAP-Projekt

Vehicle model	BLE height [mm] ^{*)}		Bonnet length [mm]		Windscreen angle [°] ^{**)}	
	min	max	min	max	min	max
A	500	850	500	900	20	50
B	500	850	900	1300	0	20
C	500	1000	500	900	0	20
D	500	850	900	1300	20	50

Abb. 9-7: Variation der Geometrieparameter der vier Fahrzeugmodelle [SCH12a]

9.5 Dummypositionierung im SaveCAP-Projekt

Parameter	Granny bicycle small female	Granny bicycle average male	Hybrid bicycle small female	Hybrid bicycle average male
Saddle height	0.87 m	0.98 m	0.89 m	1.05 m
Steer height	1.12 m	1.17 m	0.93 m	1.05 m

Abb. 9-8: Sattel- und Lenkerhöhen in der Simulation [SCH12a]

	Average	n		Average	n
Saddle height (upper edge)			Steer height (upper edge)		
- All bikes	0,982 m	427	- All bikes	1,139 m	427
- City bikes	0,986 m	331	- City bikes	1,145 m	331

Goudappel Coffeng, Detail gegevens fietsmeting; bijlage bij vooronderzoek Noordstellend document fietsparkeren, 1 juni 2010 (not officially published)

Abb. 9-9: Felddaten zu Sattel- und Lenkerhöhen einer niederländischen Studie [SCH12a]

	X	Y	Z
	(mm)	(mm)	(mm)
Head COG	465	545	1530
Pelvis	890	495	1025
Upper tibia right front	510	610	515
Foot joint right front	550	655	150

Abb. 9-10: Dummypositionierung in den Radfahrertests [SCH12a]

Dummy position in pedestrian tests. Tibia angle left: -10°, Tibia angle right: 18°			
Knee Y rel. distance	190 mm		
	X (mm)	Z (mm)	
Pelvis plate	+40	1040	
Hand wrists		1010	
Shoulder joint	195	1370	
Head COG	290	1610	

Abb. 9-11: Dummypositionierung in den Fußgängertests [SCH12a]

9.6 SaveCAP Testergebnisse

<i>Test</i>	<i>Test type</i>	<i>Head impact speed (m/s)</i>	<i>Head impact time (ms)</i>	<i>Chest impact speed (m/s)</i>	<i>WAD (mm)</i>	<i>HIC₁₅</i>	<i>Max chest deflection (mm)</i>
1	Bicyclist Near side	n/a	121	n/a	2500	502	67
2	Bicyclist Centre	14.8	134	6.5	2300	753	24
3	Bicyclist Far side	9.7	130	7.5	2000	1433	61
4	Bicyclist Rear	16.3	200	7.8	2500	4429	8
5	Pedestrian Centre	7.5	134	n/a	1860	301	23
6	Pedestrian Far side	8.1	158	8	2430	2214	15

Abb. 9-12: Full-Scale-Tests zur Unfallrekonstruktion

9.7 Fahrzeugmodelle

Fahrzeugmodell	Höhe Hauben- vorderkante [mm]	Haubenwinkel [°]	Winkel Haube – WSS [°]	WAD bis Hauben- hinterkante [mm]
Kompakt	777	18,5	173	1522
Limousine	763	11,3	161,3	1877
Van	775	21,8	172,2	1607
Sportwagen	532	16,2	166,7	1812
SUV	955	13,4	163,9	1793
OneBox	1021	31,2	172,7	1550

Abb. 9-13: Geometrieparameter der Fahrzeugmodelle



Abb. 9-14: Simulationsmodell des Versuchsfahrzeugs [HAM10]

9.8 Fußgängergrößenverteilungen

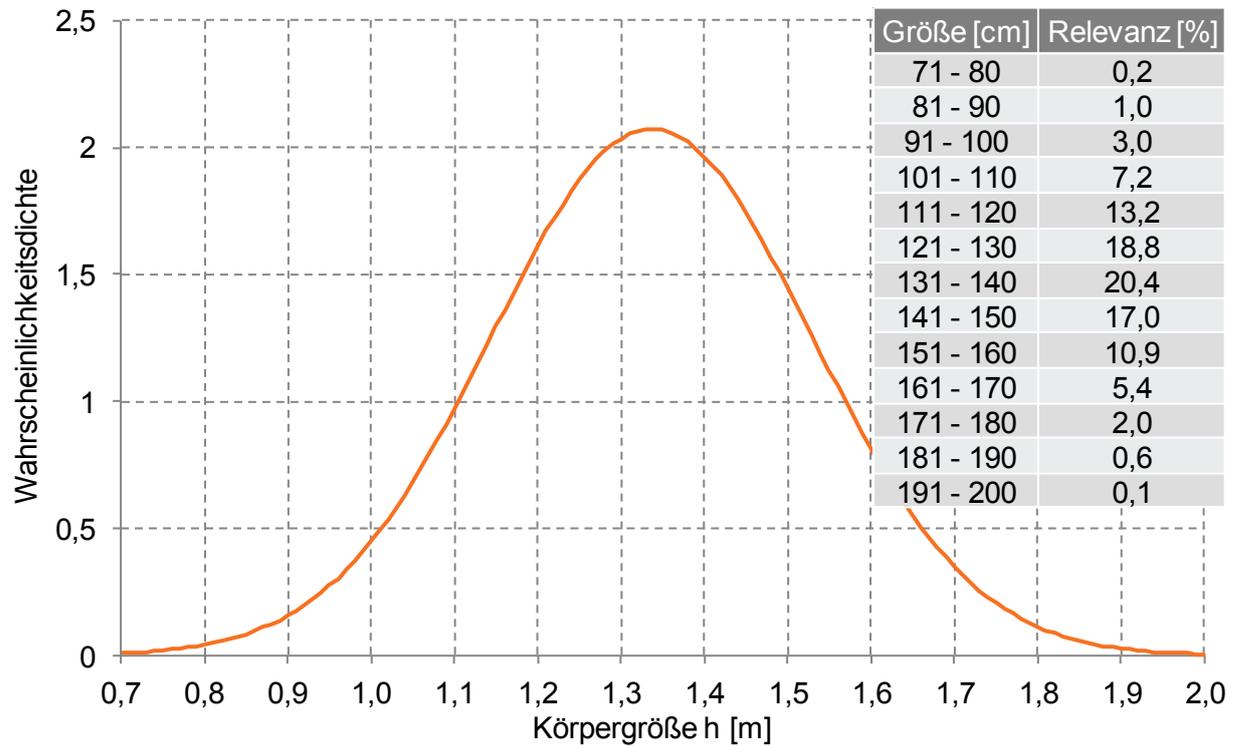


Abb. 9-15: GIDAS-Fußgängergrößenverteilung Kinder (GIDAS, n = 215) [HAM14] [LIE11b]

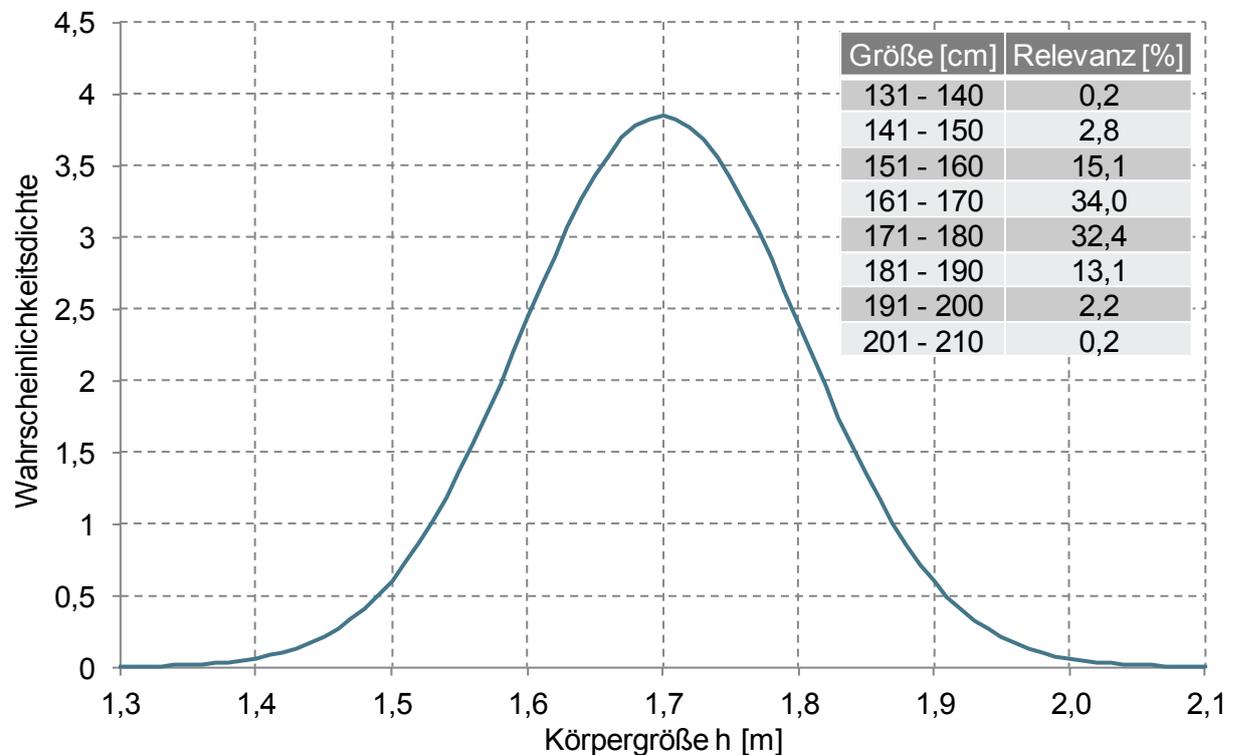
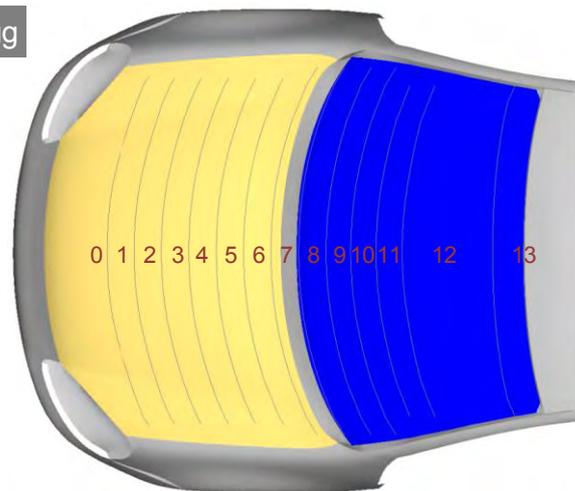


Abb. 9-16: GIDAS-Fußgängergrößenverteilung Erwachsene (n = 685) [HAM14] [LIE11b]

9.9 Simulationsergebnisse Versuchsfahrzeug

50%-Mann $V_{Radf.} = 15 \text{ km/h}$	Pedal- stellung	$V_{Fzg.}$ [km/h]	WAD [mm]	WAD Bereich	$V_{rel, Kopf}$ [km/h]	$\alpha_{rel, Kopf}$ [°]	t_{Kopf} [ms]
Rechtwinkliger Eckanprall	oben	40	2230	12	37,7	62,3	144
	unten	40	2330	12	34,2	50,1	150
	vorne	40	2375	12	34,9	52,8	152
	hinten	40	2460	12	34,2	49,7	162
	oben	35	2175	12	34,5	67,1	158
	unten	35	2280	12	28,2	40,3	168
	vorne	35	2335	12	29,5	48,6	171
	hinten	35	2390	12	32,5	60	180
	oben	30	2130	12	29,6	67,5	180
	unten	30	2200	12	32,6	75,4	184
	vorne	30	2245	12	28,3	62,6	189
	hinten	30	2335	12	28,4	62,3	200
	oben	20	1960	10	25,1	86,9	250
	unten	20	1885	9	27,2	88,8	234
	vorne	20	2015	11	28,1	87,3	246
	hinten	20	2220	12	24,8	85,5	260

Versuchsfahrzeug



	WAD [mm]	
13	Dach	
12	2100	- 2467
11	2000	- 2100
10	1900	- 2000
9	1800	- 1900
8	1700	- 1800
7	1600	- 1700
6	1500	- 1600
5	1400	- 1500
4	1300	- 1400
3	1200	- 1300
2	1100	- 1200
1	1000	- 1100

Abb. 9-17: Simulationsergebnisse des Versuchsfahrzeugs für den 50%-Mann bei einer Radfahrgeschwindigkeit von 15 km/h (rechtwinkliger Eckanprall)

9.10 Ergebnisse Full-Scale-Tests

9.10.1 Zentraler rechtwinkliger Anprall mit 40 km/h

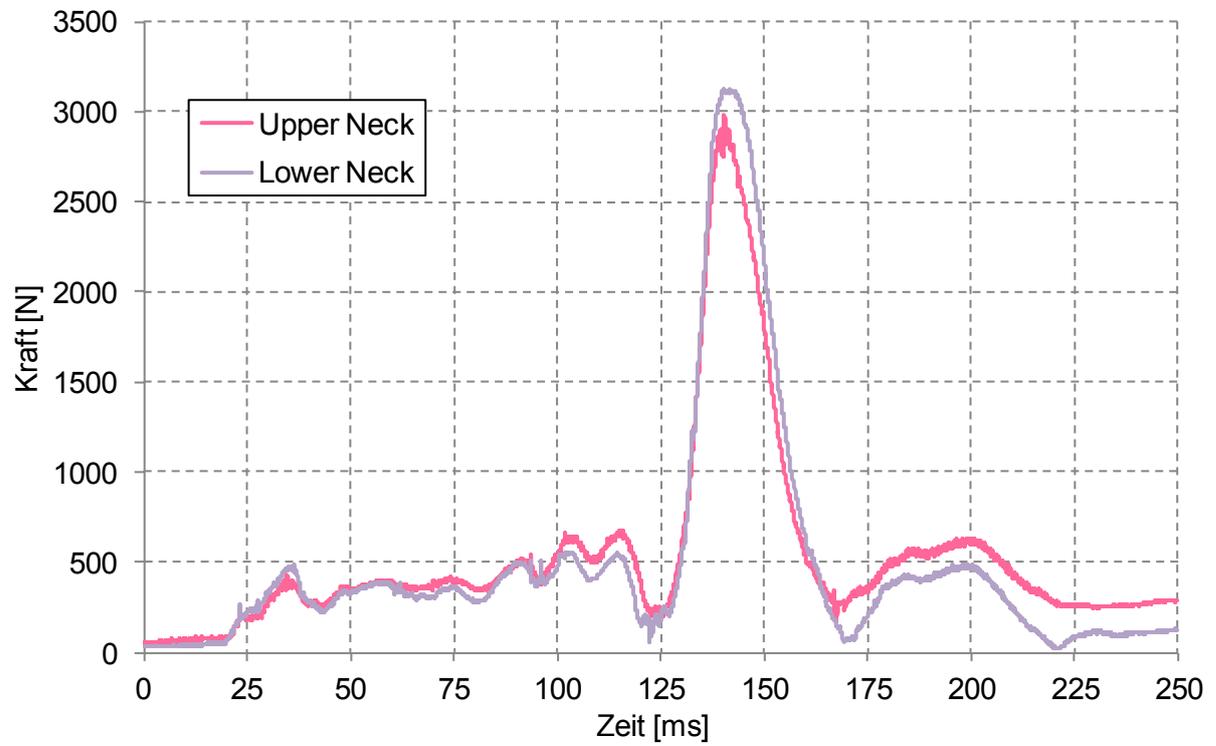


Abb. 9-18: Resultierende obere & untere Nackenkraft bei $v_{Fzg} = 39,9$ km/h ($v_{Radf} = 14,1$ km/h)

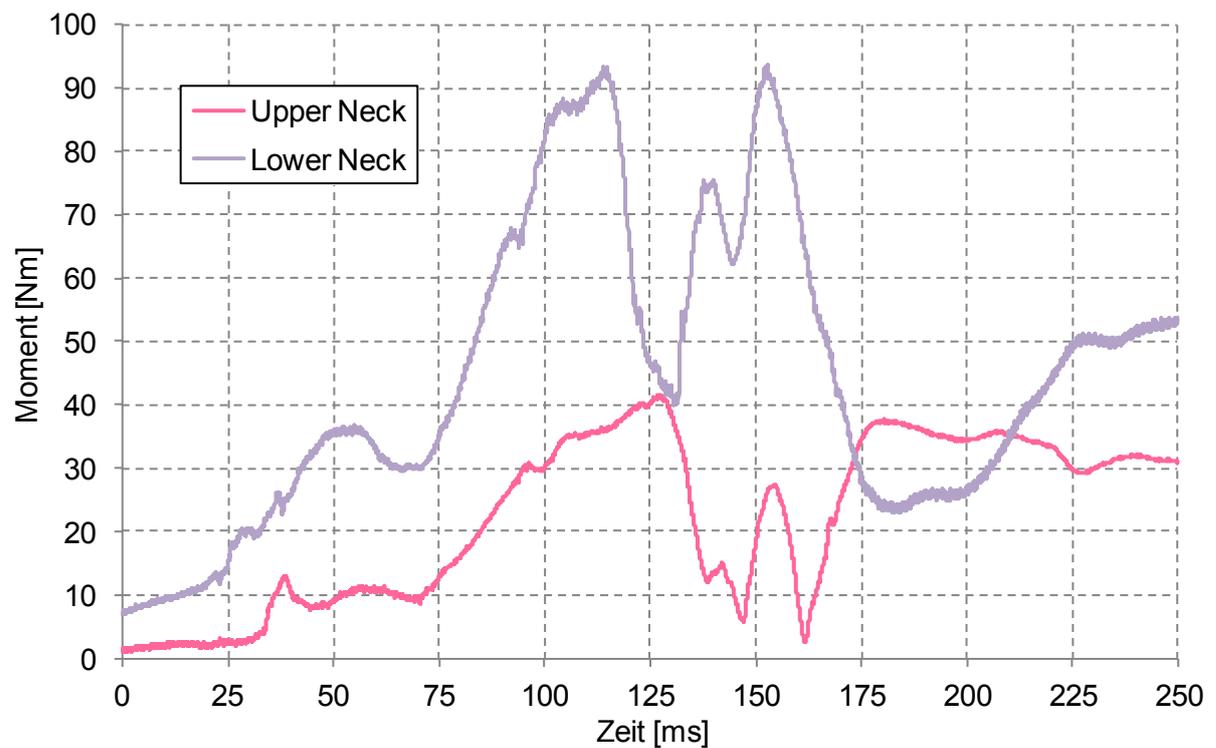


Abb. 9-19: Result. oberes & unteres Nackenmoment bei $v_{Fzg} = 39,9$ km/h ($v_{Radf} = 14,1$ km/h)

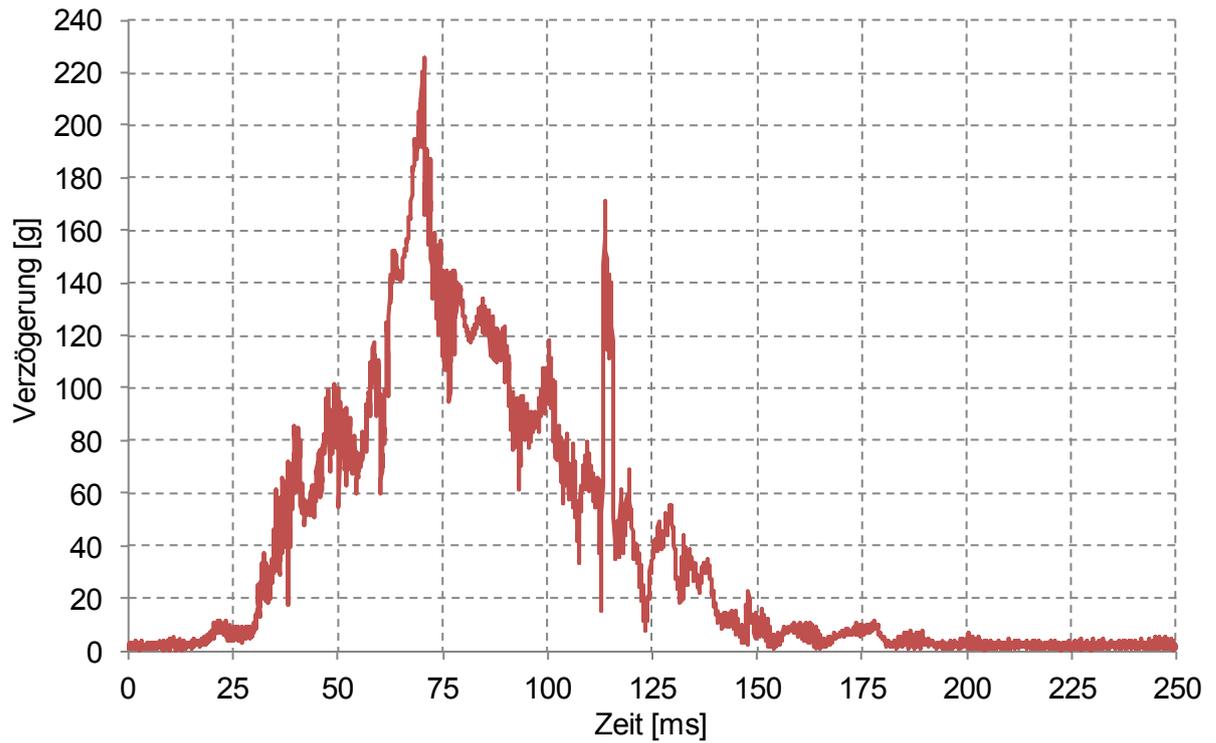


Abb. 9-20: Resultierende Torso-Beschleunigung bei $v_{Fzg} = 39,9$ km/h ($v_{Radf} = 14,1$ km/h)

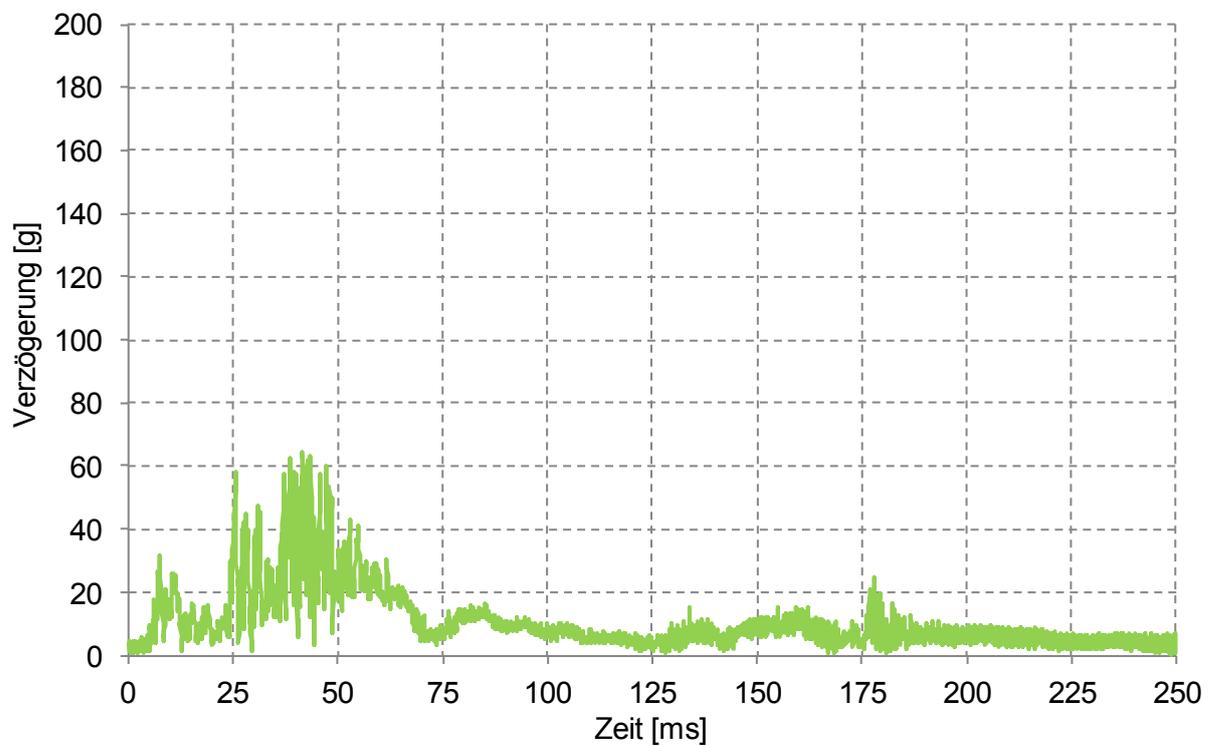


Abb. 9-21: Resultierende Becken-Beschleunigung bei $v_{Fzg} = 39,9$ km/h ($v_{Radf} = 14,1$ km/h)

9.10.2 Zentraler rechtwinkliger Anprall mit 30 km/h

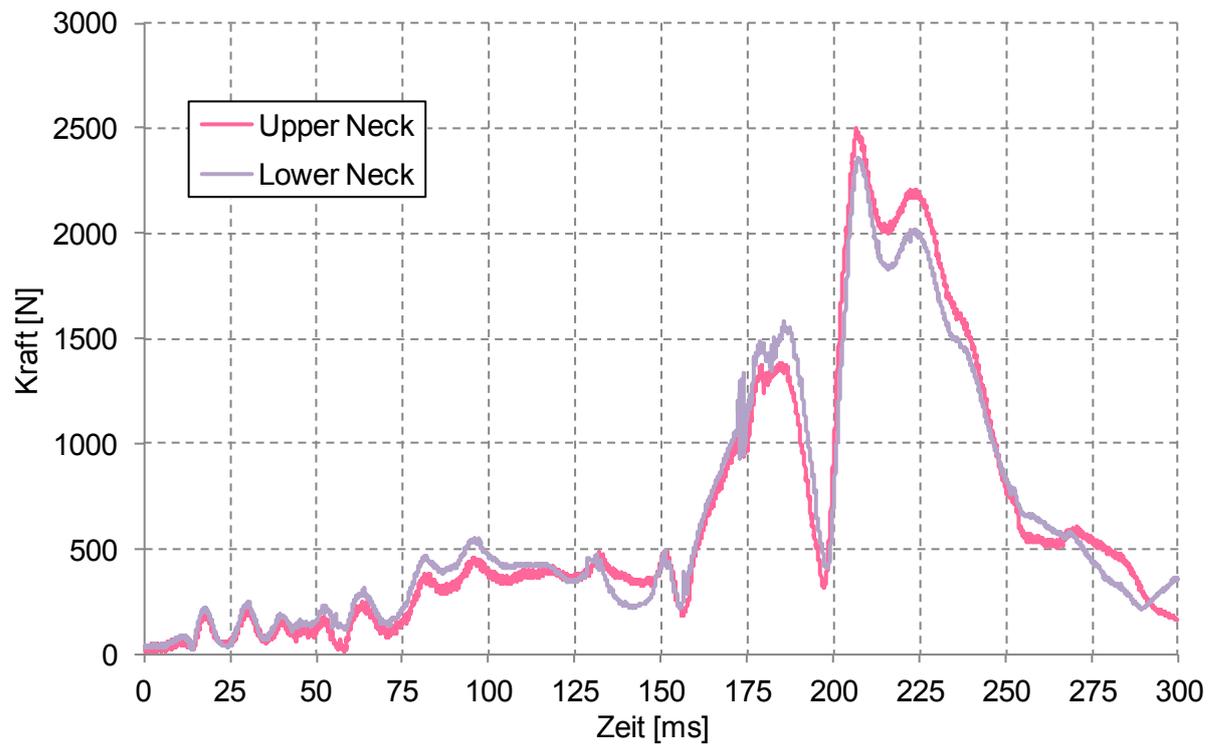


Abb. 9-22: Resultierende obere & untere Nackenkraft bei $v_{Fzg} = 29$ km/h ($v_{Radf} = 13,5$ km/h)

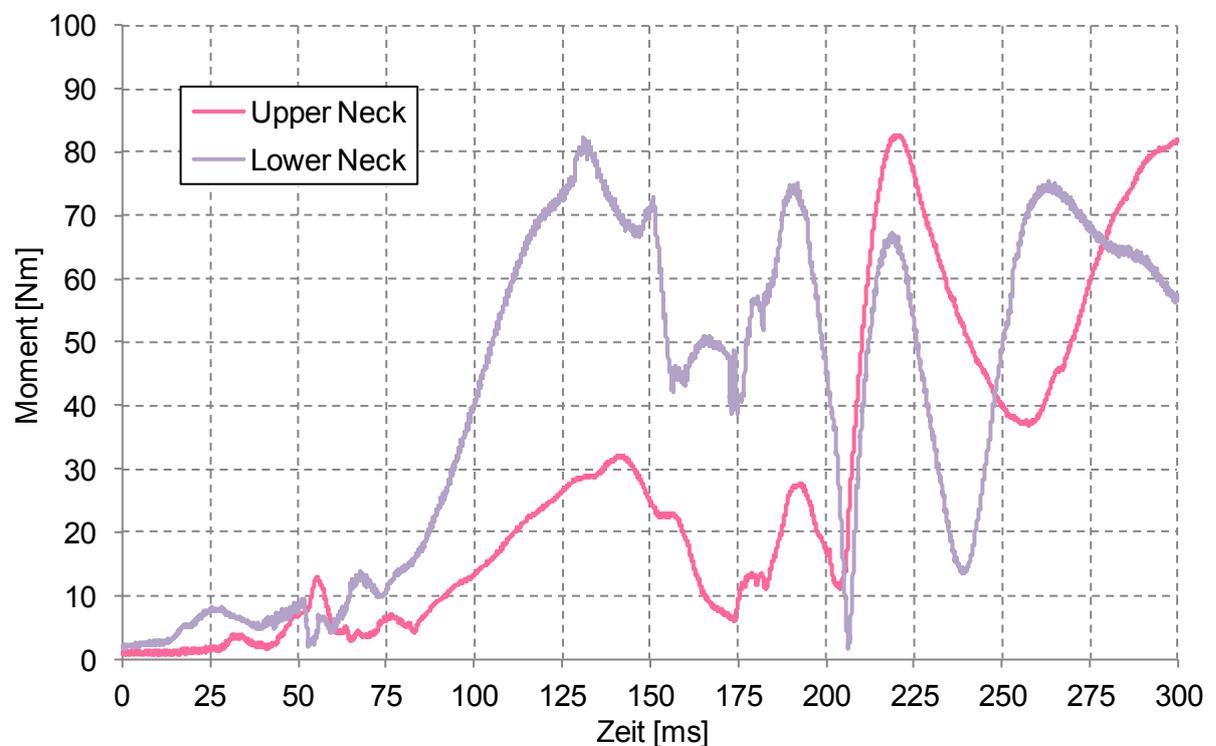


Abb. 9-23: Result. oberes & unteres Nackenmoment bei $v_{Fzg} = 29$ km/h ($v_{Radf} = 13,5$ km/h)

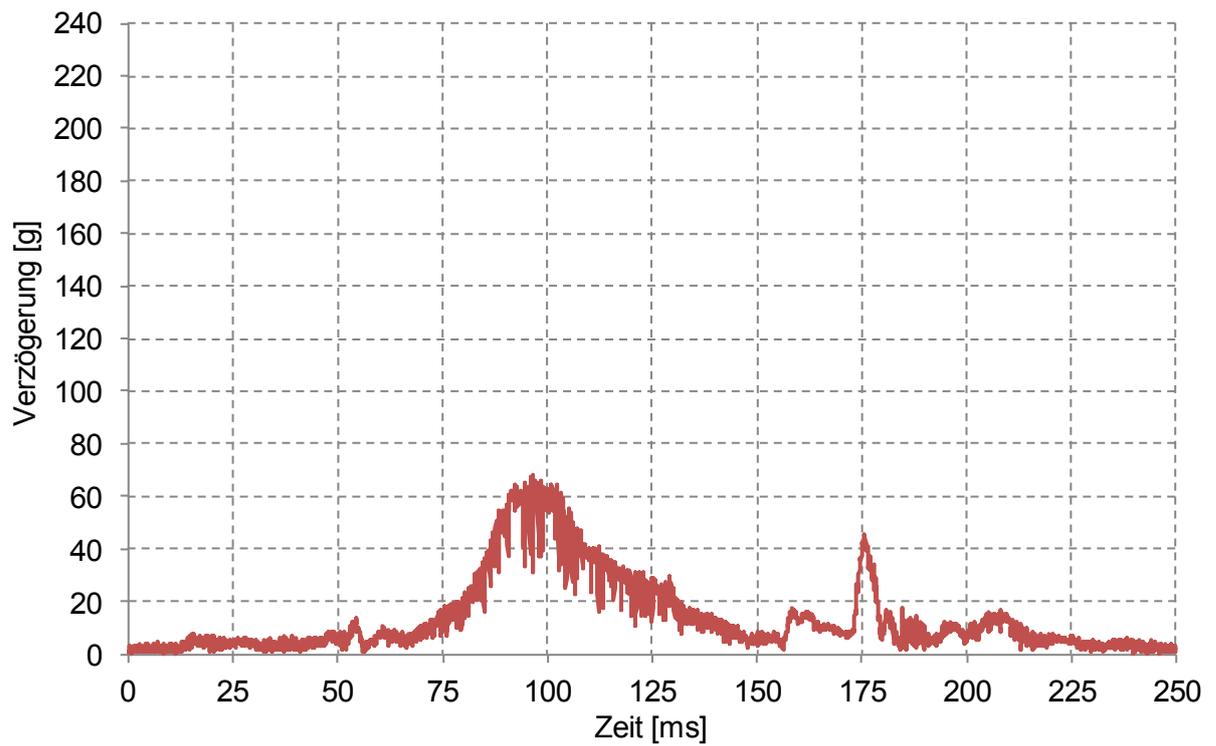


Abb. 9-24: Resultierende Torso-Beschleunigung bei $v_{Fzg} = 29$ km/h ($v_{Radf} = 13,5$ km/h)

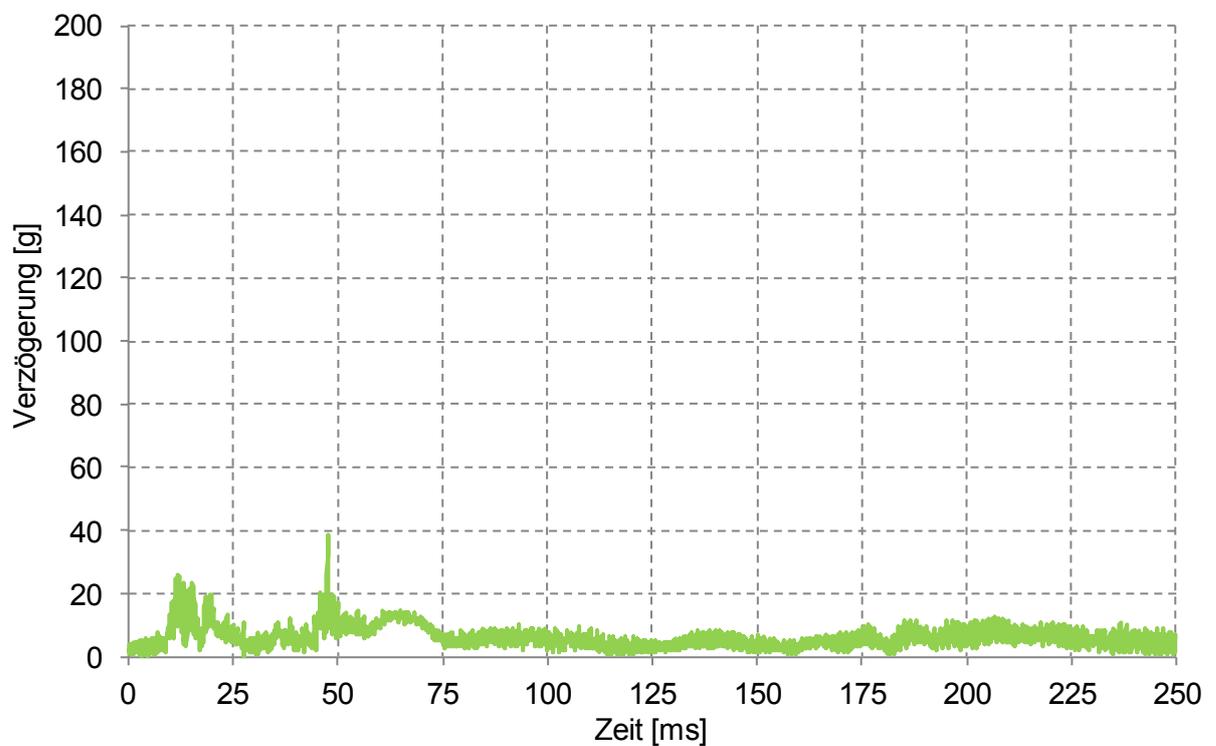
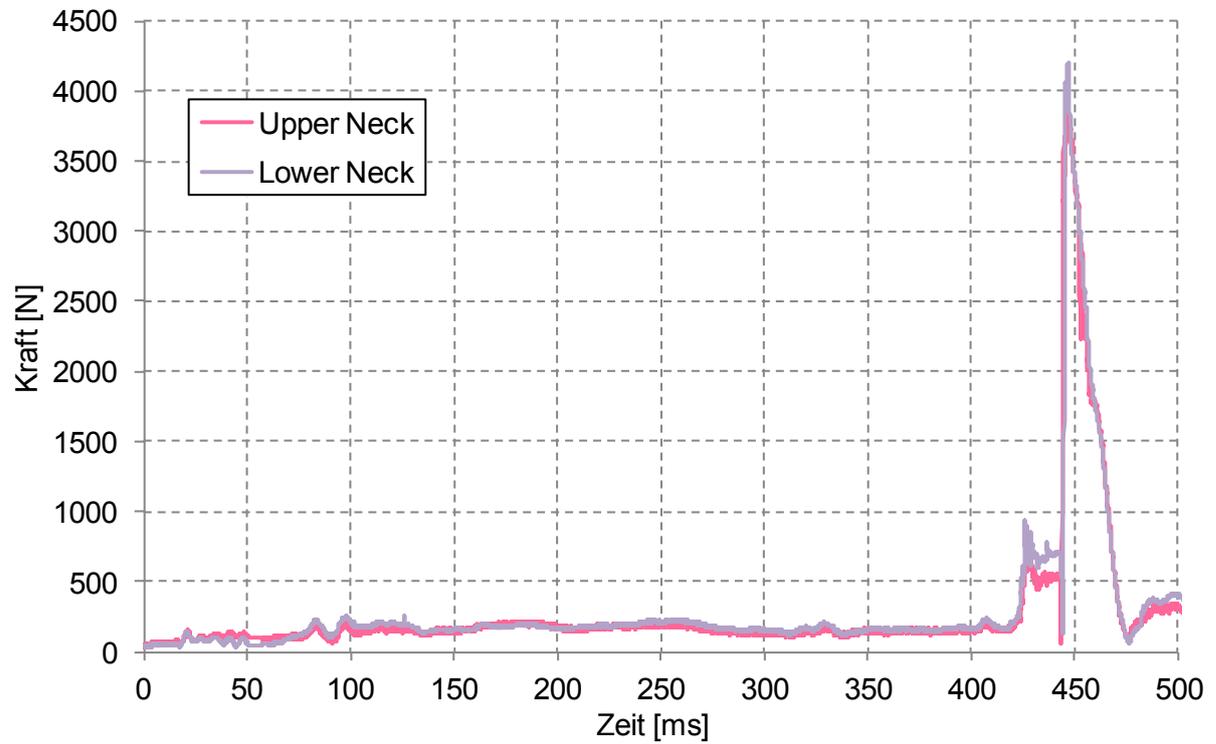
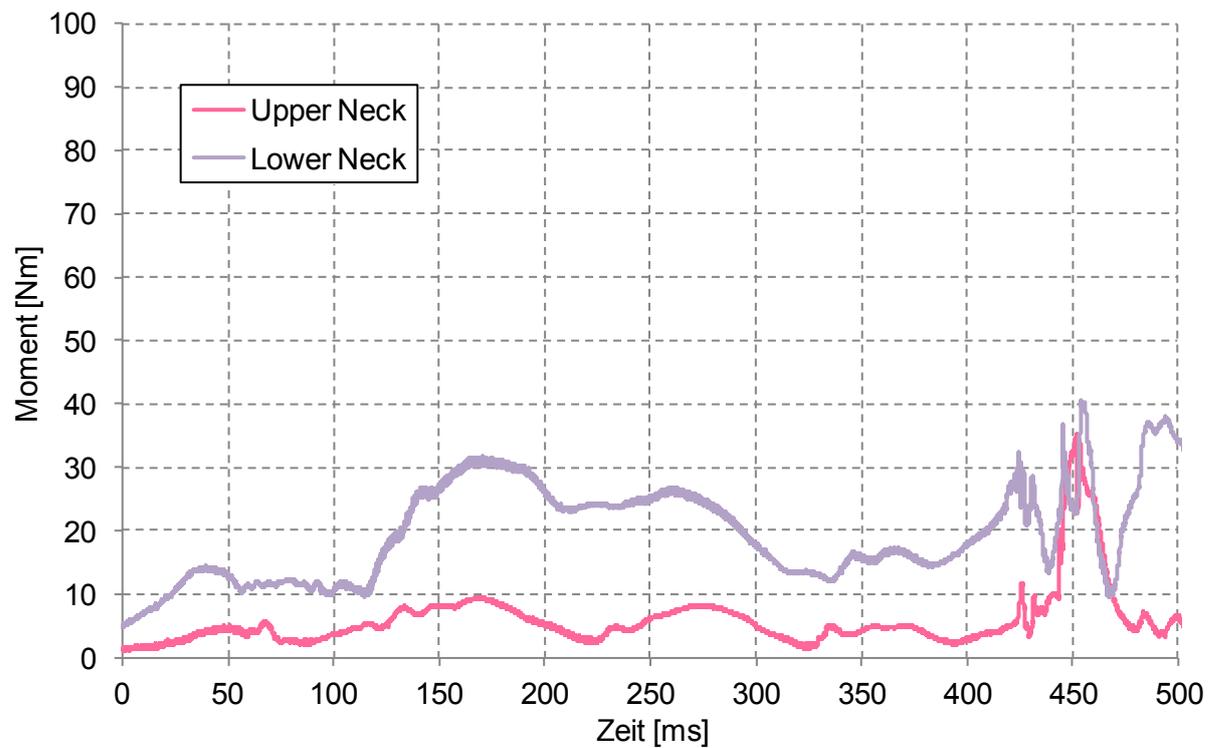


Abb. 9-25: Resultierende Becken-Beschleunigung bei $v_{Fzg} = 29$ km/h ($v_{Radf} = 13,5$ km/h)

9.10.3 Zentraler rechtwinkliger Anprall mit 20 km/hAbb. 9-26: Resultierende obere & untere Nackenkraft bei $v_{Fzg} = 19$ km/h ($v_{Radf} = 14$ km/h)Abb. 9-27: Result. oberes & unteres Nackenmoment bei $v_{Fzg} = 19$ km/h ($v_{Radf} = 14$ km/h)

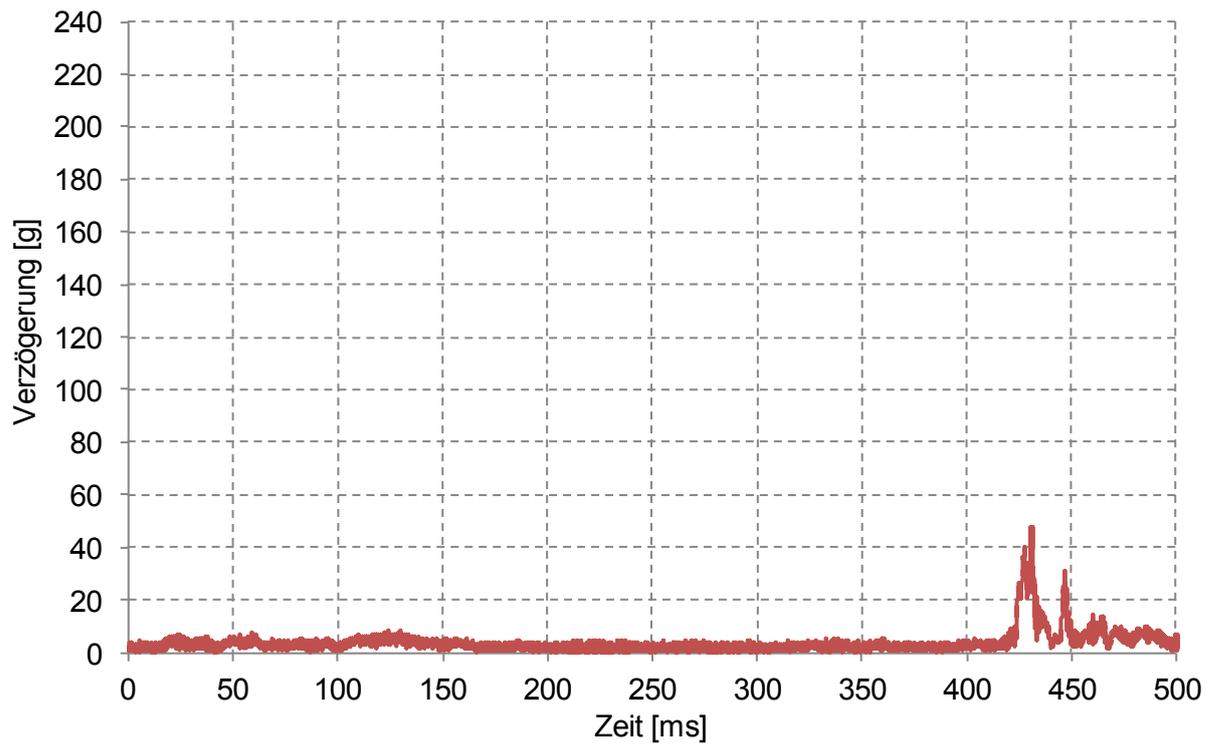


Abb. 9-28: Resultierende Torso-Beschleunigung bei $v_{Fzg} = 19$ km/h ($v_{Radf} = 14$ km/h)

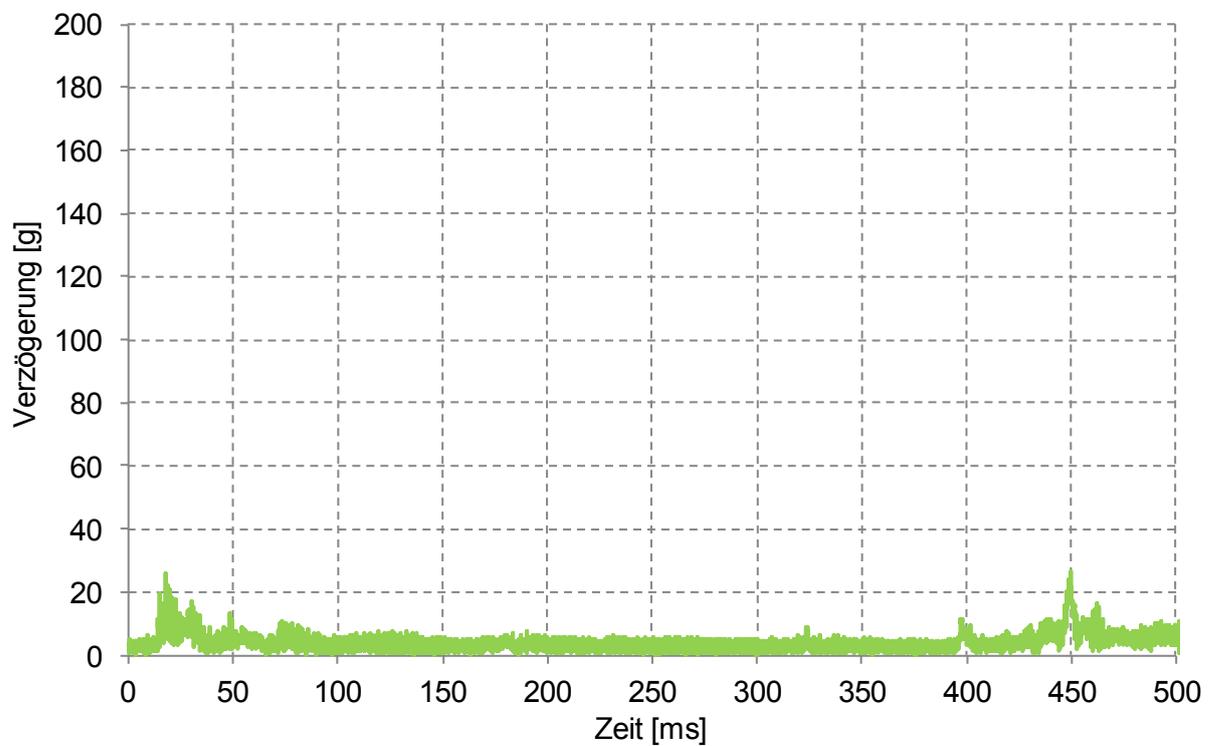


Abb. 9-29: Resultierende Becken-Beschleunigung bei $v_{Fzg} = 19$ km/h ($v_{Radf} = 14$ km/h)



Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.

Wilhelmstraße 43/43G, 10117 Berlin
Postfach 08 02 64, 10002 Berlin

Tel.: 030/20 20 - 50 00, Fax: 030/20 20 - 60 00
www.gdv.de, www.udv.de