Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.

Forschungsbericht Nr. 83

Anforderungen an Schutzeinrichtungen neben der Fahrbahn

Johann Ziegler
Thomas Unger
Florian Spitzhüttl
Axel Malczyk

Unfallforschung der Versicherer
GDV

Forschungsbericht Nr. 83

Anforderungen an Schutzeinrichtungen neben der Fahrbahn

Bearbeitet durch:

Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH
Dipl.-Ing. Johann Ziegler
Dipl.-Ing. Thomas Unger
Dipl.-Ing. Florian Spitzhüttl

Projektleitung bei der UDV:
Dr.-Ing. Axel Malczyk

Unfallforschung der Versicherer
GDV

Impressum

Herausgeber
Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
Unfallforschung der Versicherer

Wilhelmstraße 43 / 43 G, 10117 Berlin
Postfach 08 02 64, 10002 Berlin
Tel. 030 / 20 20 – 50 00, Fax 030 / 20 20 – 60 00

E-Mail: unfallforschung@gdv.de
Internet: www.udv.de
Facebook: www.facebook.com/unfallforschung
Twitter: @unfallforschung
YouTube: www.youtube.com/unfallforschung

Redaktion
Dr.-Ing. Axel Malczyk

Bildnachweise
UDV und siehe Quellenangaben

Erschienen
07/2022

ISBN-Nr.
978-3-948917-14-2

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2
Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis 4
Abbildungsverzeichnis 8
Tabellenverzeichnis 13
Kurzfassung 14
Abstract 16
1. Einleitung 18
2. Recherche zum Stand der Technik 20
2.1. Normen, Richtlinien und Regelwerke 20
2.2. Einteilung von Rückhaltesystemen an Straßen 22
2.3. Leistungsklassen 22
2.3.1. Aufhaltestufe 22
2.3.2. Anprallheftigkeitsstufe 23
2.3.3. Wirkungsbereich 23
2.4. Anprallprüfungen und Prüfverfahren 24
2.5. Einsatzkriterien und einsatzspezifische Anforderungen 25
2.5.1. Allgemeine Anforderungen 25
2.5.2. Gefährdungsstufen und kritische Abstände 25
2.5.3. Anforderungen an das Leistungsvermögen 27
2.5.4. Einsatzfreigabe 27
2.6. Arten von passiven Schutzeinrichtungen 28
3. Analyse von Unfalldaten mit Anprall an Schutzeinrichtungen 30
3.1. Datengrundlage 30
3.1.1. Unfalldatenbanken 30
3.1.2. Straßeninformationsbanken (SIB) 32
3.1.3. Fahrzeugbestand in Deutschland 32
3.2. Relevanz im Verkehrsunfallgeschehen 32
3.2.1. Auswertung der amtlichen Verkehrsunfallstatistik 2020 33
3.2.2. Sonderauswertung der amtlichen Verkehrsunfallstatistik 2016 37
3.2.3. Auswertung der Unfallursachen 43
3.2.4. Analyse von Straßendatenbanken 44
3.3. Anprallkonstellationen von Pkw-Unfällen 49
3.3.1. Grundgesamtheit 49
3.3.2. Anprallkonstellationen 50
3.3.3. Charakteristik der Pkw 53
3.3.4. Arten von PSE-Systemen 55

3.3.5. Unfallfolgen für die Pkw-Insassen ... 57
3.3.6. Schutzwandanprall ... 60
3.3.7. Relevanz von Sonderfällen ... 63
4. Identifikation kritischer Anprallkonstellationen ... 67
4.1. Relevanz im v_k-α-Diagramm ... 69
4.2. Gefährdungsmatrix ... 70
4.3. Auswahl der zu untersuchenden Anprallkonstellationen ... 74
5. Realversuche von Anprallen an Schutzeinrichtungen ... 78
5.1. Anprallversuch 1: Kleinwagen vs. Schutzplanke, 110 km/h, 20° ... 80
5.2. Anprallversuch 2: SUV vs. Schutzplanke, 110 km/h, 20° ... 87
5.3. Anprallversuch 3: Kleinwagen vs. Schutzwand, 110 km/h, 20° ... 94
6. Numerische Simulation von Anprallen an Schutzeinrichtungen ... 103
6.1. Verwendete numerische Modelle und Methoden ... 103
6.1.1. Modell: Fahrzeuge ... 104
6.1.2. Modell: Fahrzeuginnenraum ... 105
6.1.3. Modelle: passive Schutzeinrichtungen ... 109
6.2. Validierung ... 111
6.3. Ergebnisse der Simulationen ... 113
6.4. Vergleich der Ergebnisse aus Realversuch und Simulation ... 125
6.4.1. Anprall an Schutzplanke ... 126
6.4.2. Anprall an Schutzwand ... 127
7. Fazit und Ableitung von Empfehlungen ... 129
7.1. Abdeckung des Unfallgeschehens ... 129
7.2. Einsatz von Simulationsmethoden ... 129
7.3. Fahrzeugspezifikation und Auswirkung auf die Insassenbelastung ... 129
7.4. Fahrzeugspezifikation und Auswirkung auf den geprüften Wirkungsbereich ... 130
7.5. Pkw mit Schutzwandanprall ... 131
7.6. Vergleich zwischen Schutzplanken- und Schutzwandanprall ... 132
7.7. Sonderfälle ... 132
7.8. Weitere Gesichtspunkte zu PSE-Anprallen ... 133
Literaturverzeichnis ... 134
Anhang A – Verletzungsschwere nach Art der Verkehrsbeteiligung ... 138
Anhang B – Unfälle PSE-Anprall nach Straßenklasse ... 141

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

α	Kollisionswinkel / Anprallwinkel
a	Beschleunigung
AIS	Abbreviated Injury Scale
ASI	Index für die Schwere der Beschleunigung
	(engl.: Acceleration Severity Index)
BAB	Bundesautobahn
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BST	Bis Station
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
C	Kontrollierbarkeit
	(engl.: Controllability)
CDC	Collision Deformation Classification
CFC	Channel Frequency Class
COG	Masseschwerpunkt
	(engl.: Centre of Gravity)
CTS	crashtest-service.com GmbH
D_m	Dynamische Durchbiegung
DDSP	Doppelte Distanzschutzplanke
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
E	Exposition / Häufigkeit
	(engl.: Exposure)
EDSP	Einfache Distanzschutzplanke
EDSP BW	Einfache Distanzschutzplanke auf Bauwerk, mit Geländer
ESP	Einfache Schutzplanke
EU	Europäische Union
EUSka	Elektronische Unfalltypensteckkarte
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode

FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FRS	Fahrzeugrückhaltesystem
FVZ	Fahrzeug-Zulassungsverordnung
g	Gefährdung
GDTech	GDTech S.A.
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
Gkfz	Güterkraftfahrzeug
GIDAS	German In-Depth Accident Study
GS	Gefährdungsstufen
h	Relative Häufigkeit
H	Absolute Häufigkeit
HIC	Biomechanisches Schutzkriterium für den Kopfbereich (engl.: Head Injury Criterion)
HWS	Halswirbelsäule
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
LAENGE	Abschnittslänge
Lkw	Lastkraftwagen
LWS	Lendenwirbelsäule
m	Masse
MAIS	Maximum Abbreviated Injury Scale
MKS	Mehrkörpersystem (engl.: MBS – multibody system)
M RepS	Merkblatt für Reparaturen von Fahrzeugrückhaltesystemen im Bestand
Mzr	motorisiertes Zweirad
n	Anzahl
nk_station	Netzknoten Station
NNK	Endnetzknoten
Pkw	Personenkraftwagen
PS	Personenschaden
PSE	Passive Schutzeinrichtung

R	Risiko (engl.: Risk), hier: Insassengefährdung
RAL-RG 620	Kompatible Stahlschutzplankensysteme - Gütesicherung
RPS	Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeugrückhaltesysteme
s	Distanz
S	Schwere (engl.: Severity), hier: Letalität = f(MAIS)
SIB	Straßeninformationsbanken
SUV	Stadtgeländewagen (engl.: Sport Utility Vehicles)
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung
t	Zeit
T	Anprallzeit
TB	Typ der Anprallprüfung
THIV	Theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfs (engl.: Theoretical Head Impact Velocity)
TK FRS	Technische Kriterien für den Einsatz von Fahrzeugrückhaltesystemen in Deutschland
TL BSWF 96	Technische Lieferbedingungen für Betonschutzwand-Fertigteile
TL-SP 99	Technische Lieferbedingungen für Stahlschutzplanken
TL-SPU 93	Technische Lieferbedingungen für Schutzplankenpfostenummantelungen
TLP	Technische Liefer- und Prüfbedingungen
TLP ÜK	Technische Liefer- und Prüfbedingungen für Übergangskonstruktionen zur Verbindung von Schutzeinrichtungen
UDV	Unfallforschung der Versicherer
v	Geschwindigkeit
v_k	Kollisionsgeschwindigkeit / Anprallgeschwindigkeit
v_{zul}	Zulässige Höchstgeschwindigkeit
VI_m	Gemessene Fahrzeugeindringung
VCDI	Index der Verformung des Cockpits (engl.: Vehicle Cockpit Deformation Index)
VNK	Anfangsnetzknoten

vs.	versus
VST	Von Station
VUFO	Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH
VwV-StVO	Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung
W	Wirkungsbereichsklasse
W_m	Gemessener Wirkungsbereich
W_N	Normalisierter Wirkungsbereich
ZTV FRS	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Fahrzeugrückhaltesysteme
ZTV-PS	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für passive Schutzeinrichtungen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Kritische Abstände für Straßen mit v_{zul} = 80 km/h bis 100 km/h [9] 26

Abbildung 2-2: Einsatzkriterien für Schutzeinrichtungen am äußeren Fahrbahnrand [9] 26

Abbildung 2-3: Profilarten bei Stahlschutzplanken (li.: A-Profil | re.: B-Profil) 28

Abbildung 2-4: Profile von Betonschutzwänden (li.: New Jersey-Profil | re.: Step-Profil) 29

Abbildung 3-1: Verkehrsunfallzahlen in Deutschland für das Unfalljahr 2019 33

Abbildung 3-2: Verkehrsunfallzahlen in Deutschland für das Unfalljahr 2020 34

Abbildung 3-3: Entwicklung der Unfälle mit Personenschaden nach Art der Objektkollision 2011-2020) 35

Abbildung 3-4: Verletzungsschweren in Verkehrsunfällen 2020 35

Abbildung 3-5: Arten der Krafteinleitung (li: punktuell (Baumanprall), re: flächig (PSE-Anprall)) 36

Abbildung 3-6: Verletzungsschwere von Verunglückten mit PSE-Anprall (2011-2020) 36

Abbildung 3-7: Verkehrsunfallgeschehen mit Personenschaden nach Ortslage,2020 37

Abbildung 3-8: Unfälle mit PSE-Anprall nach Verkehrsbeteiligungsart und Ortslage, 2016 38

Abbildung 3-9: Verletzungsschwere nach Art der Verkehrsbeteiligung, 2016 38

Abbildung 3-10: PSE-Anprall nach Anzahl der Beteiligten (oben) und nach Verkehrsbeteiligungsart verursachten Unfälle (unten), 2016 39

Abbildung 3-11: Verletzungsschwere von verunglückten Personen im Alleinunfall, 2016 41

Abbildung 3-12: Unfälle mit Personenschaden nach Unfalltyp, 2016 42

Abbildung 3-13: Unfälle mit Personenschaden nach Unfallart, 2016 42

Abbildung 3-14: Hauptunfallursachen von PSE Unfällen (vollständig dokumentierte GIDAS Unfälle seit 2005) 43

Abbildung 3-15: Methodik zur Analyse von Straßendatenbanken 44

Abbildung 3-16: PSE-Systeme nach Straßenklasse 46

Abbildung 3-17: Unfallstellen mit PSE-Information nach Straßenklasse und Art 46

Abbildung 3-18: PSE-Systeme in Unfällen nach Straßenklasse 47

Abbildung 3-19: Unfälle mit Objektkollision 47

Abbildung 3-20: Unfälle mit PSE-Anprall nach Art der PSE* und Unfallkategorie** 48

Abbildung 3-21: Auswahlkriterien der PSE-Unfälle in GIDAS 49

Abbildung 3-22: Anzahl an Unfällen, Fahrzeugen, Kollisionen in GIDAS 49

Abbildung 3-23: Richtung des wirkenden Stoßimpulses (CDC1-2) 50

Abbildung 3-24: Anprallseite am Pkw (CDC3) 51
Abbildung 3-25: Verteilung des Kollisionswinkels 52
Abbildung 3-26: Verteilung des Kollisionsgeschwindigkeit 52
Abbildung 3-27: Verteilung der Pkw-Klassen mit PSE-Anprall 53
Abbildung 3-28: Entwicklung des Pkw-Bestandes in Deutschland nach Segment 53
Abbildung 3-29: Entwicklung der durchschnittlichen Pkw-Leermasse von Neuwagen 54
Abbildung 3-30: Gesamtmasse der Pkw bei PSE-Anprallen 54
Abbildung 3-31: Arten von Schutzeinrichtungen bei Pkw-Anprall in GIDAS 55
Abbildung 3-32: Art und Abstand der Schutzplankenpfosten 56
Abbildung 3-33: Verteilung der Einbauhöhe von PSE-Systemen (Fahrbahn bis PSE-Oberkante) 56
Abbildung 3-34: Verteilung der Unfälle mit Schutzwandanprall nach Art des Profils 56
Abbildung 3-35: Verletzungsschwere der Pkw-Insassen 57
Abbildung 3-36: Verletzungsschweren von Pkw-Insassen (MAIS) 58
Abbildung 3-37: Verletzungsschweren (MAIS) auf verschiedenen Sitzplätzen 59
Abbildung 3-38: Verletzungsübersicht (ohne Differenzierung nach Verletzungsschwere) nach Körperregionen und Sitzplatz 59
Abbildung 3-39: Anteil der Erstkollisionen an Schutzplanke und Schutzwand mit Überschlag als Folge 60
Abbildung 3-40: Verteilung der Erstkollisionen an Schutzwänden nach Art des Profils und Überschlag (li.: GIDAS | re.: UDB) 61
Abbildung 3-41: Merkmale von Pkw-Erstkollision an eine Schutzwand (GIDAS) 61
Abbildung 3-42: Richtung des wirkenden Stoßimpulses bei Erstkollision mit der Schutzwand (CDC1-2) 62
Abbildung 3-43: Max. Verletzungsschwere aller Insassen nach Art des Anpralles und Überschlag 62
Abbildung 3-44: Relevanz von Sonderfällen bei Pkw-PSE-Anprallen 63
Abbildung 3-45: Beispiel eines Auffahrens / Überfahrens mit anschließendem Überschlag 64
Abbildung 3-46: Verletzungsschwere der Pkw-Insassen 64
Abbildung 3-47: Verletzungsschweren der Pkw-Insassen in den Sonderfällen 65
Abbildung 3-48: Beispiel einer realen Unfallstelle mit Auffahren auf eine PSE 65
Abbildung 3-49: Verletzungsschwere auf Autobahnen (links) und Außerortsstraßen (rechts) 66
Abbildung 3-50: Schematische Ansicht einer zu kurzen PSE 66

Abbildung 4-1: Prüfkonfigurationen für Pkw nach DIN EN 1317 im v_k-α-Diagramm 67
Abbildung 4-2: Massegruppen und deren Häufigkeit im Unfallgeschehen 68
Abbildung 4-3: Häufigkeitsmatrix h (m, v_k, α) – aller Unfälle mit PSE-Anprall 69
Abbildung 4-4: Letalität in Verkehrsunfällen [33] 70
Abbildung 4-5: Häufigkeitsmatrix h (m, v_k, α) – Massegruppe I 71
Abbildung 4-6: Gefährdungsmatrix g (m, v_k, α, Letalität) – Massegruppe I 71
Abbildung 4-7: Häufigkeitsmatrix h (m, v_k, α) – Massegruppe II 72
Abbildung 4-8: Gefährdungsmatrix g (m, v_k, α, Letalität) – Massegruppe II 72
Abbildung 4-9: Häufigkeitsmatrix h (m, v_k, α) – Massegruppe III 72
Abbildung 4-10: Gefährdungsmatrix g (m, v_k, α, Letalität) – Massegruppe III 72
Abbildung 4-11: Häufigkeitsmatrix h (m, v_k, α) – Massegruppe IV 73
Abbildung 4-12: Gefährdungsmatrix g (m, v_k, α, Letalität) – Massegruppe IV 73
Abbildung 4-13: Auswahl der Anprallkonstellationen für Simulation und Realversuch 1 74
Abbildung 4-14: Auswahl der Anprallkonstellationen für Simulation und Realversuch 2 75
Abbildung 5-1: Prüfgelände 79
Abbildung 5-2: Anprallversuch 1 – Fahrzeugbeschleunigung, Messstelle Mitteltunnel 81
Abbildung 5-3: Anprallversuch 1 – Kopfbeschleunigung 81
Abbildung 5-4: Anprallversuch 1 – Kopfbeschleunigung – 3-ms-Maximum 82
Abbildung 5-5: Anprallversuch 1 – Brustbeschleunigung 82
Abbildung 5-6: Anprallversuch 1 – Brustbeschleunigung – 3-ms-Maximum 83
Abbildung 5-7: Anprallversuch 1 – Beckenbeschleunigung 83
Abbildung 5-8: Anprallversuch 1 – Beckenbeschleunigung – 3-ms-Maximum 84
Abbildung 5-9: Anprallversuch 1 – Bildsequenz (0 ms bis 1225 ms) 85
Abbildung 5-10: Anprallversuch 1 – Bildsequenz – OnBoard (0 ms bis 1225 ms) 86
Abbildung 5-11: Anprallversuch 2 – Fahrzeugbeschleunigung, Messstelle Mitteltunnel 88
Abbildung 5-12: Anprallversuch 2 – Kopfbeschleunigung 88
Abbildung 5-13: Anprallversuch 2 – Kopfbeschleunigung – 3-ms-Maximum 89
Abbildung 5-14: Anprallversuch 2 – Brustbeschleunigung 89
Abbildung 5-15: Anprallversuch 2 – Brustbeschleunigung – 3-ms-Maximum 90
Abbildung 5-16: Anprallversuch 2 – Beckenbeschleunigung 90

Abbildung 5-17: Anprallversuch 2 – Beckenbeschleunigung – 3-ms-Maximum 91

Abbildung 5-18: Anprallversuch 2 – Bildsequenz (0 ms bis 1225 ms) 92

Abbildung 5-19: Anprallversuch 2 – Bildsequenz – OnBoard (0 ms bis 1225 ms) 93

Abbildung 5-20: Prüffahrzeug und Kontaktspuren am Anprallort 95

Abbildung 5-21: Anprallversuch 3 – Fahrzeugbeschleunigung, Messstelle Mitteltunnel 96

Abbildung 5-22: Anprallversuch 3 – Kopfbeschleunigung 96

Abbildung 5-23: Anprallversuch 3 – Kopfbeschleunigung – 3-ms-Maximum 97

Abbildung 5-24: Anprallversuch 3 – Brustbeschleunigung 97

Abbildung 5-25: Anprallversuch 3 – Brustbeschleunigung – 3-ms-Maximum 98

Abbildung 5-26: Anprallversuch 3 – Beckenbeschleunigung 98

Abbildung 5-27: Anprallversuch 3 – Beckenbeschleunigung – 3-ms-Maximum 99

Abbildung 5-28: Anprallversuch 3 – Beckenbeschleunigung – 3-ms-Maximum 99

Abbildung 5-29: Anprallversuch 3 – Bildsequenz (0 ms bis 1225 ms) 101

Abbildung 5-30: Anprallversuch 3 – Bildsequenz – OnBoard (0 ms bis 1225 ms) 102

Abbildung 6-1: Numerisches Fahrzeugmodell "Kleinwagen" 104

Abbildung 6-2: Numerisches Fahrzeugmodell "Schweres Fahrzeug" 104

Abbildung 6-3: Modell des Innenraums für die Insassensimulation 105

Abbildung 6-4: Modell der Sitze und des Gurtes für die numerische Simulation 106

Abbildung 6-5: Numerisches Dummy-Modell für die Simulation der Insassenbelastungen 106

Abbildung 6-6: Generischer Innenraum, Sitz, Gurt und Insasse im zusammengesetzten Zustand 107

Abbildung 6-7: Aufrechte Sitzposition des Hybrid III Dummys 107

Abbildung 6-8: Position des HIII Dummys im generischen Fahrzeuginnenraum 108

Abbildung 6-9: Abmessungen des numerischen Modells der Stahlschutzplanke 109

Abbildung 6-10: Numerisches Modell der eingebauten „verstärkten“ Stahlschutzplanke 110

Abbildung 6-11: modellierte Schutzwandsysteme aus Beton (li.: New Jersey 81 | re.: aktuelles Profil) 111

Abbildung 6-12: Numerische Simulation – zeitliche Abfolge – analog zu den Realversuchen 1 und 2 (li.: Simulationslauf Nr. 2; re.: Simulationslauf Nr. 6) 114

Abbildung 6-13: Numerische Simulation – zeitliche Abfolge (li.: Simulationslauf Nr. 8; re.: Simulationslauf Nr. 9) 115

Abbildung 6-14: Verlauf der resultierenden Kopfbeschleunigung für den Simulationslauf Nr.2a . 116

Abbildung 6-15: Verlauf der resultierenden Brustbeschleunigung für den Simulationslauf Nr.2a 116

Abbildung 6-16: Verlauf der resultierenden Beckenbeschleunigung für den Simulations-
lauf Nr. 2a..... ..117

Abbildung 6-17: Zusammenhang zwischen ASI und Dummy-Beschleunigungsbelastungen..... 118

Abbildung 6-18: Zusammenhang zwischen THIV und Dummy-Beschleunigungsbelastungen 118

Abbildung 6-19: Zusammenhang zwischen HIC 15 und THIV und ASI 119

Abbildung 6-20:Verlauf der resultierenden Kopfbeschleunigung für den Simulationslauf Nr.12a121

Abbildung 6-21:Verlauf der resultierenden Brustbeschleunigung für den
Simulationslauf..Nr. 12a..... 121

Abbildung 6-22: Verlauf der resultierenden Beckenbeschleunigung für den
Simulationslauf Nr. 12a..... 122

Abbildung 6-23: „Kleinwagen vs. New Jersey 81“ von 0 ms bis 875 ms nach dem
Anprall (Simulationslauf Nr. 12)..... 122

Abbildung 6-24: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Variation des Schutzwandprofils von
0 ms bis 875 ms nach dem Anprall (Simulationslauf Nr. 12 vs. Simulationslauf Nr. 13) 123

Abbildung 6-25: Vergleich der Fahrzeugkinematik für drei Anprallkonstellationen gegen
die Schutzwand von 0 ms bis 525 ms nach dem Anprall 124

Abbildung 7-1: Leistungsvermögen einer ESP [39] 130

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Arten der Verkehrsbeteiligung 37

Tabelle 3-2: Überblick zu Mehrfachnennungen von PSE pro Unfall 45

Tabelle 3-3: Verletzungsschweren nach AIS-Werten 57

Tabelle 4-1: Massegruppen auf Basis der Perzentilfestlegung 68

Tabelle 4-2: Anprallkonstellationen für die Simulationen und Realversuche 76

Tabelle 5-1: Fahrzeugvorbereitung, Versuchsausstattung, Messtechnik 78

Tabelle 5-2: Versuchsbedingungen Anprallversuch 1 80

Tabelle 5-3: Versuchsergebnisse Anprallversuch 1 80

Tabelle 5-4: Versuchsbedingungen Anprallversuch 2 87

Tabelle 5-5: Versuchsergebnisse Anprallversuch 2 87

Tabelle 5-6: Versuchsbedingungen Anprallversuch 3 94

Tabelle 5-7: Versuchsergebnisse Anprallversuch 3 95

Tabelle 6-1: Vergleich von Simulation und Anprallversuch 1 – Kleinwagen vs. Schutzplanke 112

Tabelle 6-2: Vergleich von Simulation und Anprallversuch 2 – SUV vs. Schutzplanke 112

Tabelle 6-3: Vergleich von Simulation und Anprallversuch 3 – Kleinwagen vs. Schutzwand 113

Tabelle 6-4: Ergebnisse aus den numerischen Simulationen 117

Tabelle 6-5: Vergleich von Realversuch und Simulation für die Dummy-Messwerte 120

Tabelle 6-6: Ergebnisse aus der numerischen Simulation zu Schutzwandanprallen 123

Tabelle 6-7: Tendenz für Insassenbelastungen bei Variation von Schutzwandprofil, Anprallwinkel und -geschwindigkeit 125

Tabelle 6-8:Ergebnisse der Anprallversuche und Vergleich zur Simulation und DIN EN 1317 ... 126

Tabelle 6-9: Ergebnisse des Schutzwandanpralles und Vergleich zur Simulation und DIN EN 1317 128

Kurzfassung

„Passive Schutzeinrichtungen“ (PSE) neben der Fahrbahn sind „Fahrzeugrückhaltesysteme“ (FRS), die bei einem Kontrollverlust das Abkommen eines Fahrzeugs von der Fahrbahn verhindern. Dadurch sollen sie vor Kollisionen mit Objekten neben der Fahrbahn oder mit entgegenkommenden Fahrzeugen auf baulich getrennten Fahrbahnen schützen. Die DIN EN 1317 regelt in Deutschland Prüfverfahren und Abnahmekriterien für die Anprallprüfung zur Zulassung von PSE. Für Pkw beinhaltet die Norm dabei die Anprallprüfungen TB11, TB31 und TB32 (zusätzlich TB21 und TB22 für den Einsatz in Arbeitsbereichen), welche als zentrale Parameter die Anprallgeschwindigkeit, den Anprallwinkel und die Fahrzeugmasse definieren. Ihre Wirkung auf die Insassen wird durch den Index für die Schwere der Beschleunigung (ASI) und die Theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfs (THIV) bewertet. Außerdem wird neben weiteren Messgrößen die Wirkungsbereichsklasse (W) bestimmt, um die Durchbiegung des Rückhaltesystems bei anprallendem Fahrzeug zu bewerten.

Um festzustellen, wie gut die Parameter der Anprallprüfungen nach DIN EN 1317 das Verkehrsunfallgeschehen abdecken, ob sie ihr Potenzial bei Kollisionen mit modernen Pkw ausschöpfen und welchen Einfluss eine sich verändernde Fahrzeugflotte darauf hat, werden Anpralle von Pkw gegen PSE untersucht. Dazu werden Datenanalysen der deutschen Unfallstatistik, polizeilicher Unfalldaten (EUSka), In-Depth Unfalldaten (GIDAS), Straßenausstattungsdatenbanken (SIB) und des Fahrzeugbestandes in Deutschland durchgeführt. Anprallkonstellationen, die eine hohe Insassengefährdung zeigen, werden mithilfe von Finite Element-Modellen in Fahrzeug- und Insassensimulationen untersucht. Außerdem werden drei reale Anprallversuche (2 gegen Schutzplanke, 1 gegen Schutzwand) unter Verwendung eines Crashtest-Dummys auf dem Fahrersitz durchgeführt. Dadurch können die gemessenen Insassenbelastungswerte mit den in der Norm vorgeschriebenen Werten verglichen und eingeordnet werden. Die Untersuchungen betrachten vorwiegend Schutzplankensysteme, aber auch Schutzwandsysteme. Die Unfalldatenanalysen zeigen, dass Betonschutzwände eine deutlich geringere Verbaurate und Unfallzahlen in den Erhebungsgebieten in Deutschland aufweisen als Schutzplanken.

Die Ergebnisse der Unfalldatenanalysen belegen, dass die Anprallprüfungen nach DIN EN 1317 die Konstellationen im Unfallgeschehen mit der größten Häufigkeit und mit der größten Insassengefährdung im Bereich großer Parameterwerte (Kollisionsgeschwindigkeit und Kollisionswinkel) sehr gut repräsentieren. Die sowohl in der Simulation als auch bei realen Anprallversuchen ermittelten Werte der Insassenbelastung für Schutzplankenanpralle sind mit modernen Fahrzeugen auch bei großem Energieeintrag unkritisch. Der Anprall an eine Schutzwand zeigt hingegen bei sonst gleichen Anprallbedingungen eine stärkere Fahrzeugdeformation, höhere Insassenbelastungen und eine erhöhte Überschlagsneigung vor allem bei leichteren Fahrzeugen. Wie sich diese Werte beim Anprall gegen einen Schutzplanke mit vergleichbar hoher Aufhaltestufe wie eine Schutzwand (z.B. Super-Rail) darstellen würden, lässt sich im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts nicht beantworten. Prinzipiell leisten PSE aber einen positiven Beitrag zur allgemeinen Verkehrssicherheit.

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen haben gezeigt, dass es möglich ist, die Schutzwirkung von PSE und die beim Anprall entstehenden Belastungen mithilfe numerischer Methoden abzuschätzen. Der Einsatz von Simulationen in Kombination mit realen Anprallversuchen an geeigneten Stützstellen für die Zulassung einer PSE würde es erlauben, ein breiteres Spektrum an Anprallszenarien abzuprüfen als aktuell in der DIN festgelegt ist, ohne weitere teure Anprallversuche durchführen zu müssen. Der zusätzliche Einsatz simulativer Prüfungen nach dem Vorbild der Anprallprüfungen im Euro NCAP-Protokoll zum Fußgängerschutz ist hierbei denkbar. So ließen sich Bedenken hinsichtlich einer Punktoptimierung eines Systems auf die DIN-Anprallprüfungen wirksam begegnen. Darüber hinaus wäre es damit möglich, flexibler auf Herausforderungen durch eine sich verändernden Fahrzeugflotte zu reagieren.

Für die Fahrzeugspezifikation schreibt die aktuelle Norm für alle Anprallprüfungen als zentralen Parameter lediglich die Fahrzeugmasse innerhalb geringer Toleranzen vor. Insbesondere Fahrzeuge mit einer Fahrzeugmasse von etwa 900 kg, wie sie für einige Zulassungstests spezifiziert werden, werden mittlerweile kaum noch angeboten, was sich auch im Unfallgeschehen widerspiegelt. Bei Anprallprüfungen zur Zulassung von PSE müssen daher regelmäßig sehr alte Fahrzeuge verwendet werden. Aus Kostengründen werden für Fahrzeuge mit einer vorgeschriebenen Fahrzeugmasse von 1.500 kg ebenfalls oft ältere Modelle eingesetzt. Der Vergleich der Untersuchungsergebnisse der Simulation und der Anprallversuche zeigt, dass moderne Fahrzeuge zusätzliches Potential besitzen, die Insassenbelastung auch bei härteren Anprallen auf ein erträgliches Maß zu reduzieren und das Verletzungsrisiko zu minimieren. Allein mit der Messung der Beschleunigungen am Fahrzeugschwerpunkt und der Berechnung des Acceleration Severity Index (ASI) wird der Effekt moderner Insassenschutzsysteme auf die resultierende Insassenbelastung nicht ausreichend berücksichtigt.

Fahrzeuge mit großer Masse (> 1.500 kg) sind nicht in den Anprallprüfungen nach DIN EN 1317 repräsentiert. Diese Gruppe zeigt im ausgewerteten Unfallmaterial keine erhöhten Werte bezüglich der Insassengefährdung, führt allerdings aufgrund des größeren Energieeintrages in die PSE zu größeren Wirkungsbereichen, also Durchbiegungen, von Schutzplanken als in der vorgeschriebenen TB32 Anprallprüfung mit 1.500 kg. Dies ist kritisch zu beurteilen, wenn dadurch kein ausreichender Abstand zu Objekten im Seitenraum mehr gewährleistet werden kann und ein „Durchschlagen“ gegen feste Strukturen wie Bäume oder Widerlager zu befürchten ist. Der Vergleich des ermittelten Wirkungsbereichs von 1,57 m beim Anprallversuch mit einem SUV (m = 2.100 kg) mit den Zulassungswerten für einen TB32 Test (m = 1.500 kg) zeigt eine Überschreitung um fast 60 cm.

Die Versuche und Simulationen haben gezeigt, dass neuere Fahrzeuge ein hohes Schutzniveau für ihre Insassen aufweisen und höhere Anprallkräfte und -beschleunigungen verkraften als die in Abnahmetests zumeist verwendeten alten Fahrzeugmodelle. Gerade bei größeren Fahrzeugen liegen die Werte der Insassenbelastung auf sehr niedrigem Niveau. Dies eröffnet Möglichkeiten, steifere Schutzplanken an Standorten einzusetzen, wo eine geringe Durchbiegung der Schutzeinrichtung wünschenswert wäre, um das „Durchschlagen“ gegen ein Objekt (bspw. Masten, Bäume) unmittelbar hinter der Schutzplanke zu verhindern.

Die Betrachtung der Entwicklung der durchschnittlichen Pkw-Leermasse von Neuwagen lässt darüber hinaus erwarten, dass sich das zukünftige Unfallgeschehen weiter in die Richtung schwererer Fahrzeuge verschiebt. Durch die Einführung von Prüfungen mit größeren Fahrzeugen, wie sie bereits in anderen Prüfvorschriften enthalten sind (zum Beispiel in der amerikanischen MASH mit 2270 ± 50 kg), könnte die aktuelle Fahrzeugflotte im Unfallgeschehen besser repräsentiert und eine mögliche Unterbewertung des Wirkungsbereichs adressiert werden.

Abstract

Vehicle Restraint Systems (VRS, German: FRS - Fahrzeugrückhaltesysteme) are designed to protect vehicles from leaving the road in loss of control events. Thereby, they shall protect against collisions with objects next to the road or with oncoming vehicles on separated lanes. In Germany, DIN EN 1317 defines test procedures and approval criteria for impact tests of VRS. For passenger cars, the norm includes the impact tests TB11, TB31 and TB32 (additionally, TB21 and TB22 for use in road work areas), which define the impact speed, the impact angle, and the vehicle mass as central parameters. The parameters Acceleration Severity Index (ASI) and Theoretical Head Impact Velocity (THIV) are intended for evaluation of the occupant loadings. In addition to other parameters, the class of the effective range (W) is defined to evaluate the deformation of the VRS.

Impacts of passenger cars against VRS are studied in the course of the present project to determine whether the impact test parameters according to DIN EN 1317 cover different traffic accident scenarios, whether they exploit their potential in collisions with modern passenger cars and the effects of a changing vehicle fleet. For this purpose, data analyses of German national accident statistics, police accident data (EUSka), data from German In-Depth Accident Study (GIDAS), infrastructure databases (SIB), and the vehicle population in Germany are carried out. Impact scenarios that show high occupant injury risk are investigated in detail by finite element models in vehicle simulations and occupant simulations. In addition, three real crash tests (2 vs. guard rails, 1 vs. concrete barrier) are performed with a crash test dummy in the driver´s seat. This enables the assessment of occupant loading values and their comparison with the criteria prescribed in the norm. The analyses consider steel crash barrier systems as well as concrete barriers. Accident data analysis shows that concrete barriers have a significantly lower installation rates and are therefore less frequently found than guard rails in accidents in the German investigation areas,

The results of the accident analyses prove that the impact tests according to DIN EN 1317 represent the collision scenarios (collision speed and collision angle) with the highest frequency and with the highest risk of occupant injury very well. Despite high energy input, the occupant load values for guard rail remain uncritical in both real impact tests and numerical simulation with modern vehicles. In contrast, a concrete barrier impact under the same impact conditions as the guard rail test leads to more vehicle deformation, higher occupant loads and an increased tendency for rollover, especially for smaller and lighter vehicles. How these values would present themselves in the case of an impact against a guard rail (e.g., Super-Rail) with a comparably high containment level like that of a concrete barrier cannot be answered within the scope of the present research project. Nevertheless, VRS make a positive contribution to traffic safety, in general.

The results of the numerical simulations show that it is possible to estimate the safety effect of VRS and the loadings sustained during impact by simulation. The use of simulation in combination with real impact tests at suitable grid points for the approval of a VRS would make it possible to test a wider range of impact scenarios than currently specified in DIN. This could be done without adding expensive impact tests and would enable the possibility to react more flexible to the challenges of a changing vehicle fleet.

Regarding vehicle specification, the current norm prescribes merely the vehicle mass within small tolerances as the central parameter for all impact tests. Vehicles with a mass of around 900 kg, as specified for some compliance tests, are hardly available on the market, nor are they found in larger numbers in accident scenarios. Commonly, old vehicles are used for impact tests. For cost reasons, older models are also often used for vehicles with a prescribed vehicle mass of 1,500 kg. A comparison of the results of numerical simulation and impact tests shows that modern vehicles have additional potential to reduce the occupant loadings to a tolerable level and to minimize the injury risk. This is also true in the case of severe impacts. The effect of modern occupant protection systems

on the resulting occupant load is not sufficiently reflected by measuring acceleration at the vehicle's center of gravity and calculating the Acceleration Severity Index (ASI) alone.

Vehicles with a large mass (> 1,500 kg) are not represented in impact tests according to DIN EN 1317. This part of the fleet does not show increased values in accident data with regard to occupant injury risk, but due to the higher energy input into the VRS, it leads to larger impact ranges than the TB32 impact test with 1,500 kg of mass. This results in larger guard rail deformation and thus in a larger effective range (W) than those tested in the prescribed impact tests. This is critical if it means that sufficient distance to objects next to the roadway can no longer be guaranteed and increases the risk "bottoming-out" against solid structures such as trees or abutments. The comparison of the effective range of 1.57 m determined in the impact test with an SUV (m = 2,100 kg) with the approval values for a TB32 test (m = 1,500 kg) shows an excess of nearly 60 cm.

The tests and simulations have shown that newer vehicles have a high level of safety for the protection of their occupants and can withstand higher impact forces and accelerations than most vehicle models used in acceptance tests. This opens up opportunities to use stiffer VRS to reduce their deformation and thus their effective range and to achieve higher resistance against running over or breaking through a barrier.

Furthermore, increasing average curb masses of new cars over the years suggest that future accident scenarios will see typically heavier vehicles. The introduction of tests with large vehicles, like already included in other test regulations (e.g., in American MASH with 2,270 ± 50 kg), could better reflect the development of the vehicle fleet in the accident field and address a possible underestimation of the effective range of steel barriers under impact conditions.

1. Einleitung

„Passive Schutzeinrichtungen“ (PSE) neben der Fahrbahn sind „Fahrzeugrückhaltesysteme“ (FRS), die das Abkommen von der Fahrbahn bei einem Kontrollverlust verhindern und damit vor Kollisionen mit Objekten neben der Fahrbahn oder mit entgegenkommenden Fahrzeugen auf baulich getrennten Fahrbahnen schützen sollen. Im Allgemeinen existieren zwei wichtige Konstruktionen dieser Schutzeinrichtungen: Schutzplanken und Schutzwände. Schutzplanken haben den Vorteil, dass sie beim Anprall Stoßenergie aufnehmen. Sie stellen auf Außerortsstraßen und Autobahnen in Deutschland die am häufigsten eingesetzte Schutzeinrichtung dar. Schutzwände aus Beton haben in der Regel eine höhere Aufhaltewirkung und werden beispielsweise zum Schutz gegen das Durchbrechen von Fahrzeugen mit großer Masse eingesetzt. Häufig kommen Betonschutzwände in Bereichen zum Einsatz, in denen ein besonders hoher Schutz bei nur geringem verfügbarem Bauraum wichtig ist (zum Beispiel vor Brückenwiderlagern, Pfeilern). Darüber hinaus gibt es weitere Systeme wie Spannseilsysteme, Erdwälle, wassergefüllte Barrieren, die aber seltener zum Einsatz kommen oder andere Interessen als die Fahrzeugrückhaltung (z.B. Lärmschutz) in den Vordergrund stellen. Die Anforderungen für den Einsatz, Aufbau und die notwendigen Testverfahren sind in entsprechenden Regelwerken festgelegt. Wie bei allen Systemen, die Realtests unterzogen werden – hier in erster Linie Anprallprüfungen – finden dabei nur ausgewählte Szenarien Berücksichtigung, die hinsichtlich Fahrzeugmasse, Anprallwinkel und -geschwindigkeit definiert werden. Diese Tests werden seit einigen Jahren nach identischen Vorgaben der DIN EN 1317 durchgeführt und sind somit untereinander vergleichbar. Jedoch gab es bisher keine Anpassungen, wie zum Beispiel an die mittlerweile veränderte Fahrzeugflotte.

Es ist anzunehmen, dass PSE in Anprallsituationen, die den Testkonfigurationen stark ähneln, die geforderte oder sogar eine höhere Wirksamkeit erreichen. Unfalldaten zeigen allerdings auch, dass Anprallkonstellationen existieren, in denen Schutzeinrichtungen eine geringe Schutzwirkung entfalten oder sogar nachteilige Effekte für den Pkw und seine Insassen hervorrufen können. Dies zeigt sich besonders in Sonderfällen wie dem Unterfahren oder dem Auffahren auf eine PSE. Es stellen sich daher die Fragen, was PSE über die geforderten Anforderungen hinaus leisten können, wie gut die Tests nach DIN EN 1317 das aktuelle Unfallgeschehen abdecken und ob veränderte Bedingungen, wie ein Wandel der Eigenschaften in der aktuellen Fahrzeuggeneration (höhere Massen, höhere Steifigkeiten, veränderte Frontstrukturen, Kompatibilität), ihre Wirksamkeit beeinflussen. Außerdem gilt es zu untersuchen, welche Sonderfälle über die getesteten Kriterien hinaus existieren und wie relevant diese im Unfallgeschehen sind.

Ziel des Projektes ist es, anhand von Unfalldatenanalysen, physischen Tests und numerischen Simulationen zu untersuchen, ob heutige Schutzeinrichtungen ihr volles Potenzial bei Kollisionen mit modernen Pkw ausschöpfen und inwiefern Verbesserungsmöglichkeiten existieren. Eine Betrachtung von Lkw- und Motorradanprallen, Sonderfällen oder anderen Konstellationen wird dabei am Rande durchgeführt, aber nicht weiter vertieft.

Die Untersuchungen zu den Anforderungen an Schutzeinrichtungen neben der Fahrbahn sind aufgeteilt auf zwei Projekte, welche nacheinander bearbeitet werden. Das Hauptaugenmerk des ersten Projektes (Projektlaufzeit: 08/2017 bis 10/2019) liegt auf den Schutzplanken. Um die aufgezeigten Fragestellungen zu beantworten, werden zuerst Vorbetrachtungen zu verfügbaren Systemen, Testkonfigurationen, Normen, Einsatzrichtlinien und aktuellen Entwicklungen sowie Diskussionen durchgeführt. Anschließend wird in einer Analyse von Unfalldaten ermittelt, welche Charakteristika Unfälle mit PSE-Anprall zeigen und welche Unfall- und Verletzungsschweren dabei entstehen. Es folgt die Identifikation kritischer Anprallkonstellationen, welche dann mithilfe numerischer Finite-Element-Simulationen untersucht werden. Dadurch kann der Einfluss verschiedener Parameter (Anprallwinkel, -geschwindigkeit, sowie Fahrzeugmodell und -masse) simulativ evaluiert werden. Basierend auf den Ergebnissen der Unfalldatenanalyse und den Finite-Element-Simulationen diverser

Anprallkonfigurationen werden zwei ausgewählte Stützstellen mit Schutzplankenanprall definiert, die anschließend im realen Anprallversuch nachgestellt werden.

Dem abgeschlossenen Schutzplankenprojekt schließt sich das zweite Projekt (Projektlaufzeit: 02/2021 bis 01/2022) mit Fokus auf die Schutzwände an. Aus den vorangegangenen Untersuchungen geht hervor, dass sich die Fahrzeugkinematik beim Anprall gegen eine Schutzwand von jener beim Anprall an eine Schutzplanke unterscheidet. So erhöht sich beispielsweise die Überschlagsneigung bei Pkw-Anprallen an Schutzwänden.

Im Rahmen des Schutzwandprojektes werden die wichtigsten Ergebnisse aus dem Vorgängerprojekt mit den aktuellen zur Verfügung stehenden Unfallkennzahlen aktualisiert. Parallel erfolgt ein Realversuch mit Schutzwandanprall. Auf Basis dieses Versuches werden weitere Finite-Element-Simulationen mit unterschiedlichen Anprallkonstellationen und eine Variation des Schutzwandprofils durchgeführt. Der Anprallversuch als auch die Simulationen werden so geplant, dass eine Vergleichbarkeit der Methodik zu bereits erfolgten Versuchen gegeben ist.

Abschließend werden die Erkenntnisse beider Projekte zusammengetragen, bewertet und Empfehlungen abgeleitet.

Projektteam und Aufgaben

Hauptauftragnehmer für die Projektdurchführung und -koordination zwischen den Partnern ist die **Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH (VUFO)**. Die Analyse der Straßendatenbanken im Rahmen der Auswertung von Realunfällen wird gemeinsam mit dem Unterauftragnehmer **TU Dresden, Lehrstuhl Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen** bearbeitet. Die numerischen Simulationen werden durch den Unterauftragnehmer **GDTech** in Belgien durchgeführt. Die Anprallversuche mit Fahrzeugen gegen passive Schutzeinrichtungen und die Aufbereitung ihrer Messdaten erfolgen beim Unterauftragnehmer **crashtest-service.com GmbH (CTS)** in Münster.

Während der Projektlaufzeit findet ein kontinuierlicher fachlicher Austausch mit der **Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** statt.

2. Recherche zum Stand der Technik

2.1. Normen, Richtlinien und Regelwerke

Für Schutzeinrichtungen neben der Fahrbahn gibt es verschiedene Normen, Richtlinien und Regelwerke, in denen Begriffsdefinitionen, Anforderungen und Prüfverfahren sowie einige weitere Festlegungen getroffen werden. Darüber hinaus gibt es eine Arbeitsgruppe im Arbeitsausschuss der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Technische Übersichtslisten der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) sowie einige weitere themenspezifische Dokumente.

Eines der wichtigsten Dokumente ist die europäische Norm DIN EN 1317: Rückhaltesysteme an Straßen. Sie regelt die Bemessung von Rückhaltesystemen an Straßen hinsichtlich ihrer Leistung durch definierte Rückhaltestufen. Sie besteht aus den folgenden Teilen:

- Teil 1: Terminologie und allgemeine Kriterien für Prüfverfahren [1]
- Teil 2: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Schutzeinrichtungen [2]
- Teil 3: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Anpralldämpfer [3]
- Teil 4: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Anfangs-, End- und Übergangskonstruktionen von Schutzeinrichtungen [4]
- Teil 5: Anforderungen an die Produkte, Konformitätsverfahren und -bescheinigung für Fahrzeugrückhaltesysteme [5]
- Teil 6: Fußgängerrückhaltesysteme, Brückengeländer [6]
- Teil 7: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Anfangs-, und Endkonstruktionen von Schutzeinrichtungen [7]
- Teil 8: Rückhaltesysteme für Motorräder, die die Anprallheftigkeit an Schutzplanken reduzieren [8]

Im Rahmen dieses Projektes findet eine Betrachtung[1] der Teile 1 [1] und 2 [2] statt, da dort die relevanten Festlegungen bezüglich einer einheitlichen Terminologie, Leistungsklassen und der einzuhaltenden Prüfverfahren und Abnahmekriterien für Anprallprüfungen für Schutzeinrichtungen getroffen werden. Alle weiteren Teile beschäftigen sich mit Anpralldämpfern, Anfangs-, End- und Übergangskonstruktionen sowie weitergehenden Anforderungen wie Konformitätsverfahren.

Ein weiteres wichtiges Dokument sind die Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeugrückhaltesysteme (RPS) [9][2]. Sie regeln den Einsatz von Fahrzeugrückhaltesystemen in Deutschland.

---

[1] Zur Wahrung und Einhaltung des Urheberrechtes werden in diesem Forschungsbericht keine Abbildungen und Formeln aus den Schriftreihen der DIN (Beuth Verlag GmbH) dargestellt.

[2] Der Auszug aus dem FGSV-Regelwerk Nr. 343, Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme, 2009, ist mit Erlaubnis der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesselinger Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

Neben diesen beiden zentralen Dokumenten für Schutzeinrichtungen neben der Fahrbahn gibt es einige weitere Dokumente, wie Einsatzempfehlungen und Vertrags- sowie Lieferbedingungen:

- Einsatzempfehlungen für Fahrzeugrückhaltesysteme [10]
  Diese sollen den Straßenbauverwaltungen Hilfestellungen bei der Anwendung der RPS und Auswahl des FRS geben.
- Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Fahrzeug-Rückhaltesysteme (ZTV FRS) [11]
  Zuvor: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für passive Schutzeinrichtungen (ZTV-PS) [12]
- Technische Kriterien für den Einsatz von Fahrzeugrückhaltesystemen in Deutschland (TK FRS) [13]
- Technische Übersichtsliste für Fahrzeugrückhaltesysteme in Deutschland [14]
- Technische Lieferbedingungen für Stahlschutzplanken (TL-SP 99) [15]
- Technische Liefer- und Prüfbedingungen für Übergangskonstruktionen zur Verbindung von Schutzeinrichtungen (TLP ÜK) [16]
- Technische Lieferbedingungen für Schutzplankenpfostenummantelungen (TL-SPU 93) [17]
- Technische Lieferbedingungen für Betonschutzwand-Fertigteile (TL BSWF 96) [18]
- Kompatible Stahlschutzplankensysteme – Gütesicherung (RAL-RG 620) [19]
- Merkblatt für Reparaturen von Fahrzeugrückhaltesystemen im Bestand (M RepS) [20]

Darüber hinaus befasst sich der Ausschuss der FGSV laufend mit der Teilfortschreibung und Aktualisierung der RPS 2009.

In den nächsten Jahren sind außerdem folgende Ausarbeitungen geplant:

- Böden und Einfluss auf Fahrzeugrückhaltesysteme
- Qualitätssicherung bei Fahrzeugrückhaltesystemen

Die folgenden Abschnitte gehen auf die wichtigsten Festlegungen hinsichtlich der Fahrzeugsicherheit ein. Auf Anforderungen hinsichtlich der Straßenplanung wird an dieser Stelle verzichtet.

Als Grundlage zum Einsatz von Computersimulationsprüfungen für die Nachstellung des Fahrzeuganprall entsprechend der DIN EN 1317 [1] - [8], gibt es die Richtlinien für Computersimulationen von Anprallprüfungen an Fahrzeugrückhaltesystemen in der DIN CEN/TR 16303:

- Teil 1: Allgemeine Informationen und Dokumentation [21]
- Teil 2: Fahrzeugmodellierung und Überprüfung [22]
- Teil 3: Modellierung des Prüfgegenstands und Überprüfung [23]
- Teil 4: Validierungsverfahren [24]

Auf Grundlage der vier Teile [21], [22], [23], [24] erfolgt eine Zusammenführung in der DIN EN 16303 [25].

2.2. Einteilung von Rückhaltesystemen an Straßen

Rückhaltesysteme an Straßen werden nach DIN EN 1317 [1] in verschiedene Systemtypen unterteilt. Dabei sind für den Projektumfang vor allem die folgenden Bestimmungen wichtig:

Fahrzeugrückhaltesystem (FRS): an einer Straße errichtetes System, das in bestimmtem Umfang ein von der Fahrbahn abkommendes Fahrzeug aufhält.

(passive) Schutzeinrichtung (PSE): ein durchgehendes Fahrzeugrückhaltesystem, das längsseits oder auf dem Mittelstreifen einer Straße errichtet wird.

Anfangs- und Endkonstruktionen: konstruktive Gestaltung des Abschlusses einer Schutzeinrichtung.

Übergangskonstruktionen: Verbindung zweier Schutzeinrichtungen verschiedener konstruktiver Ausführungen und/oder Leistungen.

Anpralldämpfer: Vorrichtung zur Energieaufnahme eines Fahrzeugs an der Straße, die vor einer oder mehreren Gefährdungen errichtet ist, um die Heftigkeit des Anpralls zu verringern.

In allen weiteren Arbeitspunkten werden PSE neben der Fahrbahn betrachtet. Auf Anfangs- und Endkonstruktionen, Übergangskonstruktionen, Anpralldämpfer, temporäre oder entfernbare Schutzeinrichtungen wird aufgrund der deutlich geringeren Relevanz nicht näher eingegangen. Eine Ausnahme davon stellen die Sonderfälle des Auffahrens auf Anfangs- und Endkonstruktionen dar.

2.3. Leistungsklassen

Die Einteilung von Schutzeinrichtungen erfolgt anhand sogenannter Leistungsklassen nach den Kriterien:

- Aufhaltestufe
- Anprallheftigkeitsstufe
- Wirkungsbereichsklasse
- Fahrzeugeindringung

2.3.1. Aufhaltestufe

Die Aufhaltestufe eines Fahrzeugrückhaltesystems gibt an, wieviel kinetische Energie das System aufhalten kann. Es wird dabei in die folgenden 15 Einzelstufen unterschieden:

o Temporäre Schutzeinrichtung*	T1, T2, T3	
o Normales Rückhaltevermögen	N1, N2	
o Höheres Rückhaltevermögen	H1, H2, H3,	L1, L2, L3
o Sehr hohes Rückhaltevermögen	H4a, H4b,	L4a, L4b

*Rückhaltevermögen bei geringerem Anprallwinkel

Die T-Stufen (T1, T2, T3) sind nur für vorübergehende Schutzeinrichtungen vorgesehen. Die L-Stufen (L1, L2, L3) unterscheiden sich von den H-Stufen durch einen zusätzlich durchgeführten TB32 Test (Pkw 1.500 kg, 20°, 110 km/h). Schutzeinrichtungen hoher Stufen werden auch als zulässig für eine geforderte, geringere Aufhaltestufe angesehen.

2.3.2. Anprallheftigkeitsstufe

Die Anprallheftigkeit an einem Fahrzeugrückhaltesystem wird in die drei Stufen A, B und C eingeteilt. Sie wird mithilfe der Indexwerte

- o Acceleration Severity Index (ASI)
- o Theoretical Head Impact Velocity (THIV)

bestimmt. Anprallheftigkeit A entspricht geringeren Insassenbelastungswerten als B und C.

Der ASI stellt ein Maß für die Belastung der Fahrzeuginsassen durch die Beschleunigung des Pkw dar. Dafür werden die drei Komponenten $a_x(t)$, $a_y(t)$, $a_z(t)$ der Fahrzeugbeschleunigung aufgezeichnet, mit einem Butterworth-Digitalfilter gefiltert und zu einer gewichteten Messreihe $\mathrm{ASI}(t)$ zusammengefasst. Der ASI ist eine Funktion der Zeit und entspricht dem Maximum der Messreihe.

In den meisten Versuchen beträgt die Datenaufzeichnung zwei Sekunden, wobei 500 ms vor dem Erstkontakt und 500 ms nach der Messdauer von einer Sekunde Daten erfasst werden müssen. Ein rekursiver Filter erzeugt zu Beginn und am Ende der Datenaufzeichnung stets „anfängliche Übergangsvorgänge“ und benötigt eine bestimmte Zeit, um sich „einzupegeln“. [1]

Für angeschnallte Insassen wird der ASI nach der folgenden Gleichung (Formel 2.1) berechnet:

$$ASI = \max_{0s \le t \le 1s} \left(\sqrt{\left(\frac{1}{12} a_x(t)\right)^2 + \left(\frac{1}{9} a_y(t)\right)^2 + \left(\frac{1}{10} a_z(t)\right)^2} \right) \qquad 2.1$$

Der THIV steht für die Theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfes (Theoretical Head Impact Velocity). Dabei wird ein theoretischer „Kopf“ als frei beweglicher Gegenstand mit der anfänglichen Geschwindigkeit $v_x = 0$ und $v_y = 0$ (Bezugssystem des Fahrzeugs, also identische Geschwindigkeit wie das Fahrzeug im Moment des Anpralls, rein translatorisch in der Ebene) angenommen. Der THIV ergibt sich aus der relativen Geschwindigkeit zwischen „Kopf“ (gleichförmige Bewegung) und Fahrzeug zur Anprallzeit T des Kopfes an einer fiktiven Fläche (siehe Formel 2.2). Die Anprallzeit T (Flugzeit) ist die kürzeste Zeit aus $s_x(T) = 0{,}6\ m$ und $|s_y(T)| = 0{,}3\ m$. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in [9][3].

$$THIV(T) = \sqrt{v_x(T)^2 + v_y(T)^2} \qquad 2.2$$

2.3.3. Wirkungsbereich

Die Verformung des Rückhaltesystems wird durch die dynamische Durchbiegung (D_m), den Wirkungsbereich (W_m) und die Fahrzeugeindringung (VI_m) ausgedrückt. Dabei ist die dynamische Durchbiegung ein Maß für die maximale dynamische Verschiebung des Rückhaltesystems und der Wirkungsbereich ein Maß für den maximalen seitlichen Abstand zwischen dem nicht verformten Rückhaltesystem (straßenzugewandte Seite) und der maximalen dynamischen Position eines jeglichen Teils der Schutzeinrichtung (straßenabgewandte Seite).

---

[3] Der Auszug aus dem FGSV-Regelwerk Nr. 343, Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme, 2009, ist mit Erlaubnis der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesselinger Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

Die Fahrzeugeindringung ist die maximale seitliche Position eines Lastkraftwagens von der nicht verformten Seite des Rückhaltesystems. Diese gilt jedoch nur für Anprallprüfungen mit Lastkraftwagen und wird daher hier nicht weiter betrachtet. Die drei Größen dienen damit zur Bestimmung der Abstände, die vor Hindernissen zu berücksichtigen sind. Zu beachten ist allerdings, dass die Verformung sowohl von der Art des Systems als auch von den Kenngrößen der Anprallprüfung abhängt.

Da bei der realen Anprallprüfung Abweichungen der Anprallgeschwindigkeit, des Anprallwinkels und der Fahrzeugmasse im Vergleich zur geforderten Anprallprüfung auftreten (innerhalb eines Toleranzbereiches), wird der gemessene Wirkungsbereich W_m zum normalisierten Wirkungsbereich W_N umgerechnet, um so den Einfluss von ungünstigen Kombinationen der Prüfparameter zu begrenzen. Damit erlaubt der Wert eine Vergleichbarkeit und wird in eine der Wirkungsbereichsklassen W1 – W8 eingeteilt. Weitere Informationen zum Wirkungsbereich als auch die Formel zur Berechnung des normalisierten Wirkungsbereiches W_N sind in [2] zu finden.

2.4. Anprallprüfungen und Prüfverfahren

Die DIN EN 1317 [2] spezifiziert die Anprallkonstellationen und Testfahrzeuge für Anprallprüfungen. Die Versuche TB21 und TB22 gelten allerdings nur für die T-Aufhaltestufen (siehe Abschnitt 2.3.1) und damit nur für den Einsatz in Arbeitsstellen, in denen ganz andere Schutzeinrichtungen eingesetzt werden als im permanenten Bereich. Daher sind die späteren Betrachtungen vor allem für die Versuche TB11 und TB31 und TB32 sinnvoll.

Darüber hinaus gibt die DIN EN 1317 [1] und [2] Regelungen und Toleranzen für die Anprallprüfungen an bezüglich:

- Prüfort (Annäherungs- und Abprallbereich[4], zulässige Neigung, Fahrbahnoberfläche und -zustand und weitere)
- Prüffahrzeug (europäische Modelle, Reifenzustand, Masse, Radspur und weitere)
- Fahrzeuginstrumentierung
- Berechnung der Prüfergebnisse (ASI, THIV, VCDI)
- Schutzeinrichtung (Aufbau, Lage des Aufprallpunktes)
- Anprallkonstellation (Anprallgeschwindigkeit und -winkel)

Beispielsweise gibt es für die Fahrzeugart Pkw die zulässigen Gesamtprüfmassen von 900 ± 40 kg, 1.300 ± 65 kg und 1.500 ± 75 kg.

Allgemeine Abnahmekriterien, die zum Nichtbestehen der Anprallprüfung führen [2]:

- Schutzeinrichtung oder Brüstung hält das Prüffahrzeug nicht auf
- Vollständiger Bruch jeglicher Hauptlängselemente des Prüfgegenstands
- In den Fahrzeuginnenraum eingedrungene Elemente der Schutzeinrichtung
- Verformungen und Eindringung in den Fahrzeuginnenraum
- Während oder nach der Prüfung über- oder unterquert mehr als ein Rad des Fahrzeugs die Schutzeinrichtung
- Fahrzeug kippt/überschlägt sich während der Prüfung
- Fahrzeug bleibt nicht innerhalb der Begrenzung des Abprallbereichs

[4] Nach dem Anprall darf die Radspur des Fahrzeugs eine zur PSE parallele Linie im Abstand A (für Pkw 2,2 m zuzüglich der Fahrzeugbreite und 16 % der Fahrzeuglänge) über eine Strecke B (für Pkw 10 m) nicht überqueren. Weitere Informationen finden sich in [3].

2.5. Einsatzkriterien und einsatzspezifische Anforderungen

Für das Aufstellen von Fahrzeugrückhaltesysteme wurden in den „Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeugrückhaltesysteme“ [9][5] Einsatzkriterien und einsatzspezifische Anforderungen geregelt, unterteilt in

- Äußerer Fahrbahnrand
- Mittel- und Seitentrennstreifen
- Ränder von Brücken und Stützwänden
- Mittel- und Seitentrennstreifen auf Brücken
- Wände und Portale

Darin sind allgemeine Anforderungen, Gefährdungsstufen, kritische Abstände, das geforderte Leistungsvermögen und andere Hinweise beschrieben.

2.5.1. Allgemeine Anforderungen

In der RPS [9][5] sind die allgemeinen Anforderungen an Schutzeinrichtungen beschrieben durch:

- Sicherer Schutz gegen Durchbruch von Fahrzeugen
- Geringes Verletzungsrisiko der Fahrzeuginsassen beim Anprall
- Angemessener Aufwand für Installation, Reparatur, Unterhalt, Entsorgung
- Keine Schaffung neuer Hindernisse
- Berücksichtigung der Abkommenswahrscheinlichkeit

Sie sollen eingesetzt werden:

- zum Schutz von unbeteiligten Personen oder schutzbedürftigen Bereichen neben der Straße oder des Gegenverkehrs bei zweibahnigen Straßen
- zum Schutz der Fahrzeuginsassen vor schweren Folgen infolge Abkommens von der Fahrbahn, z.B. bei einem Absturz oder vor dem Anprall an gefährliche Hindernisse neben der Fahrbahn.

2.5.2. Gefährdungsstufen und kritische Abstände

Das Gefahrenpotenzial von Gefahrenstellen am äußeren Fahrbahnrand wird nach vier Gefährdungsstufen (GS) unterschieden:

- GS 1: schutzbedürftige Bereiche mit besonderer Gefährdung Dritter
  z.B.: explosionsgefährdete Chemieanlagen
- GS 2: schutzbedürftige Bereiche mit Gefährdung Dritter
  z.B.: nebenliegende stark frequentierte Geh- und Radwege
- GS 3: Hindernisse mit besonderer Gefährdung von Fahrzeuginsassen
  z.B.: nicht verformbare Hindernisse (Lärmschutzwände)
- GS 4: Hindernisse mit Gefährdung von Fahrzeuginsassen
  z.B.: Gewässer mit einer Tiefe > 1 m, Wildwasser

Für die Gefährdungsstufen gelten dabei verschiedene kritische Abstände. Der maßgebliche Abstand bezieht sich auf den Rand des Verkehrsraumes und den Rand der Gefahrenstelle. Zur Bestimmung des kritischen Abstandes gibt es in der RPS verschiedene Diagramme. Abbildung 2-1 zeigt das Diagramm für Straßen mit v_{zul} = 80 km/h bis 100 km/h [9][5].

---

[5] Der Auszug aus dem FGSV-Regelwerk Nr. 343, Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme, 2009, ist mit Erlaubnis der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesselinger Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

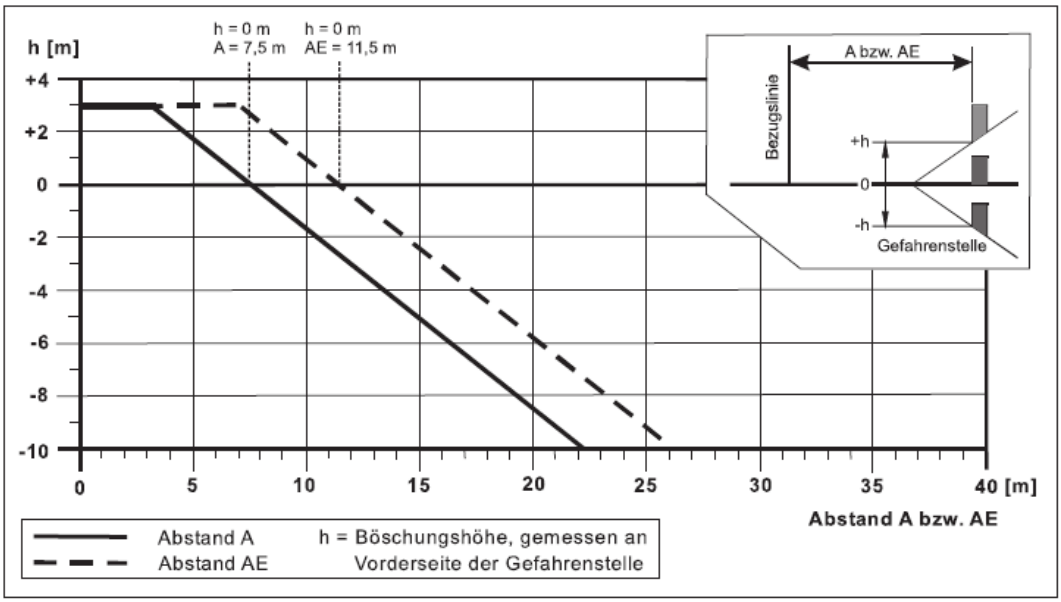


Abbildung 2-1: Kritische Abstände für Straßen mit v_{zul} = 80 km/h bis 100 km/h [9][6]

Abbildung 2-2 zeigt die Einsatzkriterien für Schutzeinrichtungen am äußeren Fahrbahnrand in Abhängigkeit der Gefährdungsstufen.

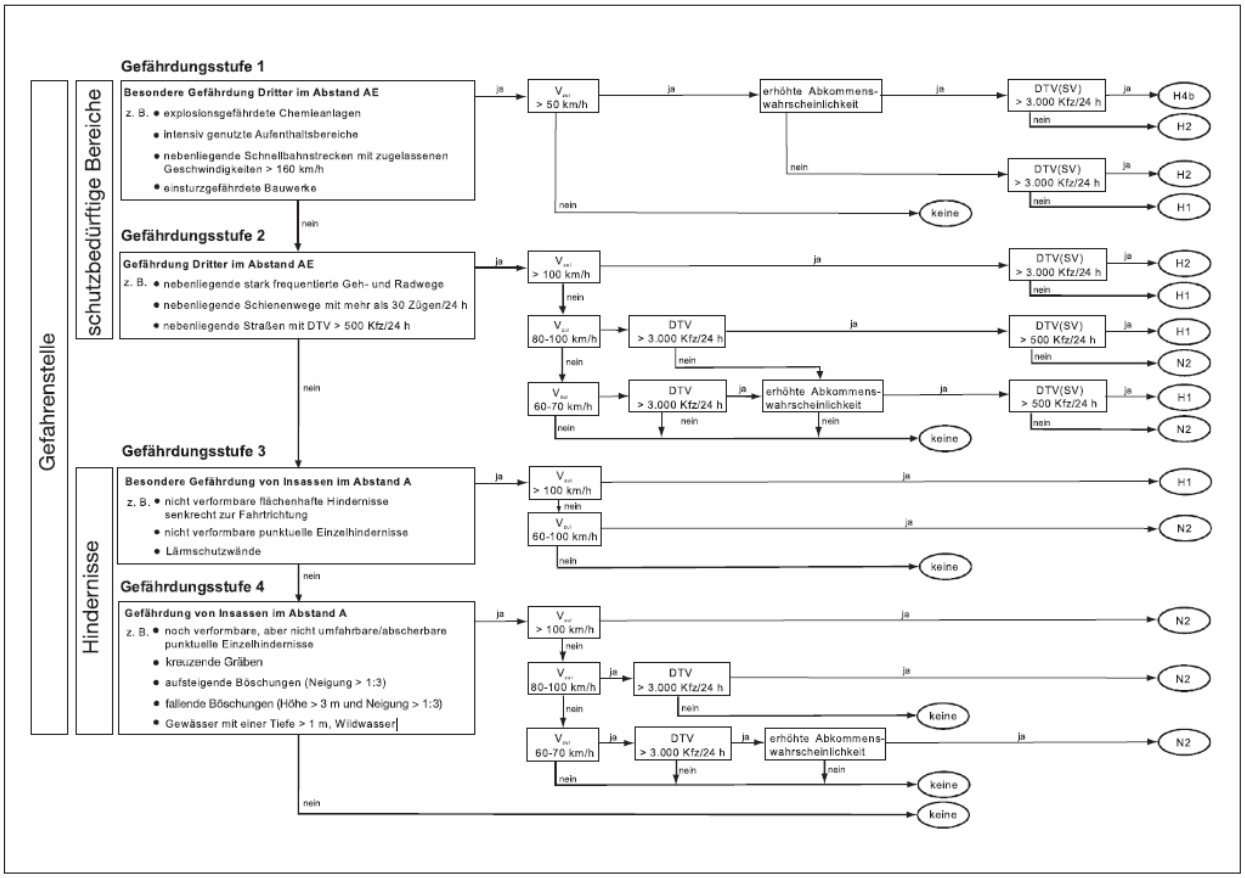


Abbildung 2-2: Einsatzkriterien für Schutzeinrichtungen am äußeren Fahrbahnrand [9]

[6] Der Auszug aus dem FGSV-Regelwerk Nr. 343, Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme, 2009, ist mit Erlaubnis der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesselinger Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

2.5.3. Anforderungen an das Leistungsvermögen

Schutzeinrichtungen müssen Anforderungen bezüglich ihres Leistungsvermögens in Abhängigkeit der Einsatzkriterien (Gefährdungsstufe und kritische Abstände) erfüllen. Das Leistungsvermögen wird bezüglich der drei wesentlichen Anforderungen

- o Aufhaltestufe
- o Anprallheftigkeitsstufe
- o Wirkungsbereichsklasse

bewertet. Darüber hinaus werden in der RPS auch die erforderlichen Längen von Schutzeinrichtungen behandelt.

Die erforderliche Aufhaltestufe hängt von den Einsatzkriterien (Gefährdungsstufe und kritische Abstände) ab. Für den äußeren Fahrbahnrand orientiert sie sich an der Zuordnung in Abbildung 2-2. Für Gefahrenstellen von zweibahnigen Straßen mit v_{zul} > 50 km/h sind durchgängig

- o H2 (Mittelstreifen)
- o H1 (Seitenstreifen)
- o H4b (erhöhte Abkommenswahrscheinlichkeit)

anzuwenden.

Die Anprallheftigkeitsstufe wird wie in 2.3.2 bestimmt. Da die Stufe A geringeren Insassenbelastungswerten (nach ASI) entspricht, ist diese bei vergleichbaren Bedingungen den Stufen B und C vorzuziehen. In Bereichen, in denen das Rückhaltevermögen von vorrangiger Bedeutung ist (z.B. das Aufhalten eines Güterkraftfahrzeuges), kann auch ein System mit der der Stufe C gewählt werden [9][7].

Die maximale Wirkungsbereichsklasse hängt von der örtlichen Situation ab. Der Wirkungsbereich muss dabei grundsätzlich kleiner sein als der Abstand zwischen der Schutzeinrichtung und der Gefahrenstelle. Der Abstand zur Straße (Bezugslinie) sollte 0,5 m oder 1,0 – 1,5 m (wenn erforderlich) betragen. Für Mittel- und Seitentrennstreifen wird der Wirkungsbereich von der Breite des Trennstreifens und der Breite der Schutzeinrichtung bestimmt. Er darf maximal bis zum inneren Rand der Fahrbahnmarkierung reichen. Falls eine zweite Schutzeinrichtung mit getrennter Wirkung verbaut ist, darf der Wirkungsbereich nicht bis in die zweite Schutzeinrichtung hereinreichen.

2.5.4. Einsatzfreigabe

Seit 2011 dürfen in Deutschland und der EU nur noch nach DIN EN 1317 zertifizierte Fahrzeugrückhaltesysteme (CE-Kennzeichnung) verbaut werden. Darüber hinaus hat die BASt bis 2017 möglichst viele Schutzeinrichtungen in einem Einsatzfreigabeverfahren geprüft, das neben der DIN EN 1317 und der RPS 2009 noch weitere Kriterien zur Einhaltung eines hohen Sicherheitsniveaus berücksichtigt. Dazu wurde eine Einsatzfreigabeliste geführt.

Im August 2017 wurden durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) mit dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau Nr. 15/2017 [26] „Technische Kriterien für den Einsatz von Fahrzeugrückhaltesystemen in Deutschland“ (TK-FRS) [13] eingeführt, welche das bisherige Einsatzfreigabeverfahren ersetzen. Die vorherige Einsatzfreigabeliste ist damit nicht mehr anzuwenden. Auf der Grundlage der TK-FRS wird eine „Technische Übersichtsliste für Fahrzeugrückhaltesysteme in Deutschland“ (TÜL-FRS) [14] veröffentlicht, die den neuen Kriterien entsprechen. Weitere Informationen finden sich unter anderem in den Schriften [27] und [28].

---

[7] Der Auszug aus dem FGSV-Regelwerk Nr. 343, Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme, 2009, ist mit Erlaubnis der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesselinger Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

2.6. Arten von passiven Schutzeinrichtungen

Es existiert eine Vielzahl verschiedener Konstruktionen für passive Schutzeinrichtungen. Im Folgenden ist eine Auswahl der wichtigsten und in Deutschland am häufigsten verbauten Systeme zu finden. Die Liste erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Insbesondere seit der Einführung der RPS 2009 und durch die Forderung nach geprüften Systemen gemäß DIN EN 1317 kommt eine zunehmende Zahl an neuen Systemen auf den Markt. Dadurch ergibt sich eine stark wachsende Anzahl notwendiger und zu prüfender Übergangskonstruktionen [29].

Stahlschutzplanken – Standardkonstruktionen

Allgemein existieren für Stahlschutzplanken verschiedene Pfostenprofile. Üblich sind die folgenden:

- C-Pfosten
- Σ-Pfosten
- IPE-Pfosten

Darüber hinaus existieren übliche Profiltypen für die eigentliche Planke:

- A-Profil
- B-Profil



Abbildung 2-3: Profilarten bei Stahlschutzplanken (li.: A-Profil | re.: B-Profil)

Die folgenden Systeme sind am häufigsten verbaut:

- Einfache Schutzplanke (ESP)
- Einfache Distanzschutzplanke (EDSP)
- Einfache Distanzschutzplanke auf Bauwerk, mit Geländer (EDSP BW)
- Doppelte Distanzschutzplanke (DDSP)
- Kastenprofil-Systeme
- EcoSafe
- Super-Rail

Betonschutzwände

Betonschutzwände (auch „Betonrückhaltesystem“) werden aus Betonfertigteilen oder durch Ortbeton aus einer Schalung hergestellt. Sie haben meist eine Bewehrung im oberen Teil der Wand und zeigen so eine hohe Durchbruchsicherheit bei gleichzeitig minimalem Platzbedarf und einem geringen Wartungs- und Reparaturaufwand (z.B. keine Reparatur bei leichten Anprallereignissen). Es existieren dabei einseitige (charakteristisches Profil auf der straßenzugewandten Seite) sowie doppelseitige Systeme (einreihige Mittelabsicherung).

Die häufigsten Profile sind das Step- und New Jersey-Profil. Beim New Jersey-Profil verjüngt sich der untere Teil der Betonschutzwand gleichmäßig bis auf eine Höhe von zirka ein Drittel der Gesamthöhe, wohingegen sich das Step-Profil stufenförmig im unteren Drittel verjüngt. Im Rahmen des Projektes werden beide Profile auch als seitlich abgeschrägtes Profil bezeichnet.



Abbildung 2-4: Profile von Betonschutzwänden (li.: New Jersey-Profil | re.: Step-Profil)

Sonstige Rückhaltesysteme

Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl weiterer Systeme, wie die Safety-Rail (Verbindung von Schutzplanke und Geländer), MAXI-RAIL, Unterfahrschutz für Zweiradfahrer, LARS (Sonderkonstruktion neben Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsstrecken), Holzkonstruktionen, Seilsysteme, ETI Roller-System und weitere, die hier nicht alle aufgeführt werden können.

3. Analyse von Unfalldaten mit Anprall an Schutzeinrichtungen

Ein Schwerpunkt der Studie ist die Analyse von Verkehrsunfällen mit Personenschaden und PSE-Anprall. Dabei liegt das Augenmerk zum einen auf allen PSE-Unfällen in Deutschland und deren Relevanz im gesamten Unfallgeschehen. Andererseits werden vertiefte Analysen mit detaillierteren Unfalldatenbanken durchgeführt, in denen unter anderem Aspekte des Unfallablaufs, der Art der Verkehrsbeteiligung bis hin zu den Unfallfolgen für Fahrzeugnutzende berücksichtigt werden. Auf Basis deskriptiver Statistiken werden für PSE-Anpralle typische Unfallszenarien und kritische Anprallkonstellationen sowie Sonderfälle identifiziert. Darüber hinaus werden für ausgewählte Bundesländer (Sachsen, Brandenburg) behördliche Straßen- und Unfalldatenbanken ausgewertet. Die Straßendatenbanken werden dafür hinsichtlich der Aufstellorte und der Art der Schutzeinrichtung untersucht. Anschließend erfolgt eine Verknüpfung mit den jeweiligen Unfalldatenbanken der Länder, um mögliche Unterschiede in den Unfallfolgen zu identifizieren.

3.1. Datengrundlage

3.1.1. Unfalldatenbanken

Anhand von Unfalldaten lassen sich retrospektiv verschiedene Fragestellungen hinsichtlich des Unfallgeschehens mit PSE-Anprall in Deutschland beantworten. Besonders hilfreich sind dabei Datenquellen mit einer hohen Datentiefe, um viele Aspekte der Verkehrs- und Fahrzeugsicherheit zu analysieren. Eine hohe Datentiefe bieten In-Depth Datenbanken mit umfangreichen technischen und medizinischen Detailinformationen zum Unfall- und Verletzungsgeschehen enthalten. Entscheidend für die Auswahl der geeigneten In-Depth Datenbanken ist die Verfügbarkeit von Unfallrekonstruktionen, um typische Kollisionskonstellationen (z.B. Kollisionswinkel und -geschwindigkeiten) an Schutzeinrichtungen beschreiben zu können. Nationale Datenbanken besitzen meist nur einen limitierten Parametersatz, ermöglichen dafür aber überblicksartige Auswertungen über das gesamte polizeilich erfasste Unfallgeschehen.

Allen Unfalldatenbanken gemein ist das Phänomen der Untererfassung, da nicht jeder Unfall den Behörden oder anderen erhebenden Institutionen gemeldet wird. Die daraus resultierende Dunkelziffer an Unfällen ist besonders im Sachschadensbereich hoch, sinkt jedoch deutlich für Unfälle mit Personenschaden und dabei insbesondere mit zunehmender Verletzungsschwere. Insbesondere Alleinunfälle ohne Beteiligung anderer Verkehrsteilnehmer werden häufiger nicht erfasst.

Nachfolgend sind die benutzten Datenbanken kurz beschrieben.

DESTATIS (Fachserie 8 / Reihe 7)

Die deutsche Straßenverkehrsunfallstatistik [30] wird jährlich vom Statistischen Bundesamt (DESTATIS) in der Fachserie 8 / Reihe 7 (Verkehrsunfälle) publiziert und basiert auf den Daten der polizeilichen Unfallerhebungen. Für das Jahr 2020 liefert sie Informationen über insgesamt 9.663 Unfälle mit Personenschaden und PSE-Anprall. Die frei verfügbaren aggregierten Standardtabellen, sowie einige im Rahmen der Studie beauftragte Sonderauswertungen für das Unfalljahr 2016 bieten eine gute und repräsentative Datengrundlage für Analysen zum allgemeinen Unfallgeschehen mit PSE-Anprall.

EUSka

EUSka steht für Elektronische Unfalltypensteckkarte und wird in vielen Bundesländern von der Polizei für die Erfassung, Verarbeitung und Analyse der Unfalldaten verwendet. Im Rahmen der Studie werden die EUSka Daten für die Länder Brandenburg und Sachsen ausgewertet. Als Basis dienen die Unfalljahre 2014 bis 2017 in Brandenburg und die Unfalljahre 2015 bis 2017 in Sachsen. Diese Daten werden vor allem für den Abgleich von Straßendatenbanken mit Unfalldatenbanken herangezogen.

GIDAS (German In-Depth Accident Study)

GIDAS ist ein Gemeinschaftsprojekt der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT). Das Projekt umfasst Daten aus den Erhebungsgebieten Dresden und Hannover. Seit 1999 werden jährlich etwa 2.000 Verkehrsunfälle mit Personenschaden dokumentiert und in der GIDAS Datenbank kodiert. Dabei werden an der Unfallstelle und im Krankenhaus durchschnittlich 3.500 Einzelparameter pro Unfall erhoben. Im Anschluss an die Dokumentation wird jeder Unfall rekonstruiert. Da eine ausreichende Detailtiefe vorhanden ist, wird diese Datenquelle für Einzelfall- und Tiefenanalysen hinsichtlich Unfall- und Verletzungsentstehung herangezogen.

Für die Aktualisierung der Unfallursachen von PSE-Anprallen und den Pkw-Anprallkonstellationen an PSE sowie für die Analysen zum Schutzwandanprall werden die GIDAS Unfalljahre ab 2005 ausgewertet. Für die Relevanz von Sonderfällen mit PSE-Anprall dienen die Unfalljahre 2005 bis 2015 als Basis.

Unfalldatenbank der Versicherer (UDB GDV)

Unfalldatenbank (UDB) der Versicherer – Die Datenbank enthält Unfälle mit Personenschaden und mindestens 15.000 Euro Schadenaufwand. Die Informationstiefe der UDB übersteigt die der amtlichen Bundesstatistik und ist vergleichbar mit der GIDAS Datenbank.

3.1.2. Straßeninformationsbanken (SIB)

Als Datengrundlage werden Daten der Straßeninformationsbank (SIB) der Länder Sachsen und Brandenburg mit Stand Mai 2018 verwendet. Diese enthalten Informationen über Straßennetz, -zustand und -nutzung.

Die Straßennetze (Netzknoten-Kantenmodell) sind als grafische Relation im Shape-Format (Sachsen) oder als MapInfo-Relation (Brandenburg) vorhanden. Die Datenbanktabellen für die PSE-Systeme („DB001017.DBF“) wurden als dBase-Dateien übergeben. Die Straßennetze und die Angaben für PSE-Systeme liegen für Autobahnen, Bundes-, Landes-/Staats-, Kreisstraßen vor (Straßenklasse 1 bis 4). Die Tabellen aus den Straßendatenbanken enthalten Angaben zum Straßennetz:

- VNK: Anfangsnetzknoten
- NNK: Endnetzknoten
- VST: Von Station
- BST: Bis Station
- LAENGE: Abschnittslänge

Die aufgeführten Daten wurden in eine PostgreSQL Datenbank importiert. PostgreSQL ist ein frei zugängliches relationales Datenbankmanagementsystem, welches auch die Verwaltung geometrischer Informationen ermöglicht. Da die SIB Daten nur die Straßenklassen 1 bis 4 enthalten, werden auch nur Unfälle der Straßenklassen 1 bis 4 berücksichtigt. Das Straßennetz wurde einheitlich in das amtliche Koordinatenbezugssystem „ETRS89 - UTM - Zone 33N“ (EPSG: 25833) transformiert. Anhand der Koordinatenangaben wurden für die Unfalldaten die Geometrien berechnet und ebenfalls in das Koordinatenbezugssystem transformiert.

3.1.3. Fahrzeugbestand in Deutschland

Um das Potenzial heutiger Schutzeinrichtung mit der aktuellen Entwicklung im deutschen Fahrzeugbestand abzugleichen und Tendenzen abzuleiten, werden Statistiken des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) ausgewertet.

Die Zahlen zum aktuellen Fahrzeugbestand umfassen alle Fahrzeuge und Anhänger, die am 1. Januar eines Jahres im Zentralen Fahrzeugregister gespeichert sind. Hierzu werden alle Fahrzeuge berücksichtigt, die nach der Fahrzeug-Zulassungsverordnung (FVZ) in Deutschland zugelassen sind und ein Kennzeichen besitzen. Folglich sind außer Betrieb gesetzte Fahrzeuge nicht in den Statistiken enthalten.

Auswertungen zu Merkmalen des deutschen Fahrzeugbestandes, wie beispielsweise Fahrzeugklasse, Leergewicht und Alter des Fahrzeuges, werden vom KBA veröffentlicht und sind frei zugänglich.

3.2. Relevanz im Verkehrsunfallgeschehen

Für die Analyse zum allgemeinen Unfallgeschehen werden überwiegend DESTATIS Daten als Basis herangezogen, da diese die repräsentative Grundgesamtheit aller in Deutschland geschehenen und polizeilich erfassten Verkehrsunfälle darstellen. Alle Analysen zu Unfällen mit PSE Anprall basieren ausschließlich auf Unfällen mit Personenschaden. Für schwerwiegende Unfälle mit Sach-schaden und PSE Anprall sind Zahlen in der amtlichen Verkehrsunfallstatistik enthalten, allerdings umfassen diese Zahlen nicht alle Unfälle mit Sachschaden und PSE Anprall.

3.2.1. Auswertung der amtlichen Verkehrsunfallstatistik 2020

Der Begriff „Schutzplanke“ umfasst im Sinne der polizeilichen Kodierung auch Schutzwände und damit alle PSE neben der Fahrbahn. Des Weiteren ist der PSE Anprall im Rahmen der polizeilichen Erhebung ein Unfallmerkmal. Das heißt, dass in der amtlichen Verkehrsunfallstatistik nicht differenziert werden kann, welcher Beteiligte in welcher Kollision mit einer PSE kollidierte.

Aufgrund der epidemischen Lage (Corona-Pandemie) – beginnend von 2020 – und damit verbundene nationale Einschränkungen, die sich auch im deutschen Straßenverkehr widerspiegeln, wird zunächst geprüft, ob es Verzerrungen zwischen den Unfalljahren 2019 und 2020 für PSE-Anpralle gibt. Für das Jahr 2019 sind in der amtliche Verkehrsunfallstatistik insgesamt 42.517 Unfälle mit Personenschaden und Objektkollision registriert, wovon in 11.174 Unfällen ein PSE-Anprall stattfand. (Abbildung 3-1)

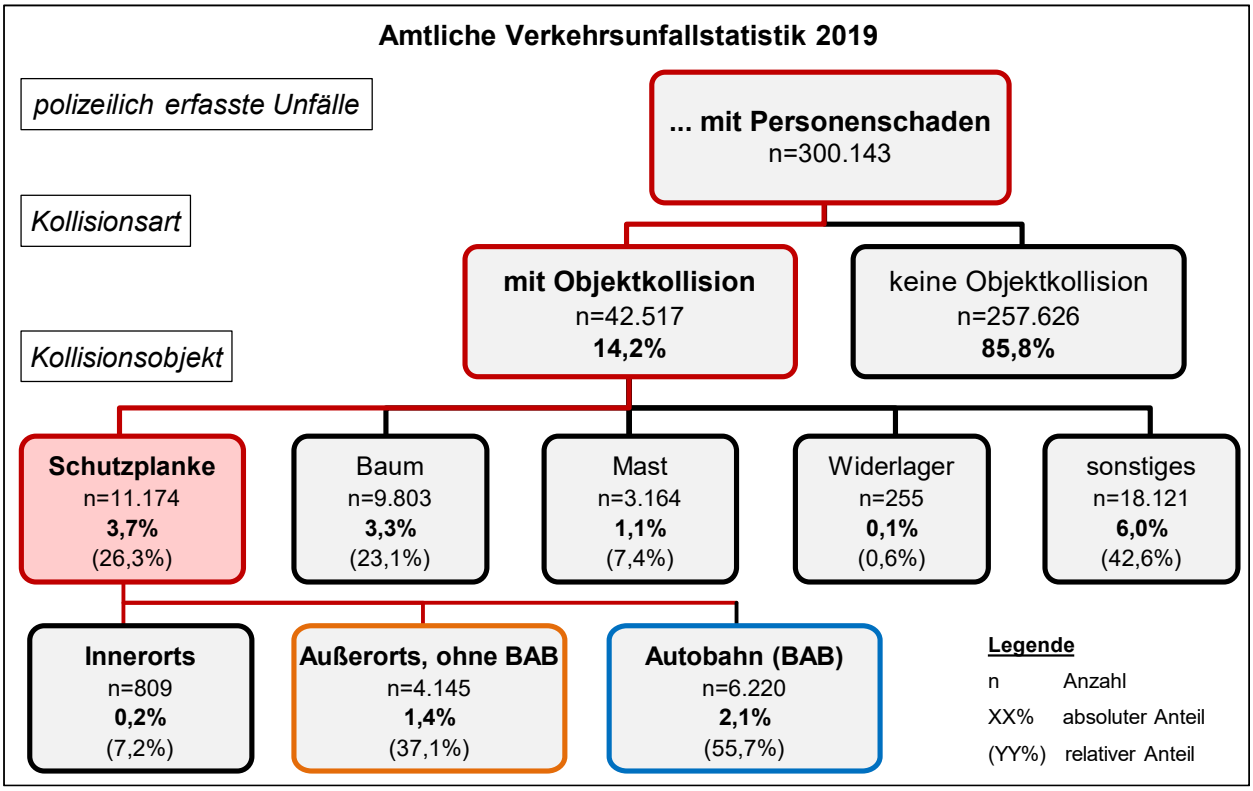


Abbildung 3-1: Verkehrsunfallzahlen in Deutschland für das Unfalljahr 2019

Die absolute Anzahl an Verkehrsunfällen im Jahr 2020 ist niedriger (Abbildung 3-2) als im Unfalljahr 2019. Allerdings zeigen die relativen Anteile innerhalb der jeweiligen Kategorien, dass es zwischen den beiden Unfalljahren nur marginale Unterschiede gibt. Demzufolge wird das Unfalljahr 2020 als repräsentativ für Unfälle mit PSE-Anprall angesehen und für die weiteren Analysen herangezogen.

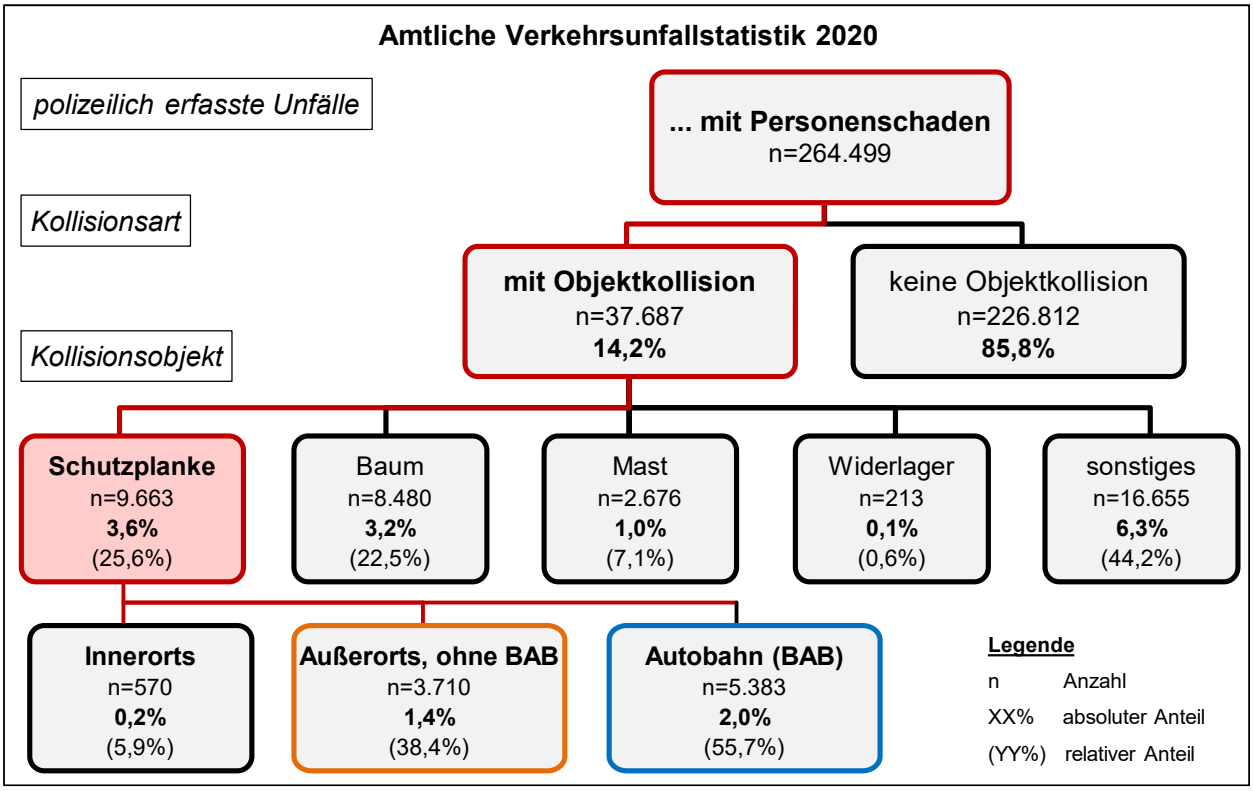


Abbildung 3-2: Verkehrsunfallzahlen in Deutschland für das Unfalljahr 2020

Im Jahr 2020 wurden über 264.000 Verkehrsunfälle mit Personenschaden erfasst, wovon in 37.687 Unfällen eine Objektkollision stattfand. Dies entspricht 14,2 % aller Unfälle mit Personenschaden in Deutschland. Der Großteil dieser Objektkollisionen sind Zusammenstöße mit „sonstigen Hindernissen“, wie Mauern, dem Verkehrsraum (Gräben, Fahrbahn) oder Bordsteinen. Die zweithäufigste Objektkollision ist der PSE-Anprall mit einem absoluten Anteil von 3,6 % am gesamtdeutschen Unfallgeschehen mit Personenschaden.

In Abhängigkeit der Ortslage zeigt die Abbildung 3-2, dass rund jeder zweite Unfall mit PSE-Anprall im Jahr 2020 auf Autobahnen stattfindet. Ein gutes Drittel der PSE-Unfälle wird auf Streckenabschnitten außerhalb geschlossener Ortschaften und knapp 6 % innerhalb von geschlossenen Ortschaften registriert.

Die Anzahl der Verkehrsunfälle mit Personenschaden und Objektkollision ist in der Zeitspanne von 2011 (n=47.660) bis 2020 (n=37.687) um 21 % gesunken, wobei unabhängig von den Unfalljahren Kollisionen mit „sonstigen Hindernisse“ stets überwiegen. Baumkollisionen nehmen im betrachteten Zeitraum stetig ab, während seit 2013 ein leichter Anstieg der PSE-Anpralle zu verzeichnen ist. Seit dem Jahr 2014 sind PSE-Anpralle etwas häufiger als Unfälle mit Baumanprall.

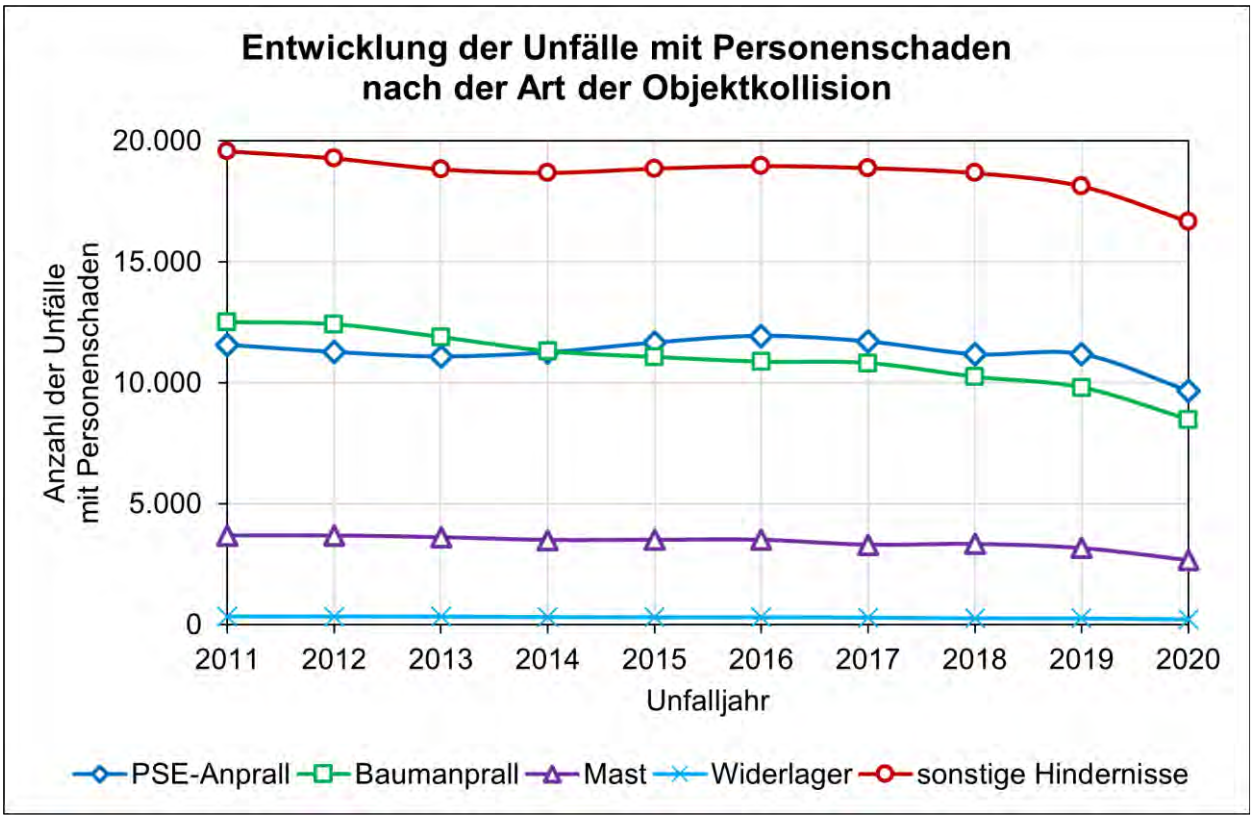


Abbildung 3-3: Entwicklung der Unfälle mit Personenschaden nach Art der Objektkollision (2011-2020)

Im Vergleich zum gesamten Unfallgeschehen weisen Objektkollisionen (mit PSE-Anprall, Baumanprall und anderen Objekten) eine höhere Verletzungsschwere auf. Die Verletzungsschwere bezieht sich dabei auf alle im Unfall verletzten Personen (Abbildung 3-4). In der Gruppe der PSE-Anpralle fällt die Verletzungsschwere im Vergleich zu allen Objektkollisionen und insbesondere zu Baumanprallen am niedrigsten aus.

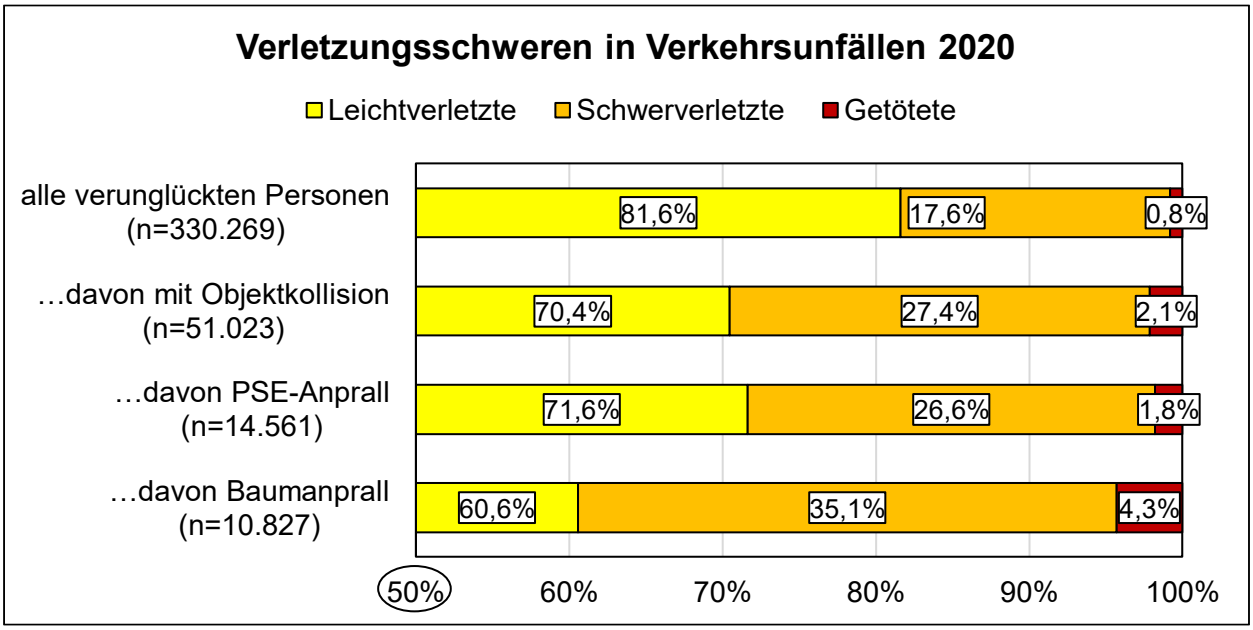


Abbildung 3-4: Verletzungsschweren in Verkehrsunfällen 2020

Die Art der Krafteinleitung spielt für die Verletzungsschwere des Insassen oder Aufsassen eine entscheidende Rolle. Hierzu wird zwischen punktueller (z.B. Baumkollision, siehe Abbildung 3-5) und flächiger Krafteinleitung (z.B. PSE-Anprall, siehe Abbildung 3-5) unterschieden [41]. Der Vorteil einer flächigen Anprallkonstellation ist die Verteilung der Stoßenergie auf eine größere Fläche am Fahrzeug. Somit werden mehr Strukturen des Fahrzeuges in die Energieaufnahme einbezogen und die maximale Deformation und Intrusion sinkt. Außerdem führt der Kontakt mit der PSE in der Regel zum Abgleiten an dieser, ohne dass der Großteil der Bewegungsenergie des Fahrzeugs in der Kollision mit der PSE abgebaut wird.



Abbildung 3-5: Arten der Krafteinleitung (li: punktuell (Baumanprall), re: flächig (PSE-Anprall))

Ein Grund für die geringere Verletzungsschwere bei PSE-Anprallen ist das Energieaufnahme- und Deformationsvermögen von Schutzplanken. Im Gegensatz zum Anprall gegen Bäume oder Schutzwände, die nur geringfügig deformierbar sind, nehmen bspw. Stahlschutzplanken durch ihre Verformung Energie auf. Das führt zu einer geringeren Belastung der Insassenzelle beim Fahrzeug.

Die Verteilung der Verletzungsschweren in PSE-Unfällen (Abbildung 3-6) zeigt, dass der prozentuale Anteil getöteter Personen im betrachteten Zeitraum (2011-2020) leicht sinkt, jedoch seit 2013 zwischen 1,6 % und 1,9 % stagniert. Der Anteil an Schwerverletzten ist Schwankungen ausgesetzt, welcher seit 2018 wieder steigt. Die absolute Anzahl an Verletzten weist seit 2017 eine leicht sinkende Tendenz auf.

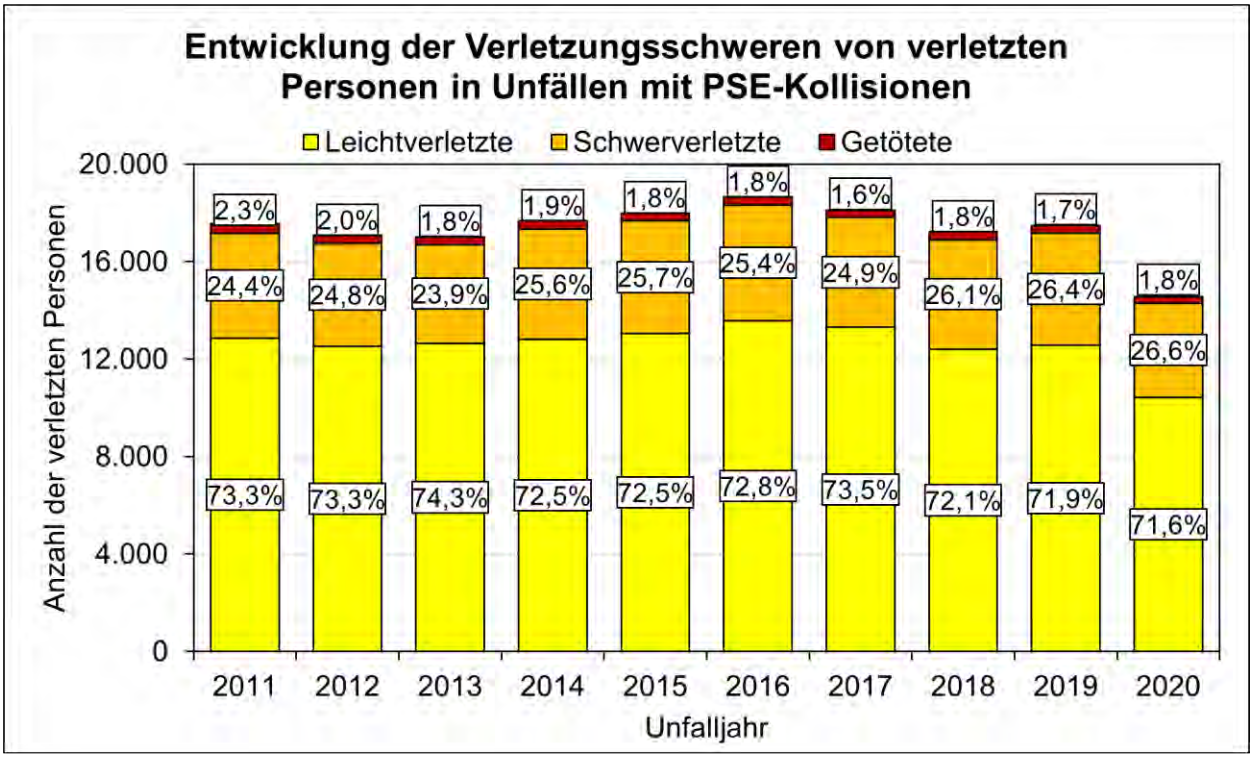


Abbildung 3-6: Verletzungsschwere von Verunglückten mit PSE-Anprall (2011-2020)

In Abhängigkeit der Ortslage (Abbildung 3-7) zeigt sich, dass zwei Drittel aller Verkehrsunfälle 2020 im innerstädtischen Bereich geschehen. Verglichen damit ereignen sich Unfälle mit PSE-Anprall am häufigsten auf Streckenabschnitten auf Autobahnen und außerhalb geschlossener Ortschaften.

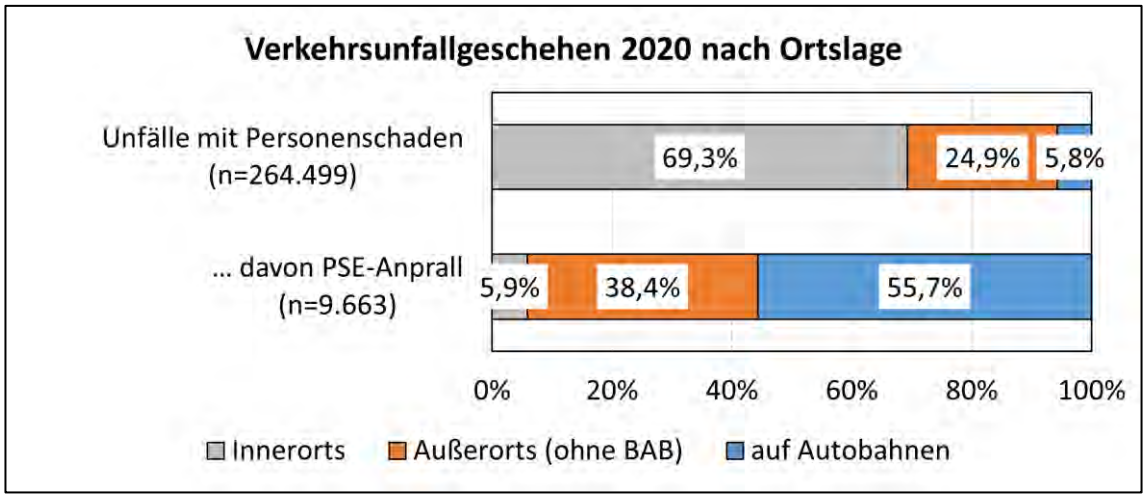


Abbildung 3-7: Verkehrsunfallgeschehen mit Personenschaden nach Ortslage,2020

3.2.2. Sonderauswertung der amtlichen Verkehrsunfallstatistik 2016

Die Daten einer Sonderauswertung der amtlichen Verkehrsunfallstatistik von 2016 zeigen, dass Pkw die häufigste Beteiligung an PSE-Unfällen haben (Abbildung 3-8, nur Zuordnung zu PSE-Unfall möglich, nicht zwangsläufig eigener PSE-Anprall des Beteiligten). Für die Studie werden Wohnmobile zur Gruppe der Personenkraftwagen gezählt. Weitere Zuordnungen von Verkehrsbeteiligungsarten sind in Tabelle 3-1 aufgeführt.

Tabelle 3-1: Arten der Verkehrsbeteiligung

	Abkürzung	Art der Verkehrsbeteiligung (Schlüsselnummer)
Personenkraftwagen	Pkw	Personenkraftwagen (21) Wohnmobile (22)
motorisiertes Zweirad	Mzr	Kraftrad mit Versicherungskennzeichen (01-04) Zweirädrige Kraftfahrzeuge (11, 12, 15)
Güterkraftfahrzeug	Gkfz	Lastkraftwagen (40-48) Sattelzugmaschine (51, 52) andere Zugmaschine (54,55) Lastkraftwagen mit Spezialaufbau (57,58)

Die folgende Übersicht enthält Mehrfachnennungen, da in einen Unfall mit PSE-Anprall verschiedenen Verkehrsbeteiligungsarten involviert sein können. Es zeigt sich deutlich, dass auf Streckenabschnitten außerhalb geschlossener Ortschaften der relative Anteil an Mzr mit PSE-Anprall zunimmt.

Der relative Anteil an Güterkraftfahrzeugen ist in PSE-Unfällen auf Autobahnen am höchsten, da das Verkehrsaufkommen von Gkfz auf BAB im Vergleich zum innerstädtischen Bereich und auf Außerortsstraßen (ohne BAB) deutlich höher liegt.

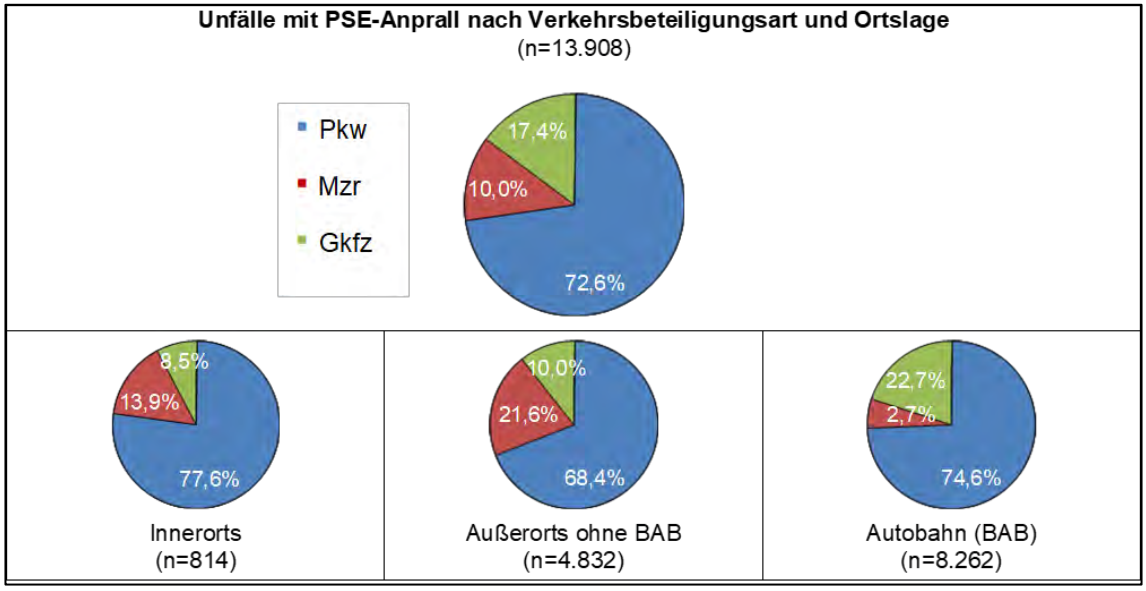


Abbildung 3-8: Unfälle mit PSE-Anprall nach Verkehrsbeteiligungsart und Ortslage, 2016

Die verunglückten Mzr-Aufsassen und Gkfz-Insassen weisen in Unfällen mit PSE-Anprall höhere Verletzungsschweren auf als Pkw-Insassen (Abbildung 3-9). Der Anteil getöteter Mzr-Aufsassen (Fahrer und Soziusse) unter allen Verletzten ist bei einem PSE-Anprall fast viermal so hoch wie bei Pkw-Insassen; bei den Schwerverletzten ist er mehr als doppelt so hoch.

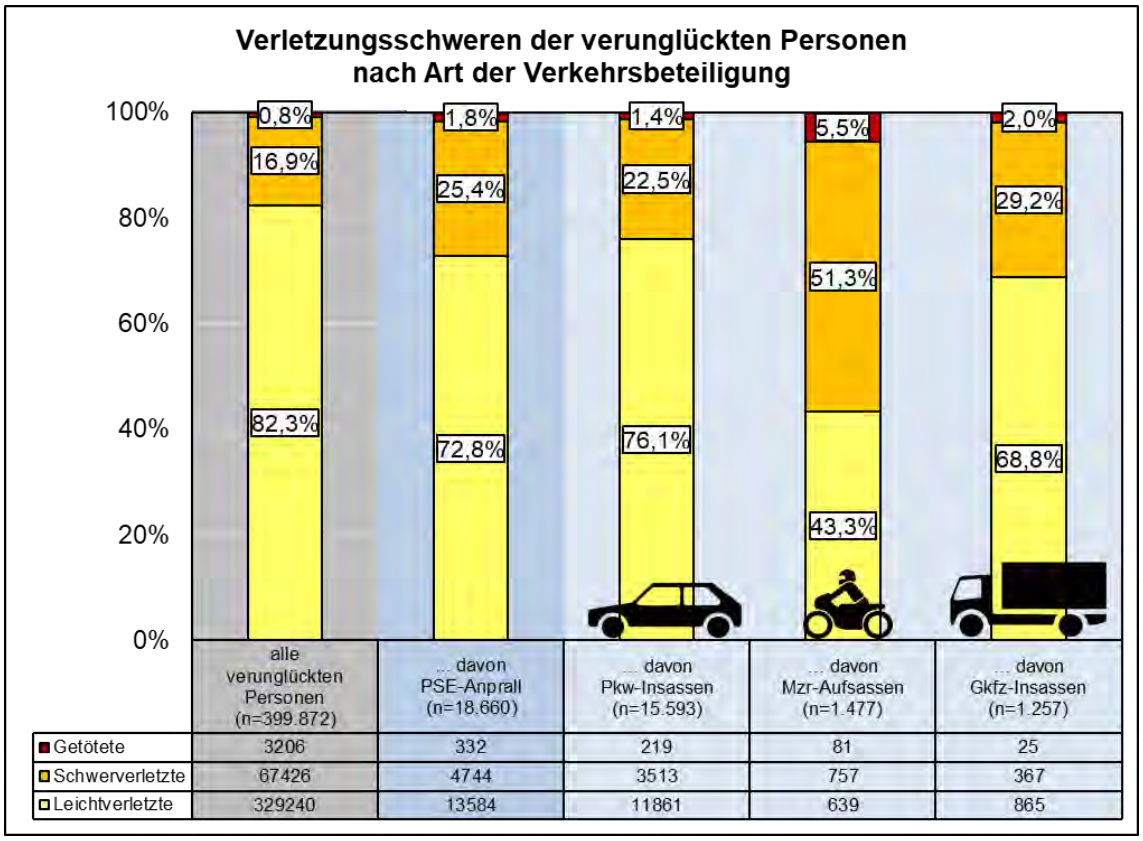


Abbildung 3-9: Verletzungsschwere nach Art der Verkehrsbeteiligung, 2016

Die Aufschlüsselung der Verletzungsschwere nach Ortslage zeigt, dass sich im innerörtlichen Unfallgeschehen mit PSE-Anprall keine wesentlichen Auffälligkeiten ergeben (Anhang A-1). Die geringe Anzahl an verunglückten Mzr-Aufsassen und Gkfz-Insassen ist für robuste Aussagen nicht ausreichend.

Auf Außerortsstraßen zeigt sich, dass die Verletzungsschweren von Pkw- und Gkfz-Insassen minimal höher sind als die aller verunglückten Personen in Deutschland. Für Mzr-Aufsassen wird deutlich, dass das Risiko für schwere oder tödliche Verletzungen doppelt so hoch ist (Anhang A-2).

Gleiches gilt für Autobahnunfälle, wobei hier die Anzahl an verletzten Mzr-Aufsassen zu gering für robuste Aussage ist. Demzufolge lassen sich nur Tendenzen ableiten und diese zeigen, dass jeder neunte Mzr-Aufsasse bei einem Autobahnunfall mit PSE-Anprall starb. Im Allgemeinen liegt die Verletzungsschwere von Insassen und Aufsassen (Pkw, Mzr, Gkfz) mit PSE-Anprall im Vergleich zum allgemeinen Verletzungsbild aller verunglückten Personen höher (Anhang A-3).

Anhand der vorangegangenen Betrachtungen zur Verletzungsschwere kann nicht unterschieden werden, ob die Beteiligten allein verunfallten oder nicht. Bei knapp der Hälfte aller PSE-Anpralle handelt es sich um Alleinunfälle (Abbildung 3-10). Die Analyse zeigt, dass mehr als vier Fünftel der von einem Mzr verursachten Unfälle mit PSE-Anprall Alleinunfälle sind. Demgegenüber sind bei etwa drei Viertel der von Gkfz verursachten Unfälle mit PSE-Anprall mindestens zwei Beteiligte involviert. Pkw-Alleinunfälle machen etwa die Hälfte der PSE-Unfälle mit Pkw-Beteiligung aus.

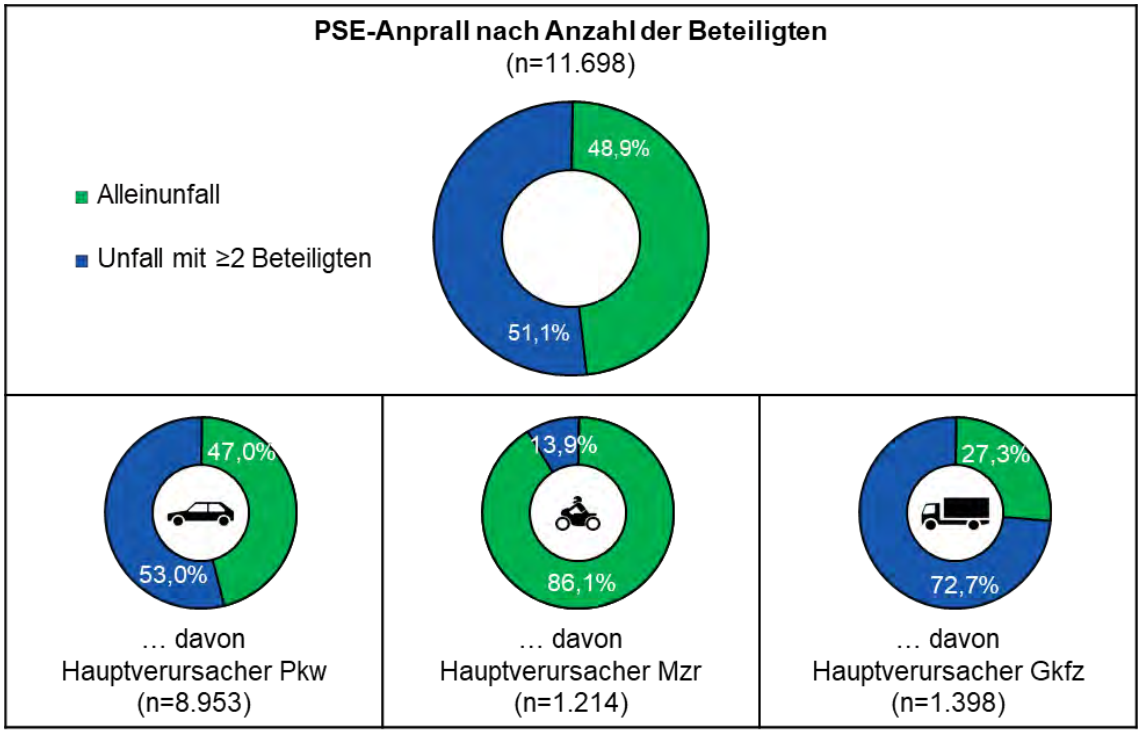


Abbildung 3-10: PSE-Anprall nach Anzahl der Beteiligten (oben) und nach Verkehrsbeteiligungsart verursachten Unfälle (unten), 2016

Wie bereits zu Beginn dieses Abschnitts beschrieben, kann für die deutsche Straßenverkehrsunfallstatistik nur ausgewertet werden, bei welchen Unfällen ein PSE-Anprall vorgelegen hat und welche Fahrzeuge (die ersten beiden Beteiligten) darin involviert sind. Es ist nicht bekannt, welches der Fahrzeuge den PSE-Anprall hatte. Eine Ausnahme stellen Alleinunfälle dar, da es nur ein beteiligtes Fahrzeug gibt. Daher werden im nächsten Schritt die Verletzungsfolgen der verschiedenen Verkehrsbeteiligungsarten im Alleinunfall untersucht, um Tendenzen zum möglichen Schutz- oder Gefährdungspotential von PSE zu identifizieren.

Im allgemeinen Verkehrsunfallgeschehen weisen Alleinunfälle eine durchschnittlich höhere Verletzungsschwere auf als Unfälle mit mehreren Beteiligten. Das ist durch die Unfallmechanismen aufgrund des häufigen Abkommens von der Fahrbahn und einer Kollision mit Objekten im Seitenraum begründet. Bei motorisierten Zweirädern kommt zusätzlich noch der Sturz auf die Fahrbahn und

häufig ein Abkommen des Aufsassen in den Seitenraum hinzu. In Deutschland sind etwa 19 % aller polizeilich erfassten Unfälle mit Personenschäden Alleinunfälle. Bei Unfällen mit getöteten Verkehrsteilnehmern haben sie sogar einen Anteil von etwa 28 %.

Die Verteilungen der Verletzungsschweren im Alleinunfall allgemein und mit PSE-Anprall sind für die verschiedenen Verkehrsbeteiligungsarten in Abbildung 3-11 dargestellt. Bei Alleinunfällen mit PSE-Anprall stellen sich im Vergleich zu allen verunglückten Personen im Alleinunfall innerhalb derselben Verkehrsbeteiligungsart folgende Veränderungen in der Verletzungsschwere ein:

- Pkw-Insassen niedrigere Verletzungsschwere im Alleinunfall mit PSE-Anprall
- Mzr-Aufsassen höhere Verletzungsschwere im Alleinunfall mit PSE-Anprall
- Gkfz-Insassen höhere Verletzungsschwere im Alleinunfall mit PSE-Anprall

Es zeigt sich, dass Mzr-Aufsassen bei Alleinunfällen und PSE-Anprall besonders gefährdet sind. Als ungeschützte Verkehrsteilnehmer besitzen motorisierte Zweiradnutzer außer dem Helm und der Schutzkleidung keine Möglichkeit, sich mit passiven Sicherheitsmaßnahmen vor Unfall- und Verletzungsfolgen zu schützen. Insbesondere bei punktuellen Krafteinleitungen (z.B. Anpralle an Bäume, Pfähle, Masten, Verkehrszeichen oder an Schutzplankenpfosten) steigt das Risiko für die Mzr-Aufsassen deutlich, sich schwer oder tödlich zu verletzten.

Demgegenüber weisen Pkw-Alleinunfälle mit PSE-Anprall eine geringere Verletzungsschwere auf als alle verunglückten Personen im Pkw-Alleinunfall. Dies ist ein deutliches Indiz dafür, dass die Kombination aus der Pkw-Karosserie und PSE zu einer besseren Energieabsorption durch die jeweiligen Crashstrukturen führt, wodurch geringere Belastungen auf den Insassen übertragen werden. Zusätzliche fahrzeugeigene Rückhaltesysteme (Sicherheitsgurte, Airbags) reduzieren die Verletzungsschwere weiter.

Für Güterkraftfahrzeuge sind die Verteilungen der Verletzungsschweren in Alleinunfällen mit und ohne PSE-Anprall ähnlich, wobei der Anteil Getöteter mit einer PSE-Anprall etwa ein Drittel höher ist als ohne, wenngleich auf Basis geringer Fallzahlen. Daraus kann allerdings noch nicht unmittelbar geschlossen werden, dass der Anprall an eine PSE für Insassen von Gkfz gefährlicher als ohne PSE sei. Anpralle gegen PSE können beispielsweise auch Ausdruck eines erhöhten Anteils von Alleinunfällen auf Autobahnen sein, die mit einem höheren Geschwindigkeitsniveau und allein dadurch bedingt höherem Verletzungsrisiko einhergehen.

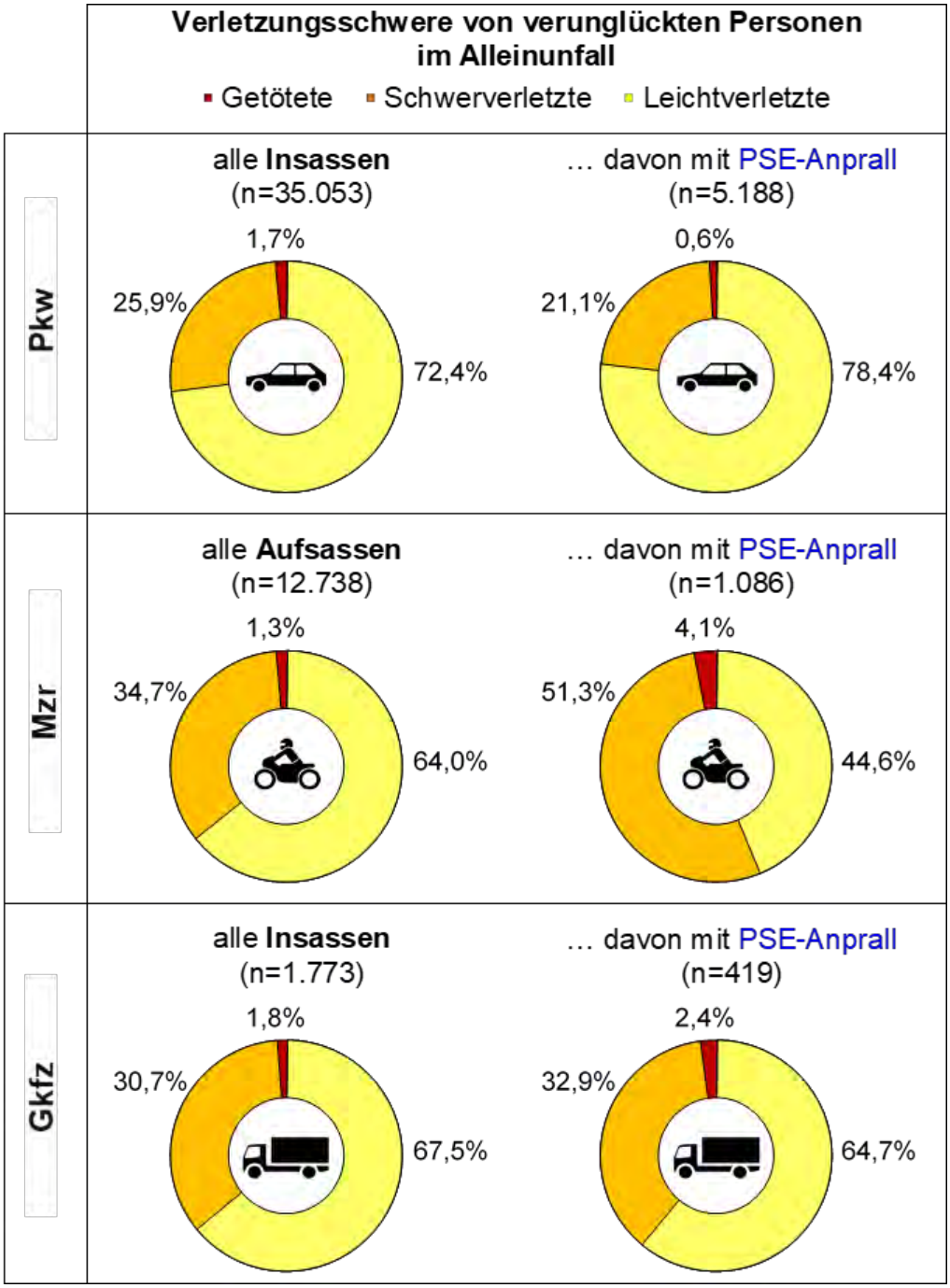


Abbildung 3-11: Verletzungsschwere von verunglückten Personen im Alleinunfall, 2016

Die Sonderauswertung der amtlichen Verkehrsunfallstatistik bezüglich des Unfalltyps (Abbildung 3-12) zeigt, dass die Hälfte der PSE-Unfälle durch den Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug ausgelöst werden (Unfalltyp 1: Fahrunfall). Des Weiteren bestätigt die Verteilung der Unfalltypen, dass ein Drittel der Unfälle mit Anprall an eine Schutzeinrichtung im Längsverkehr geschehen. Unfälle durch ruhenden Verkehr und Überschreiten-Unfälle sind im Unfallkollektiv von PSE-Anprallen mit Personenschaden deutlich seltener oder nicht existent.

Im Vergleich zu Unfällen mit Anprall gegen Schutzeinrichtungen sind Längsverkehrs- und Fahrunfälle auch relevante Unfalltypen im allgemeinen Unfallgeschehen. Allerdings steigen hier die prozentualen Anteile typischer Innerorts-Szenarien wie Abbiegeunfälle (Unfalltyp 2) oder Einbiegen-/Kreuzen-Unfälle (Unfalltyp 3).

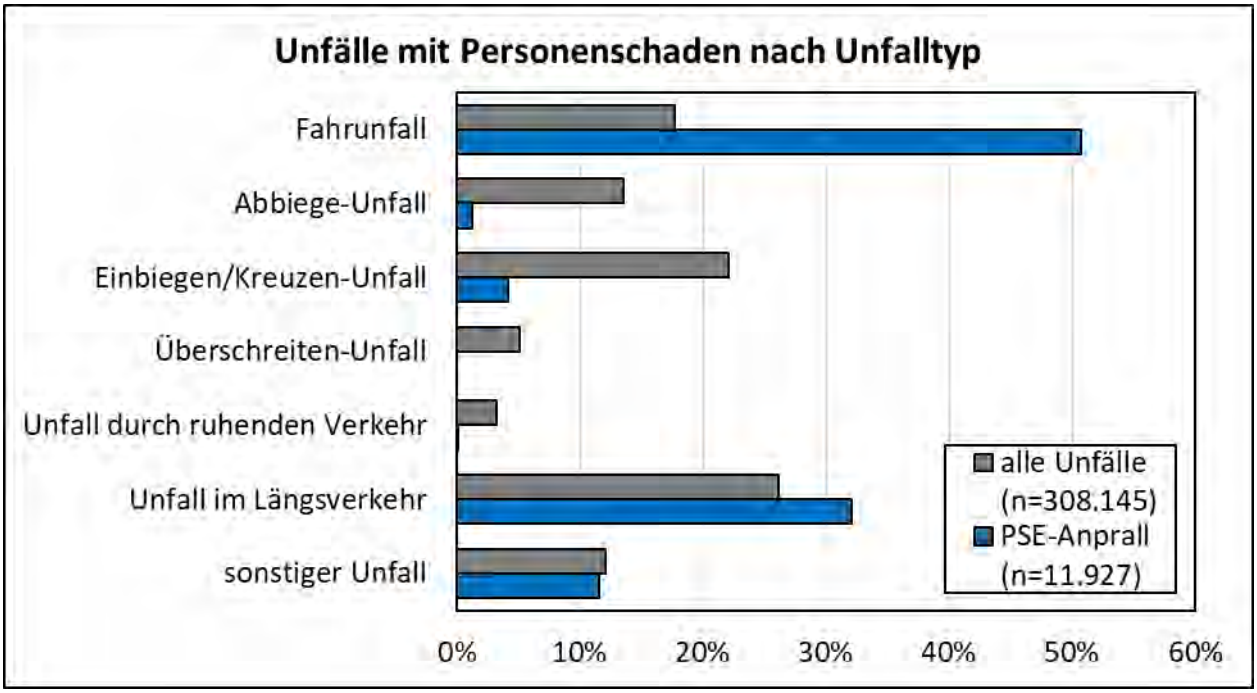


Abbildung 3-12: Unfälle mit Personenschaden nach Unfalltyp, 2016

Die häufigsten Unfalltypen bei PSE-Anprallen spiegeln sich auch in den Unfallarten wider. Resultierend aus dem hohen Anteil von Fahrunfällen stellen Abkommensunfälle die relevantesten Unfallarten dar, wobei mehr Hauptunfallverursacher nach rechts von der Fahrbahn abkommen als nach links, vermutlich als Folge des Rechtsverkehrs in Deutschland. Neben den Fahrunfällen sind auch die Längsverkehrsunfälle mit PSE-Anprall in den Unfallarten repräsentiert, konkret durch Zusammenstöße mit vorausfahrenden, entgegenkommenden, wartenden oder seitlich in gleicher Richtung fahrenden Fahrzeugen.

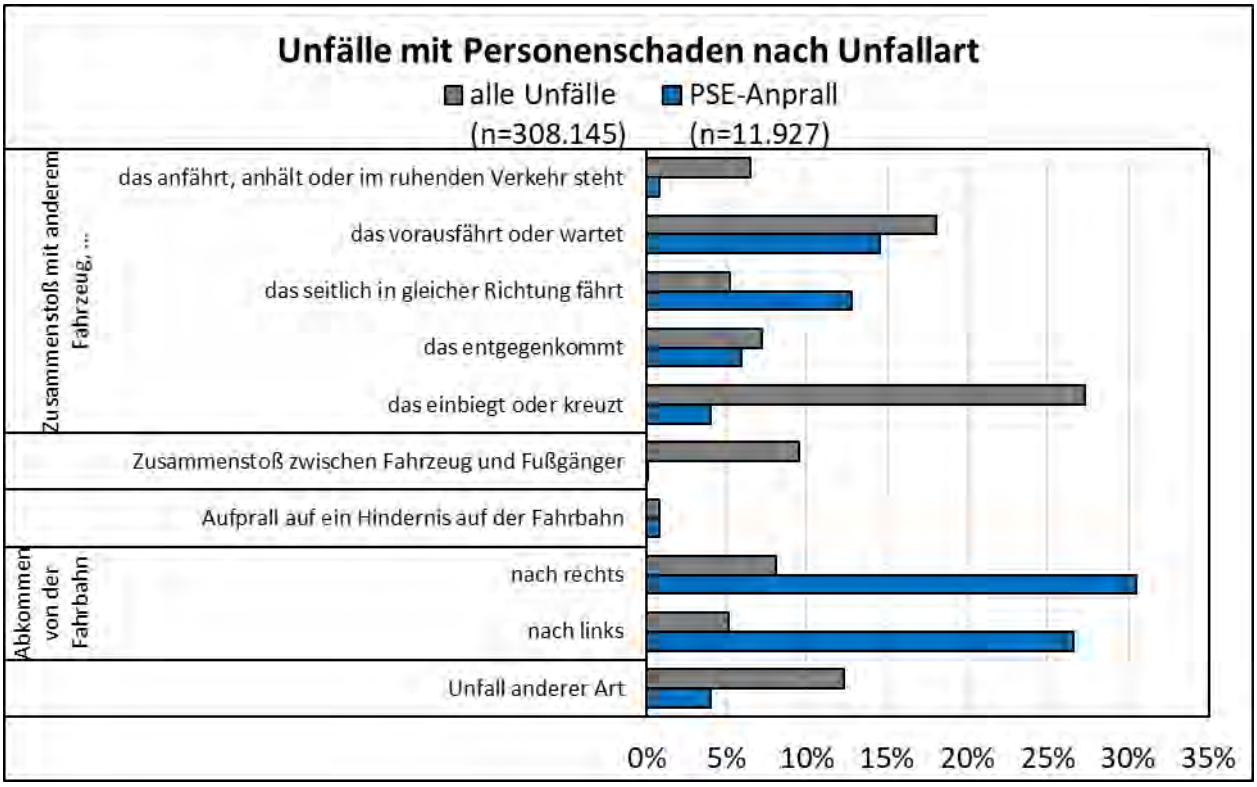


Abbildung 3-13: Unfälle mit Personenschaden nach Unfallart, 2016

3.2.3. Auswertung der Unfallursachen

In Abbildung 3-14 sind die Hauptunfallursachen von Unfällen mit PSE-Anprall dargestellt. Grundlage der Betrachtung bildet die GIDAS Datendank mit 1.151 Unfällen und Anprall an eine Schutzeinrichtung, wobei zwischen Alleinunfällen und Unfällen mit mindestens zwei Beteiligten unterschieden wird. Unabhängig von der Beteiligtenanzahl ist die Geschwindigkeit die häufigste Hauptunfallursache für Unfälle mit Anprallen an Schutzeinrichtungen in GIDAS. Die „Geschwindigkeit“ ist eine Zusammenführung der Kategorien „nicht angepasste Geschwindigkeit“ mit gleichzeitigem Überschreiten der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und unangepasster Geschwindigkeit in anderen Fällen (bspw. bei Glatteis).

Neben der „Geschwindigkeit“ sind „andere Fehler beim Fahrzeugführer“ – zu denen Ablenkung und Fahrfehler zählen – und die „Verkehrstüchtigkeit“ (bspw. Übermüdung, Fahren unter Alkohol- oder Drogeneinfluss, sonstige körperliche/geistige Mängel) bedeutende Hauptunfallursachen für PSE Unfälle.

Im Alleinunfall haben die drei genannten Hauptunfallursachen eine höhere Relevanz als bei Unfällen mit mehreren Beteiligten. Andererseits weisen diese Unfallkonstellationen typische Unfallursachen auf, die charakteristisch sind für Unfälle im Längsverkehr (Überholen, Nebeneinanderfahren, Abstand) und kreuzenden Verkehr.

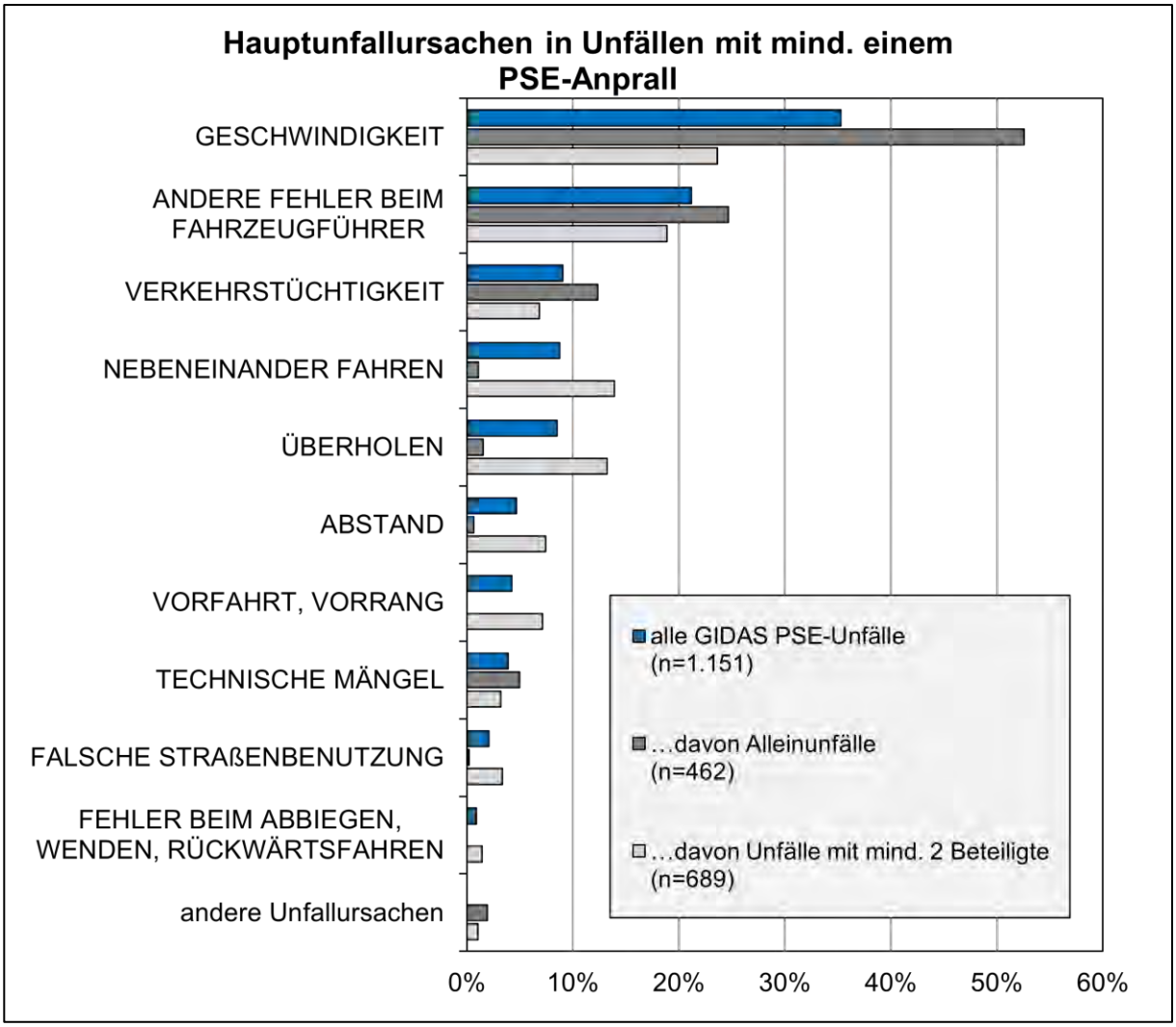


Abbildung 3-14: Hauptunfallursachen von PSE Unfällen (vollständig dokumentierte GIDAS Unfälle seit 2005)

3.2.4. Analyse von Straßendatenbanken

Räumliche Verschneidung von Unfalldaten mit dem Straßennetz

Als Grundlagen für die Untersuchungen werden die in 3.1.2 erwähnten Daten der Straßeninformationsbanken (SIB, Stand Mai 2018) in Verbindung mit folgenden Unfalldaten betrachtet:

- EUSka Unfalldaten Sachsen für die Jahre 2015 bis 2017
- EUSka Unfalldaten Brandenburg für die Jahre 2014 bis 2017

Die Unfalldaten enthalten unter anderem folgende Angaben, die für die nachfolgenden Berechnungen erforderlich sind:

- eindeutiger Schlüssel (Spalte „Fall“),
- Angabe der Fahrtrichtung und
- Koordinaten (Längengrad und Breitengrad).

Die Unfalldaten liegen für Autobahnen, Bundes-, Landes-/Staats-, Kreis- und Gemeindestraßen vor (Straßenklasse 1 bis 5). Aufgrund von fehlenden Straßenausstattungsdaten für Gemeindestraßen in der SIB können diese nicht mit den Unfalldaten verknüpft werden.

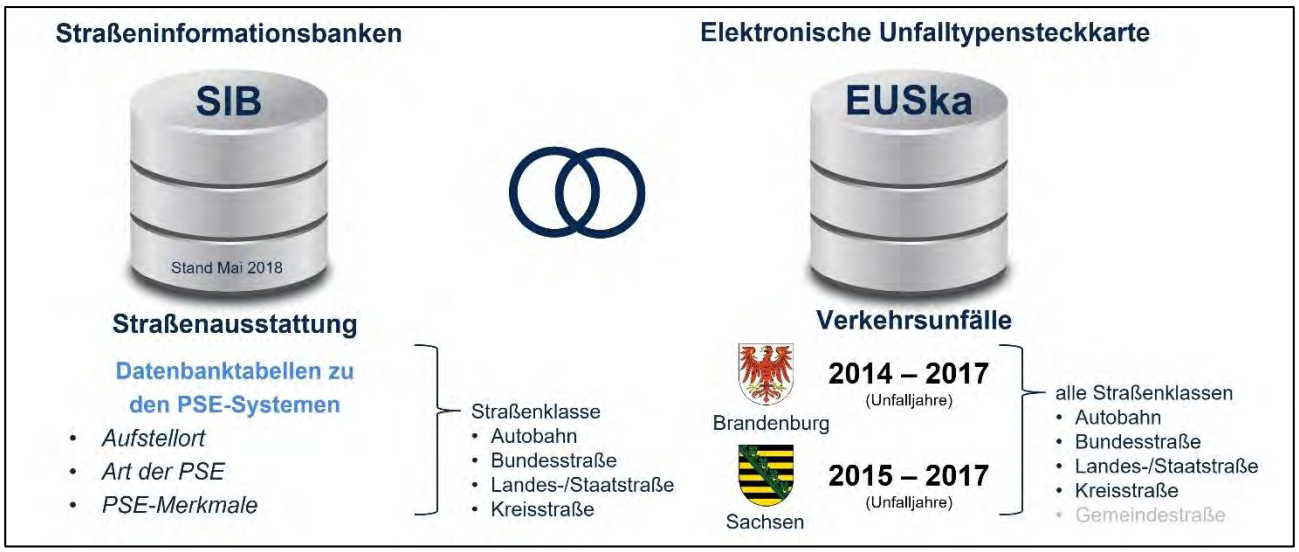


Abbildung 3-15: Methodik zur Analyse von Straßendatenbanken

Mittels räumlicher Datenbankabfragen – implementiert in einem Shell-Skript – wird schrittweise für jeden Netzknotenabschnitt geprüft, ob sich Unfälle auf diesem Abschnitt ereigneten. Dazu werden folgende zwei Kriterien formuliert:

- die Straßenklasse der Straße entspricht der Straßenklasse aus den Unfalldaten und
- der Unfall hat einen maximalen Abstand von 50 m zur Straßenachse (Polylinie der grafischen Relation).

Die Unfälle erhalten somit Angaben zum Netzknotenabschnitt (VNK - NNK) und zur Station (nk_station). Insgesamt kann für 253.391 Unfälle der Netzbezug berechnet werden (Straßenklasse 1 bis 4). Bei 5.659 Unfällen (ca. 2 %) kann kein Netzknotenabschnitt zugeordnet werden.

Hierfür können folgende Gründe angeführt werden:

- Die Unfalldaten umfassen einen Zeitraum von bis zu vier Jahren. Das Straßennetz kann sich innerhalb dieses Zeitraums ändern (z.B. durch Auf- oder Abstufungen in der Baulast). Die Straßenklasse der Unfalldaten stimmt dann mit der Straßenklasse der Straße nicht mehr überein.
- Die Angabe der Koordinaten der Unfälle ist ungenau oder falsch. Wenn der Unfall einen Abstand von mehr als 50 m rechtwinklig zur Straße hat, wird er nicht mehr dieser zugeordnet.
- Die Angabe der Straßenklasse bei den Unfällen ist falsch.

Verschneidung der Unfalldaten mit den Daten der PSE-Systeme

Anhand des ermittelten Netzbezugs der Unfälle (VNK, NNK, nk_station) und der Angabe zur Fahrtrichtung der Unfälle werden die Merkmale der PSE mit den Unfalldaten direkt verknüpft. Die Angaben zu den PSE werden getrennt nach dem rechten und linken Fahrbahnrand aufgeführt. Die Angabe zum rechten oder linken Fahrbahnrand bezieht sich dabei stets auf die „Fahrtrichtung des Unfalls“. Die Merkmale der PSE und deren Ausprägung sind der „ASB 2009 – Anweisung Straßeninformationsbank – Teilsystem-Bestandsdaten“, Seite 67 bis 70) zu entnehmen.

Limitationen

- „Schutzplanke“ umfasst im Sinne der polizeilichen Kodierung auch Betonschutzwände und damit alle PSE neben der Fahrbahn.
- Das Merkmal „Anprall an Schutzplanke“ ist ein Unfallmerkmal. Das heißt, es kann nicht differenziert werden, welcher Beteiligte in welcher Kollision mit einer PSE kollidierte.
- Folgende Merkmale können in Unfällen mit Personenschaden nicht differenziert werden:
  - Ursache der Verletzungsschwere (z.B. Kollision mit einem Objekt oder mit einem anderen Beteiligten)
  - Verletzungsschwere nach Beteiligten (nur Anzahl der verletzten Personen im Unfall)

  ➔ Die eineindeutige Zuordnung der Unfallkategorie ist nur bei Alleinunfällen möglich.
- Mehrfachnennung von PSE pro Unfall (siehe Tabelle 3-2):
  - am Unfallstandort sind zwei PSE-Systeme in der SIB Datenbank vermerkt (Übergangskonstruktionen, linke und rechte Schutzeinrichtung und Weitere)
  - Erneuerung des PSE-Systems am Unfallstandort, ohne dass der ältere Datensatz in der SIB Datenbank gelöscht wurde

Tabelle 3-2: Überblick zu Mehrfachnennungen von PSE pro Unfall

	Brandenburg (Unfalljahre: 2014-2017)	**Sachsen** (Unfalljahre: 2015-2017)
Anzahl an Unfällen (insgesamt)	159.804	92.330
Anzahl an Unfällen mit PSE-System am Standort	34.568	16.192
…. davon Unfälle mit Mehrfachnennung	9.053	241
… älterer Datensatz nicht gelöscht	2.655	84
… 2 PSE-Systeme am Unfallstandort	6.398	157

Ergebnisse

Der Überblick zu den PSE-Systemen nach den Straßenklassen zeigt die relativen Verteilungen in Abhängigkeit von den Streckenlängen und den Aufstellorten (Abbildung 3-16). Sowohl in Brandenburg als auch in Sachsen ist die Hälfte der Autobahnkilometer durch eine PSE am rechten und/oder

am linken Fahrbahnrand gesichert. Gleichzeitig ist fast jeder Autobahnkilometer durch eine Mittelschutzplanke (ohne Rampen, das heißt ohne Auf- und Abfahrten sowie Überfahrten an Autobahnen) geschützt (in Sachsen zu 92 %, in Brandenburg zu 98 % der Streckenkilometer). Des Weiteren zeigt sich, dass der relative Anteil an gesicherten Streckenabschnitten mit absteigender Straßenklassenkategorie sinkt.

	Brandenburg			Sachsen		
Autobahn	Streckenlänge	Mittelstreifen	Seitenraum	Streckenlänge	Mittelstreifen	Seitenraum
... ohne Rampen	855 km	98,4 %	55,5 %	574 km	92,4 %	51,0 %
... mit Rampen*	1.405 km	62,0 %	60,1 %	873 km	61,0 %	56,0 %
Bundesstraßen	2.743 km	3,6 %	14,8 %	2.322 km	4,2 %	12,6 %
Landes-/Staatsstraßen	5.688 km	0,4 %	4,4 %	4.798 km	0,3 %	6,7 %
Kreisstraßen	2.968 km	0 %	0,3 %	5.761 km	0 %	1,9 %

*Auffahrten, Abfahrten und Überfahrten

Abbildung 3-16: PSE-Systeme nach Straßenklasse

Aus den Daten der SIB wird ersichtlich, dass in beiden Bundesländern auf Autobahnen häufiger Distanzschutzplanken verbaut werden. Auf Außerortsstraßen (ohne Autobahn) ist der Anteil an ESP höher (Abbildung 3-17). Im Mittelstreifen (insbesondere auf Autobahnen) sind häufig PSE-Systeme mit höherer Aufhaltestufe (zur Verhinderung des Durchbrechens von schweren Fahrzeugen) installiert worden. Am Fahrbahnrand sind überwiegend ESP verbaut.

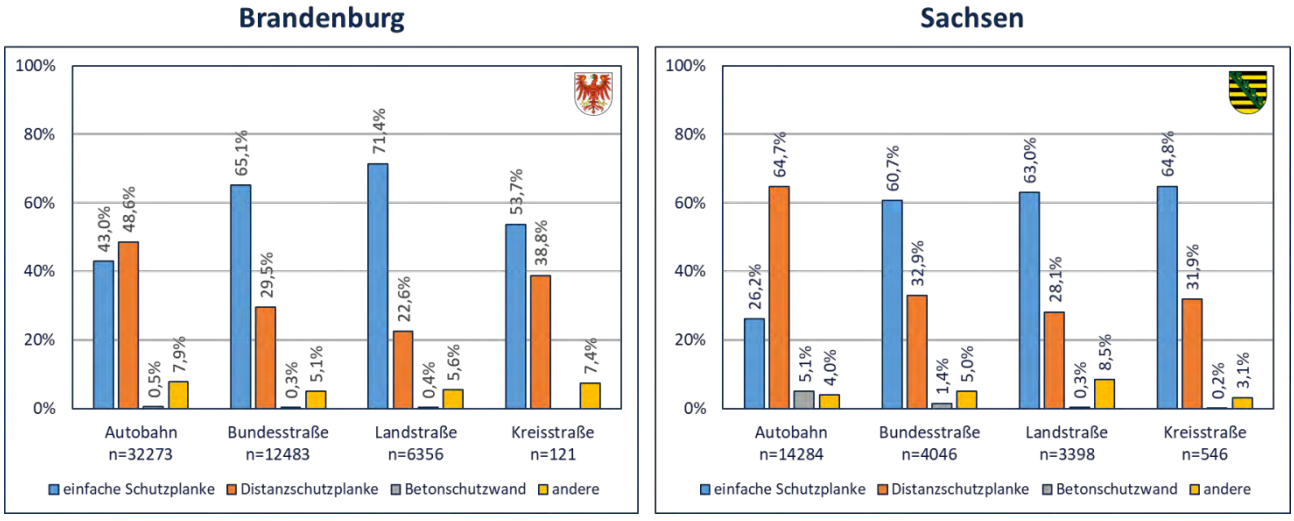


Abbildung 3-17: Unfallstellen mit PSE-Information nach Straßenklasse und Art

(Mehrfachnennung möglich – pro Fahrtrichtung kann links und rechts jeweils eine PSE montiert sein)

In Brandenburg wird keine gesonderte Datenbank für Betonschutzwände geführt. Sie werden in der Datenbank als Schutzplankensystem kodiert. Die Selektion der Systeme erfolgt über das Material (z.B. Stahl oder Beton). Die Angaben der Anteile von Betonschutzwänden in den Straßeninformationsbanken unterliegen allerdings erheblichen Unsicherheiten. Aus diesem Grund können keine belastbaren Aussagen zum Einsatz von Betonschutzwänden getroffen werden. Beispielsweise können

die Daten nicht für einen Ländervergleich verwendet werden. Diese Informationen aus der Datenbank werden daher nicht für weitere Betrachtungen herangezogen.

Durch die Verschneidung der SIB und EUSka Daten lassen sich circa 250.000 Unfälle auswerten, wobei jeder fünfte Unfall Informationen zu einem PSE-System enthält. Abbildung 3-18 zeigt, dass für Autobahnen die meisten Informationen zu PSE-Systemen vorliegen und die meisten Unfälle registriert sind. Je nach Straßenklasse liegt der relative Anteil an Unfällen mit PSE-Informationen und Personenschaden (PS) bei 10 % bis 15 %.

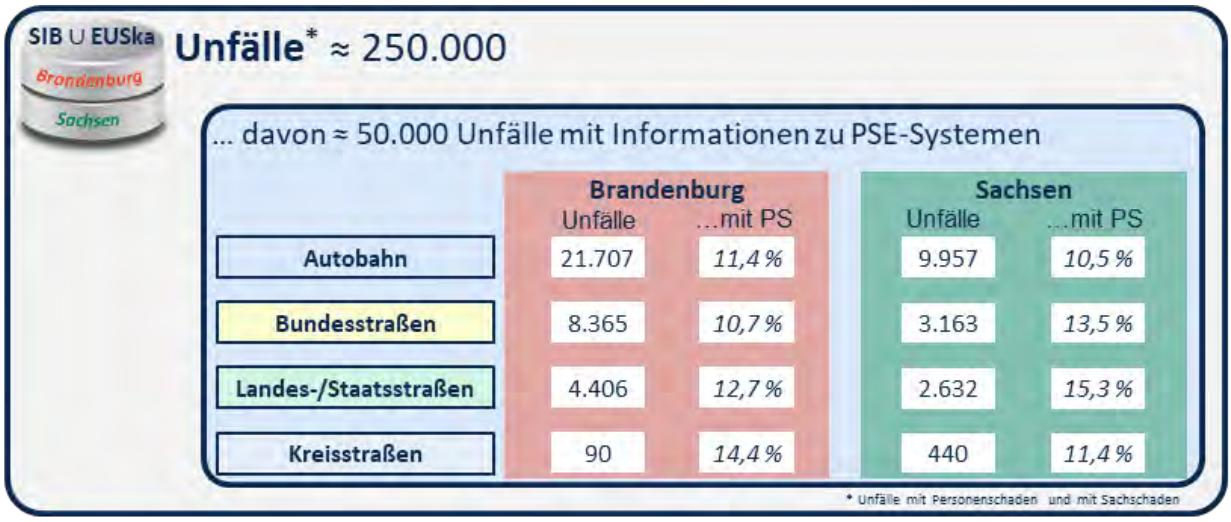


Abbildung 3-18: PSE-Systeme in Unfällen nach Straßenklasse

Die Einschränkung auf Objektkollisionen laut Angabe der Polizei liefert rund 41.000 Unfällen, von denen 39 % solche mit Schutzplankenanprall sind (Abbildung 3-18). Der Anteil von Unfällen mit Personenschaden unter Unfällen mit PSE-Anprall ist mit 16 % deutlich geringer als der Anteil von gut 50 % unter Unfällen mit Anprall an einen Baum.

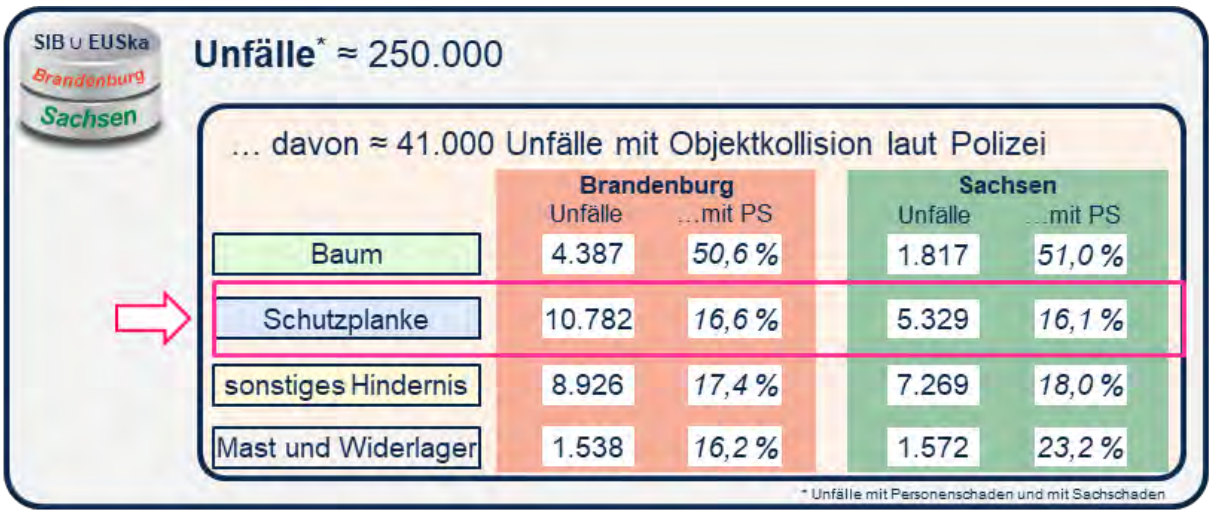


Abbildung 3-19: Unfälle mit Objektkollision

Um Auffälligkeiten bei den Schutzplankenarten zu identifizieren, werden die polizeilich erfassten Unfälle mit Schutzplankenanprall hinsichtlich der Unfallkategorie ausgewertet. (Abbildung 3-20)

Aufgrund der Verschneidung von SIB- und EUSka Daten sind Mehrfachnennungen von PSE-Systemen möglich, da pro Fahrtrichtung sowohl links als auch rechts eine Schutzplanke stehen kann.

Darüber hinaus spielt auch der Aktualisierungsgrad der SIB eine Rolle, da beispielweise ältere PSE-Systeme nach Modernisierungsmaßnahmen häufig nicht aus der Datenbank entfernt werden. Des Weiteren entspricht die Unfallkategorie nur im Alleinunfall der maximalen Verletzungsschwere beim Beteiligten. In Unfällen mit mehr als einem Beteiligten ist die Zuordnung der Verletzungsschwere zum Beteiligten als auch zum PSE-Anprall nicht möglich.

Unabhängig von der Schutzplankenart (z.B. ESP, Distanzschutzplanke) zeigen PSE-Anpralle einen hohen Anteil an Unfällen ohne Personenschaden. Während Baumkollisionen in jedem zweiten Unfall mit einem Personenschaden einhergehen, tritt nur in jedem sechsten PSE-Anprall Personenschaden ein.

Die höchsten Verletzungsschweren treten im Zusammenhang mit *„anderen“* PSE-Systemen auf (z.B. Super-Safety-Rails). Aufgrund der schwierigen Differenzierung zwischen Stahlschutzplanke und Betonschutzwand sind in der SIB die Anteile der Betonschutzwände zu gering für eine robuste Aussage. In Sachsen zeigt sich jedoch der Trend, dass in Unfällen mit Betonschutzwänden die Verletzungsschweren höher liegen als bei Unfällen mit ESP oder Distanzschutzplanken.

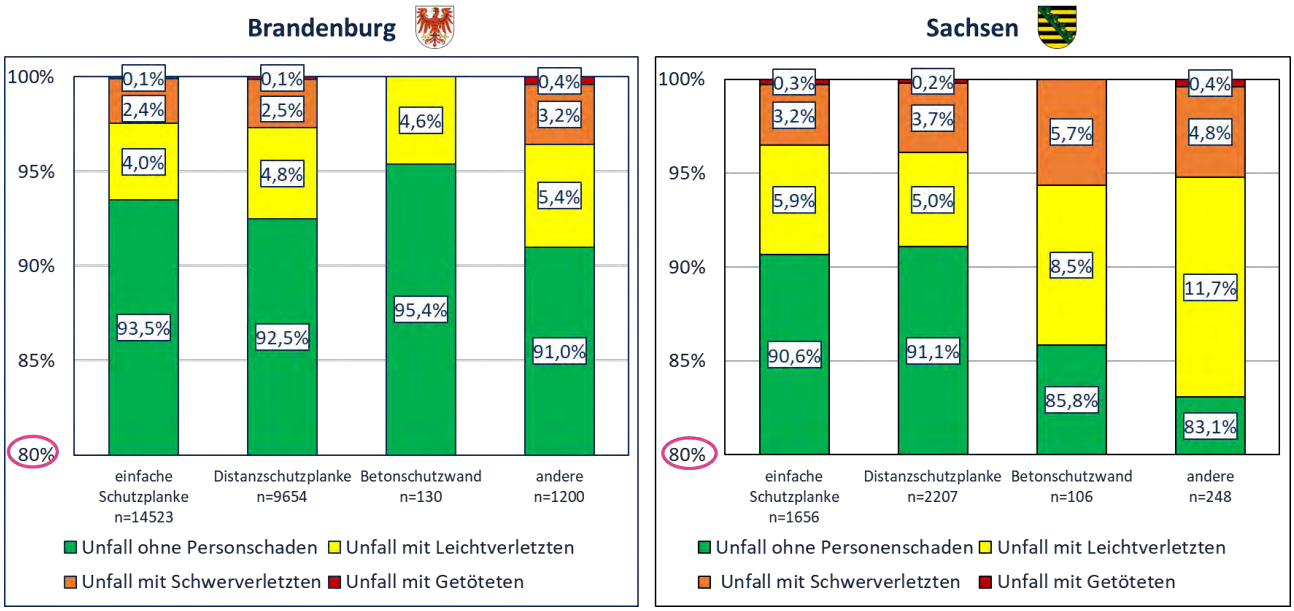


Abbildung 3-20: Unfälle mit PSE-Anprall nach Art der PSE* und Unfallkategorie**

***Mehrfachnennung möglich – pro Fahrtrichtung kann links und rechts jeweils eine PSE montiert sein**
****max. Verletzungsschwere im Alleinunfall / keine Differenzierung der Verletzungsschwere nach Kollision**

Die Ausstattungsquoten mit PSE-Systemen sind auf den Autobahnen am höchsten und sinken mit absteigender Straßenklassenkategorie. Auf Autobahnen werden häufiger Distanzschutzplanken installiert, wohingegen auf Außerortsstraßen (ohne BAB) eher die ESP verbaut wird. Unabhängig von deren Aufstellort weisen beide Systeme annähernd dieselben Verletzungsschweren (nach Unfallkategorie) auf.

Die Datenbanken von SIB und EUSka liefern in Kombination keine belastbaren Aussagen bezüglich der Schutzwirkung der PSE-Systeme in Verkehrsunfällen. Für eine genauere Beurteilung ist die Auswertung von In-Depth Unfalldaten notwendig. Neben ausführlichen Informationen zu den Beteiligten (z.B. Verletzungsschweren der Insassen) sollte eine Erhebung detaillierter Unfalldaten auch Informationen zur Infrastruktur und zu Unfallabläufen enthalten.

3.3. Anprallkonstellationen von Pkw-Unfällen

3.3.1. Grundgesamtheit

Alle polizeilich gemeldeten Verkehrsunfälle in Deutschland werden entsprechend der VwV-StVO zu § 44 dokumentiert und in der amtlichen Verkehrsunfallstatistik des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS) erfasst. Allerdings reicht diese Datengrundlage für detaillierte Analysen zu PSE-Anprallen nicht aus. Für eine Tiefenanalyse im Sinne des Forschungsvorhabens muss auf sogenannte In-Depth Unfalldatenbanken zurückgegriffen werden. Diese enthalten zwar geringere Fallzahlen, allerdings zeichnet sich deren Dokumentation durch eine wesentlich höhere Datentiefe aus.

Für die detaillierte Analyse von Verkehrsunfalldaten mit Personenschaden und PSE-Anprall wird die GIDAS Datenbank mit dem Datenstand von Sommer 2021 herangezogen, welche zum Zeitpunkt der Datenauswertung etwa 42.000 Unfälle mit Personenschaden enthält. (Abbildung 3-21)

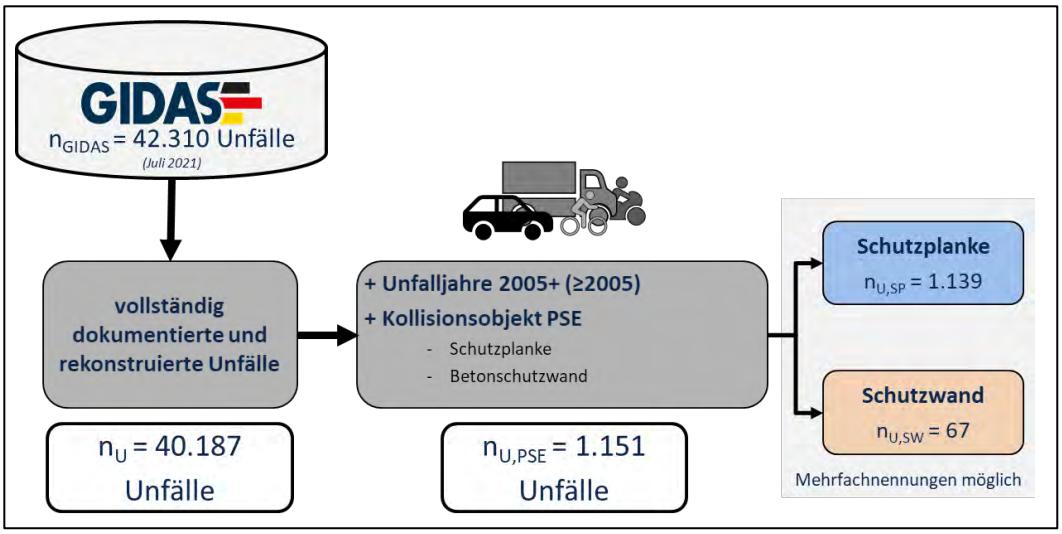


Abbildung 3-21: Auswahlkriterien der PSE-Unfälle in GIDAS

Unter Berücksichtigung der Auswahlkriterien ergibt sich für Unfälle mit Kontakt an Schutzeinrichtungen in GIDAS seit 2005 eine Gesamtanzahl an Unfällen von 1.151, in denen 1.309 Fahrzeuge (Pkw, Mzr, Gkfz, Bus) mindestens einen Anprall an eine PSE haben. Insgesamt sind 1.749 PSE-Anpralle in den oben genannten Unfällen enthalten. (Abbildung 3-22)

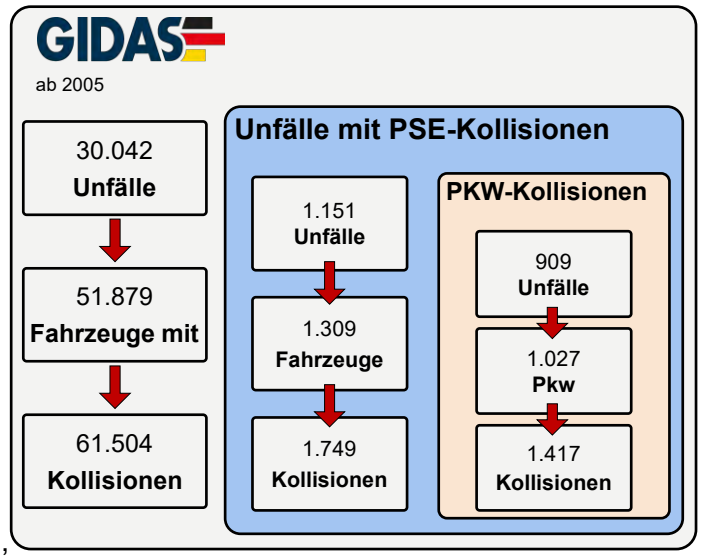


Abbildung 3-22: Anzahl an Unfällen, Fahrzeugen, Kollisionen in GIDAS

Der Fokus für die Tiefenanalyse in GIDAS wird nachfolgend auf Pkw-Anpralle gelegt. Daraus ergeben sich 909 Unfälle, in denen 1.027 Pkw einen PSE-Anprall aufweisen.

Für die GIDAS Auswertung des Pkw-Unfallgeschehens mit PSE-Anprall und die daraus resultierenden Anprallkonstellationen wird zunächst keine Unterscheidung zwischen Schutzplanken- und Schutzwandkollision angestrebt. Eine detaillierte Analyse zu Unfällen mit Schutzwandanprall enthält Abschnitt 3.3.6.

3.3.2. Anprallkonstellationen

Auf Basis verschiedener Anprallparameter aus der GIDAS Datenbank werden eindimensionale Häufigkeitsverteilungen erstellt, um die Anprallkonstellationen näher zu charakterisieren. Hauptfokus der Auswertung liegt dabei jeweils auf der ersten Kollision des Pkw mit der Schutzeinrichtung (in Unfällen, in denen Pkw mehrfach mit einer PSE kollidieren).

Die Hauptstoßrichtung des wirkenden Stoßimpulses wird über die erste und zweite Stelle der Collision Deformation Classification (CDC) [44] beschrieben. Abbildung 3-23 zeigt, dass bei vier Fünftel der betroffenen Pkw die Stoßkraft direkt von vorn oder schräg von vorn auf den Schwerpunkt des Fahrzeuges wirkt (285° – 75°), wobei der Anteil von schräg vorn links gegenüber schräg vorn rechts überwiegt. Krafteinwirkungen von hinten, oder nahezu orthogonal von rechts oder links weisen nur geringe Anteile auf.

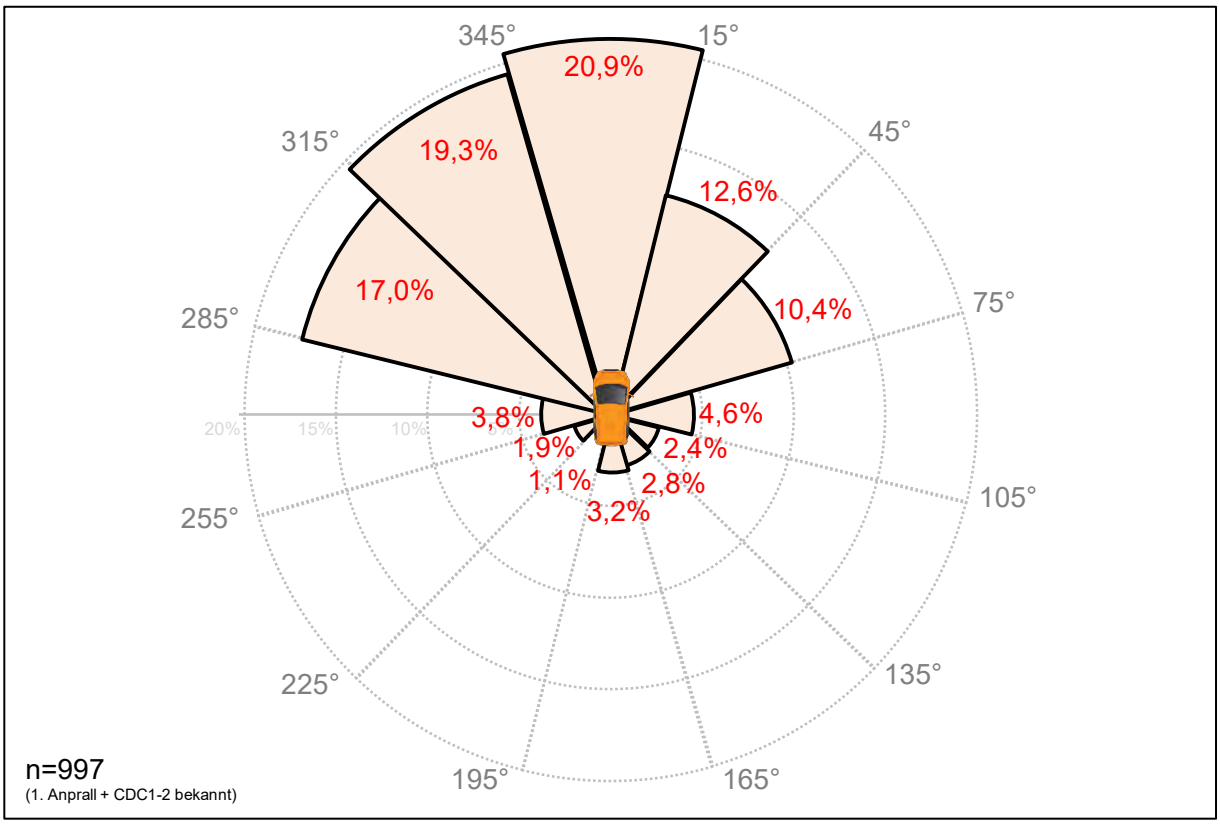


Abbildung 3-23: Richtung des wirkenden Stoßimpulses (CDC1-2)

Allerdings lässt die Verteilung der Stoßimpulse über den CDC keine eindeutige Zuordnung der Anprallseite zu. Daher werden die Primärkollisionen der Pkw mit der PSE nach der Anprallseite am Fahrzeug (3. Stelle im CDC) charakterisiert (Abbildung 3-24).

Die häufigste Anprallseite am Pkw beim Anprall an eine PSE ist die Front mit zwei Fünftel aller (Primär-) Kollisionen. Etwa jeder vierte Anprall findet linksseitig am Pkw statt. Demgegenüber wird die rechte Fahrzeugseite nur bei jeder fünften Erstkollision beschädigt. Folglich ist die linke Seite

1,3-mal häufiger betroffen als die rechte Fahrzeugseite. Die restlichen Anteile verteilen sich auf Fahrzeugheck, -dach und -unterboden. Allerdings ist auffällig, dass der relative Anteil an Primärkollisionen zwischen Unterboden und Schutzeinrichtung im Vergleich zur gesamten GIDAS Datenbank (CDC3 = Unterboden: 0,2 %) etwa 14-mal höher ist. Eine Kollision am Unterboden findet vor allem beim Auffahren auf die Schutzeinrichtung statt.

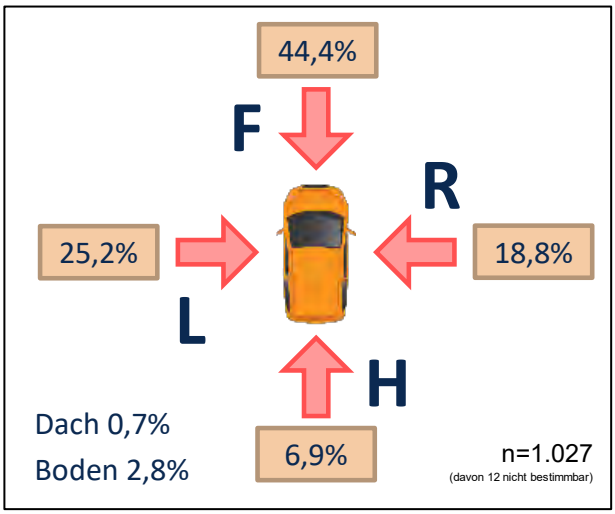


Abbildung 3-24: Anprallseite am Pkw (CDC3)

Die Kollisionskonstellationen werden entscheidend durch den Kollisionswinkel mit der Schutzeinrichtung charakterisiert. Der Kollisionswinkel ist dabei als Winkel zwischen dem Fahrzeuggeschwindigkeitsvektor und dem Fahrbahnrand beziehungsweise der dahinterstehenden PSE definiert. Aufgrund der Fahrzeugsymmetrie werden in Abbildung 3-25 rechtsseitige und linksseitige PSE-Anpralle gemeinsam betrachtet und in je eine Gruppe zusammengefasst.

Hinweis: Während im Rahmen von Anprallprüfungen die Begriffe Anprallgeschwindigkeit und Anprallwinkel verwendet werden, wird im Bereich der Unfallforschung von Kollisionsgeschwindigkeit und Kollisionswinkel gesprochen. Die unterschiedlichen Begriffe bezeichnen dabei äquivalente Größen zur Beschreibung des Anpralls beziehungsweise der Kollision.

Etwa ein Fünftel der beteiligten Fahrzeuge kollidieren in sehr spitzen Winkeln (unter oder gleich 5°) mit der Schutzeinrichtung und nahezu jede vierte Kollision findet unter einem Winkel zwischen 6° und 10° statt.

Die in Anprallprüfungen für PSE mit Pkw-Anprall spezifizierten Anprallwinkel reichen von 8° bis 20°, wobei die Versuche TB21 und TB22 allerdings für Schutzeinrichtungen in Arbeitsbereichen gelten. Die Betrachtungen hier beziehen sich daher vorrangig auf die Anprallversuche TB11, TB31 und TB32, die einen Anprallwinkel von 20° vorgeben. Demzufolge decken die Anprallwinkel der Anprallprüfungen nur einen geringen Teil der PSE-Anpralle im realen Unfallgeschehen unmittelbar ab.

Anpralle bei sehr spitzen Winkeln scheinen unter dem Aspekt der Insassenbelastung weniger kritisch. Sofern kein Verhaken mit der Schutzeinrichtung stattfindet, gleitet das Fahrzeug mit hoher Wahrscheinlichkeit ab, weshalb keine hohen Insassenverzögerungen zu erwarten sind. Unter der Annahme, dass kleinere Kollisionswinkel zu geringeren Insassenbelastungen führen, decken die Anprallversuche nach DIN EN 1317 nahezu 80 % der realen Kollisionen ab.

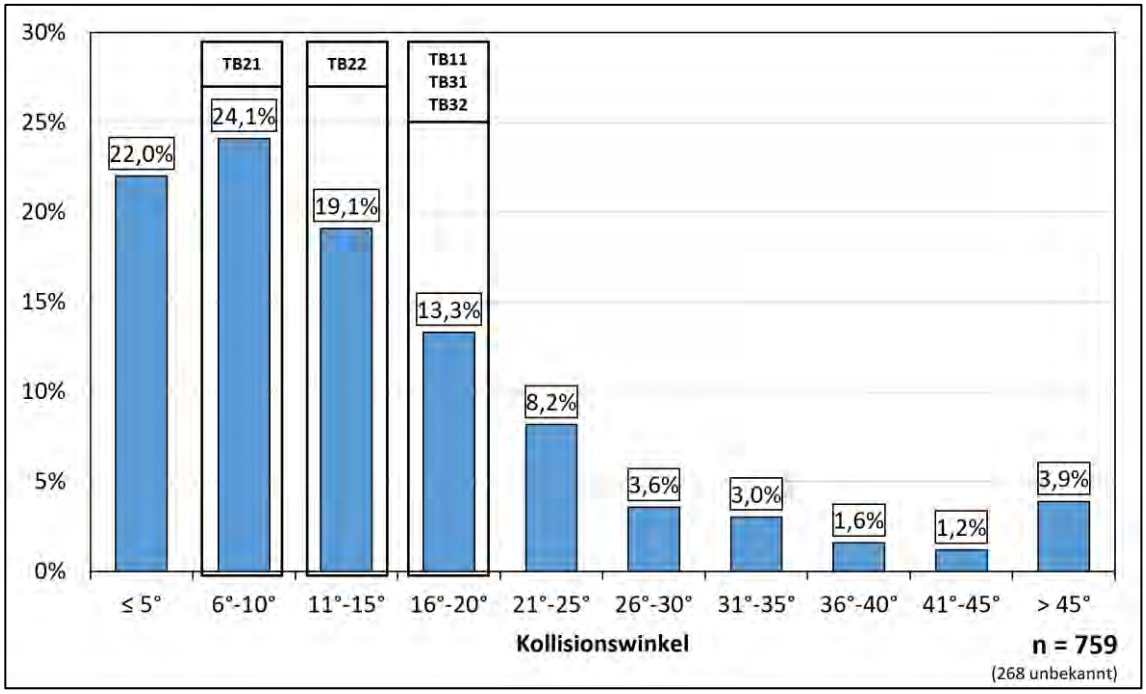


Abbildung 3-25: Verteilung des Kollisionswinkels

In Abbildung 3-26 ist die Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit im ersten Anprall des Pkws mit der Schutzeinrichtung dargestellt. Ein Viertel der Kollisionsgeschwindigkeiten liegen unmittelbar im Bereich der Geschwindigkeiten (80 bis 119 km/h) der Anprallprüfungen (TB11, TB31, TB32). Zwei Drittel der Geschwindigkeitsbereiche liegen darunter. Unter der Annahme, dass geringere Kollisionsgeschwindigkeiten zu geringeren Insassenbelastungen führen, decken die Anprallversuche nach DIN EN 1317 92 % der realen Kollisionen ab. In den verbleibenden etwa 8 % hatten die beteiligten Pkw zum Zeitpunkt der Erstkollision mit der Schutzeinrichtung eine Geschwindigkeit von mehr als 120 km/h.

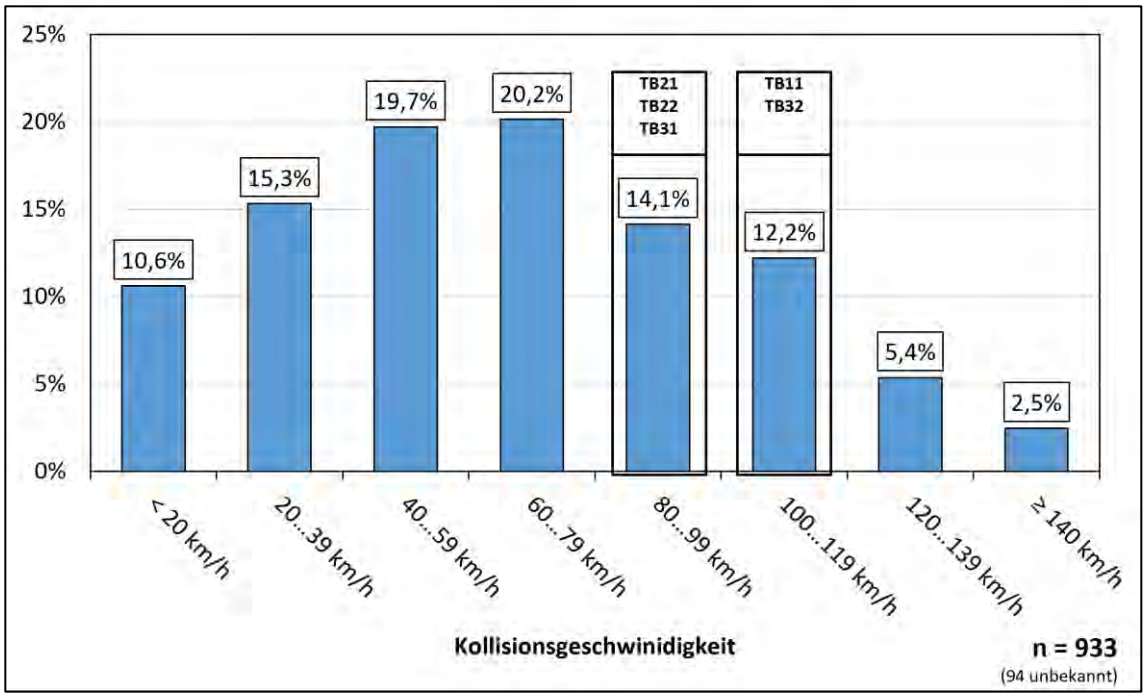


Abbildung 3-26: Verteilung des Kollisionsgeschwindigkeit

3.3.3. Charakteristik der Pkw

Gegenstand der folgenden Analysen sind die in PSE-Anprallen beteiligten Pkw. Um eventuelle Besonderheiten der Fahrzeuge in Unfällen mit PSE-Anprall aufzudecken, werden die Ergebnisse aus der GIDAS Datenbank jeweils mit gesamtdeutschen Statistiken (z.B. KBA) verglichen, um Unterschiede in den Verteilungen zu identifizieren.

In Abbildung 3-27 sind die Fahrzeugklassen der beteiligten Pkw mit PSE-Anprall dargestellt. Der Großteil der betrachteten Fahrzeuge stammt aus dem Kleinwagen- (28 %) oder Mittelklasse-Segment (55 %). Letztere Gruppe umfasst Fahrzeuge der unteren Mittelklasse (Kompaktklasse), Mittelklasse und oberen Mittelklasse. Die restlichen Pkw teilen sich auf andere Segmente auf, wobei in dieser Gruppe Vans und „sonstige“ am häufigsten vertreten sind.

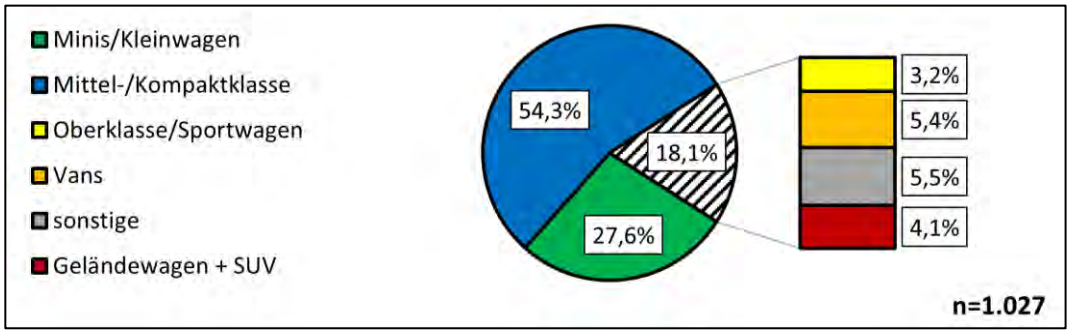


Abbildung 3-27: Verteilung der Pkw-Klassen mit PSE-Anprall

Verglichen mit dem Pkw-Bestand in Deutschland 2021 (Abbildung 3-28) zeigen sich in GIDAS geringfügige Unterschiede. SUVs und Vans sind im aktuellen deutschen Fahrzeugbestand häufiger als in Unfällen mit PSE-Anprall in GIDAS. Neben ungleich verteilten Unfallhäufigkeiten unter den verschiedenen Fahrzeugklassen liegt eine weitere Erklärung auch darin, dass die Unfalldaten der GIDAS Datenbank aus den Jahren ab 2005 stammen und somit zuletzt stark wachsende Segmente (z.B. SUV) in den Unfalldaten unterrepräsentiert sind.

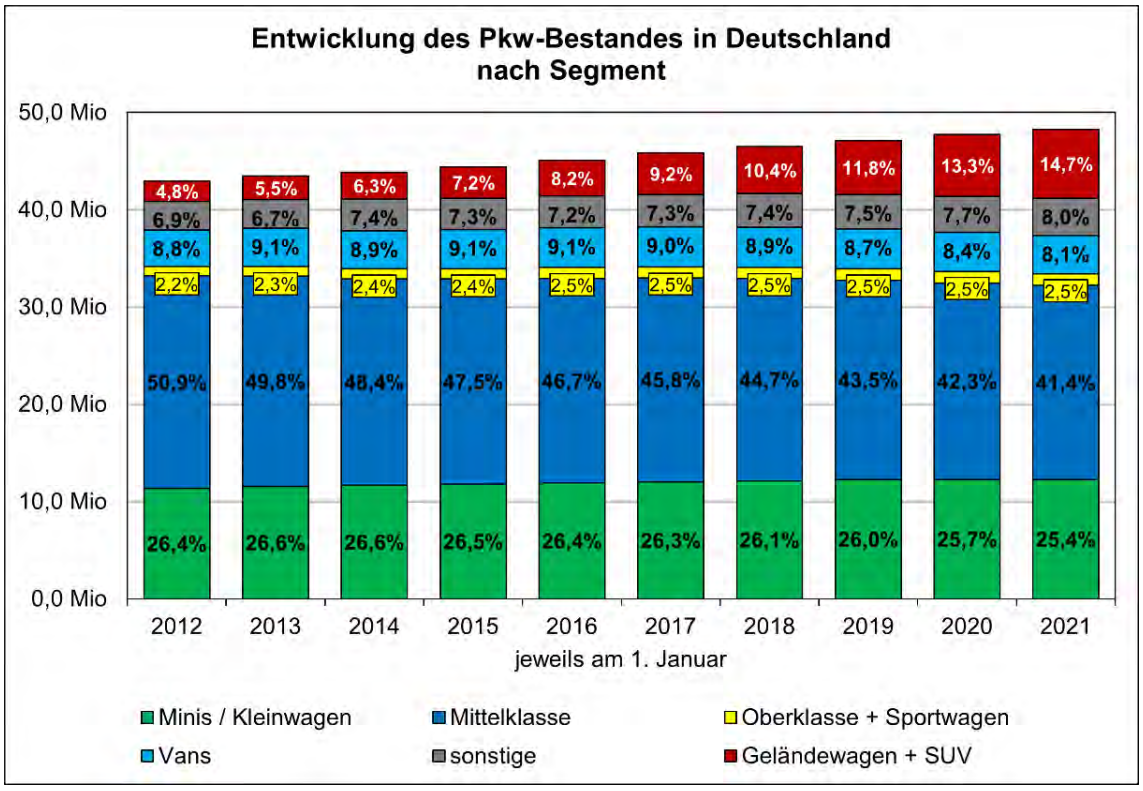


Abbildung 3-28: Entwicklung des Pkw-Bestandes in Deutschland nach Segment

Die historische Entwicklung der Fahrzeugklassen belegt, dass sich der Anteil an Geländewagen/SUV zwischen 2012 und 2021 mehr als verdreifacht hat. Gegenüber der Mittelklasse und Kleinwagen haben in der vergangenen Dekade auch Oberklassefahrzeuge und Vans relative Zuwächse verzeichnet. Die Mittelklasse bildet jedoch weiterhin das größte Segment. Die zeitliche Entwicklung des Fahrzeugbestandes zeigt, dass die Nachfrage nach Fahrzeugen mit erhöhter Sitzposition (z.B. SUVs, Vans) steigt. Gleichzeitig nimmt die Anzahl an Komfort- und Sicherheitssystemen sowie die Anzahl an rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen und Plug-In-Hybriden weiter zu, wodurch sich die Leermasse neu zugelassener Pkw erhöht. Abbildung 3-29 zeigt, dass die durchschnittliche Leermasse von Fahrzeugen nach dem Jahr der Neuzulassung von 2010 bis 2020 laut KBA um fast 12 % gestiegen ist.

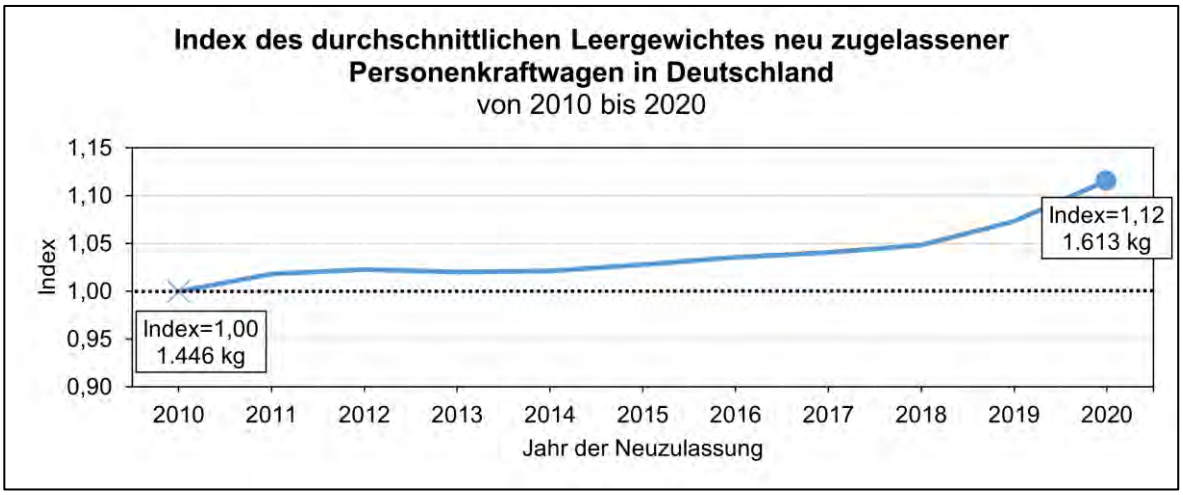


Abbildung 3-29: Entwicklung der durchschnittlichen Pkw-Leermasse von Neuwagen

Die Verteilung der Gesamtfahrzeugmasse (Leermasse und anteiliger Beitrag durch Insassenmasse) bei PSE-Anprallen im realen Unfallgeschehen zeigt, dass etwa drei Viertel der kollidierten Pkw mit den Anprallprüfungen für PSE-Systeme abgedeckt werden (Abbildung 3-30). Demzufolge liegen etwas mehr als ein Fünftel der Pkw über den getesteten Fahrzeugmassen und lediglich 3 % darunter.

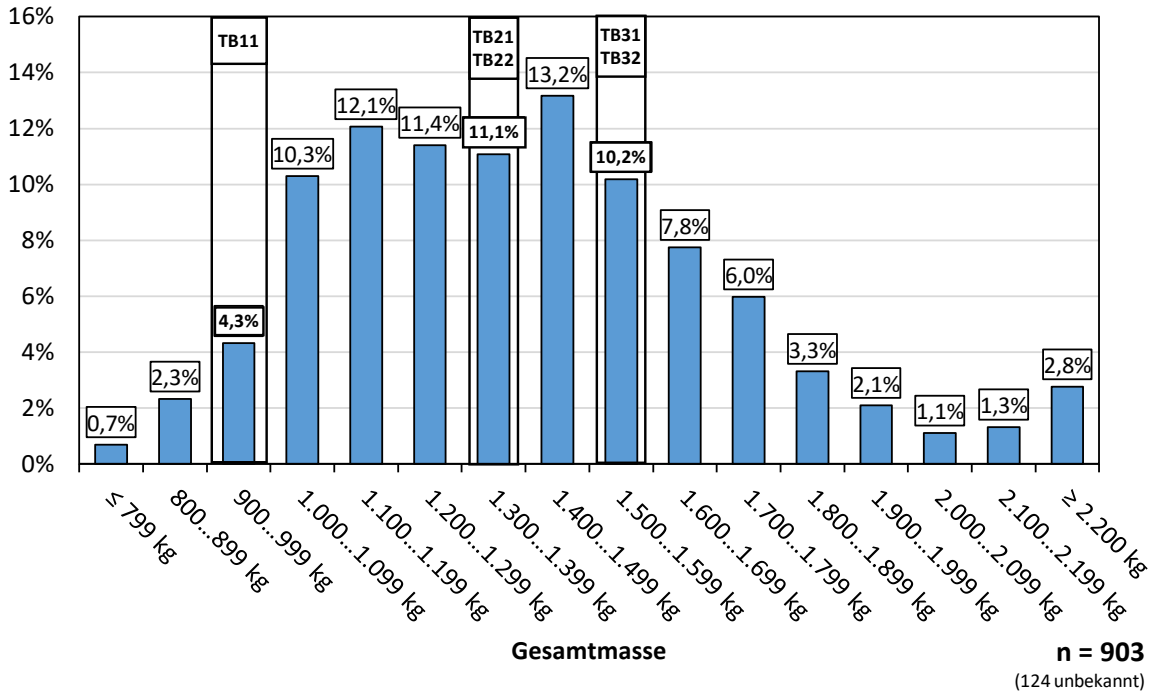


Abbildung 3-30: Gesamtmasse der Pkw bei PSE-Anprallen

3.3.4. Arten von PSE-Systemen

Die Verteilung der Erstkollision mit einer PSE nach Art der Schutzeinrichtung zeigt, dass 90 % der PSE-Anpralle in den GIDAS Daten Stahlschutzplanken sind (Abbildung 3-31). Die Hälfte der betrachteten Pkw kollidieren mit einer einfachen Schutzplanke. Zwei Fünftel sind Primärkollisionen mit Distanzschutzplanken, bei denen zusätzlich Abstandhalter an den Pfosten montiert werden, um bauliche Gegebenheiten auszugleichen und mehr Deformationsweg zu ermöglichen. Safety- oder Super-Rails weisen noch einen geringen Prozentsatz von 1,7 % auf. Ihr Anteil wird jedoch langfristig zunehmen, da aktuell bei vielen Sanierungs- und Ausbaumaßnahmen auf hoch belasteten BAB der Sicherheit gegen Durchbrechen ein höherer Stellenwert beigemessen wird und diese Systeme verbaut werden.

Infolge der GIDAS Erhebungsmethodik zeigt die Abbildung 3-31 nur einen Teil des tatsächlichen Unfallgeschehens mit PSE-Schutzeinrichtung innerhalb der Erhebungsgebieten Dresden und Hannover. Je nach Straßenbebauungsplan, Region und Datenquelle kann solch eine Verteilung variieren. Ein Vergleich zum deutschen Unfallgeschehen ist nicht möglich, da in der amtlichen Statistik keine Unterscheidung zwischen Schutzplanken- und Schutzwandanprall getroffen wird.

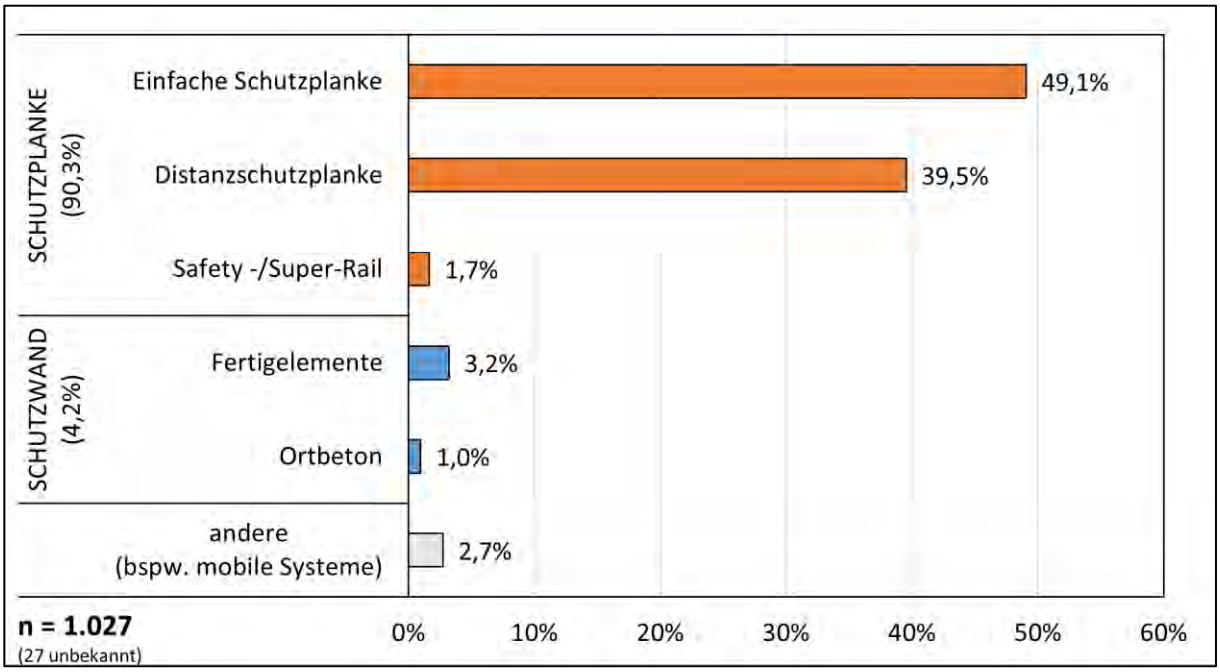


Abbildung 3-31: Arten von Schutzeinrichtungen bei Pkw-Anprall in GIDAS

Bezugnehmend auf die Schutzplanken sind Pkw-Erstkollision mit Schutzwänden eher selten in der GIDAS Datenbank. Jeder 25. Erstanprall gegen eine PSE ist ein Schutzwandanprall.

Schutzplanken

Neben den Schutzplankenarten werden in einer Einzelfallanalyse für die GIDAS Unfalljahre von 2005 bis 2015 unterschiedliche Kriterien der Schutzplanken untersucht. In Abbildung 3-32 ist die Verteilung der Pfostenarten in den Pkw-Schutzplankenanprallen dargestellt. In über 90 % der Primärkollisionen wurden Sigma-Pfosten als Schutzplankenholm verbaut. Aufgrund des speziellen Querschnittes mit geringerer Formaggressivität können Sigma-Pfosten wesentlichen Einfluss auf die Verletzungsschwere beim Körperanprall von Zweiradfahrern haben. IPE-Pfosten (Doppel-T-Profil) oder C-Pfosten sind bislang nicht so häufig verbaut.

In der Hälfte der betrachten PSE-Anpralle sind Pfosten im Abstand von 2 m und in einem Drittel im Abstand von 4 m montiert.

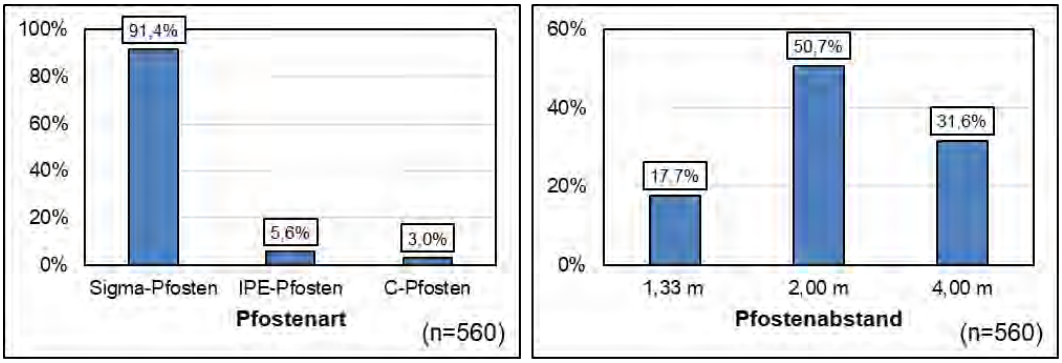


Abbildung 3-32: Art und Abstand der Schutzplankenpfosten

Abbildung 3-33 zeigt, dass die Hälfte der betrachteten PSE-Systeme eine Einbauhöhe von 70 bis 79 cm haben. Knapp ein Drittel der PSE-Systeme sind 80 cm hoch oder höher, was charakteristisch für Rückhaltesysteme mit höheren Aufhaltestufen (z.B. Safety- oder Super-Rails) ist. Es existiert allerdings auch ein relevanter Anteil an PSE mit einer geringen Einbauhöhe unter 70 cm. Für viele Systeme ist das niedriger als die vorgeschriebene Einbauhöhe.

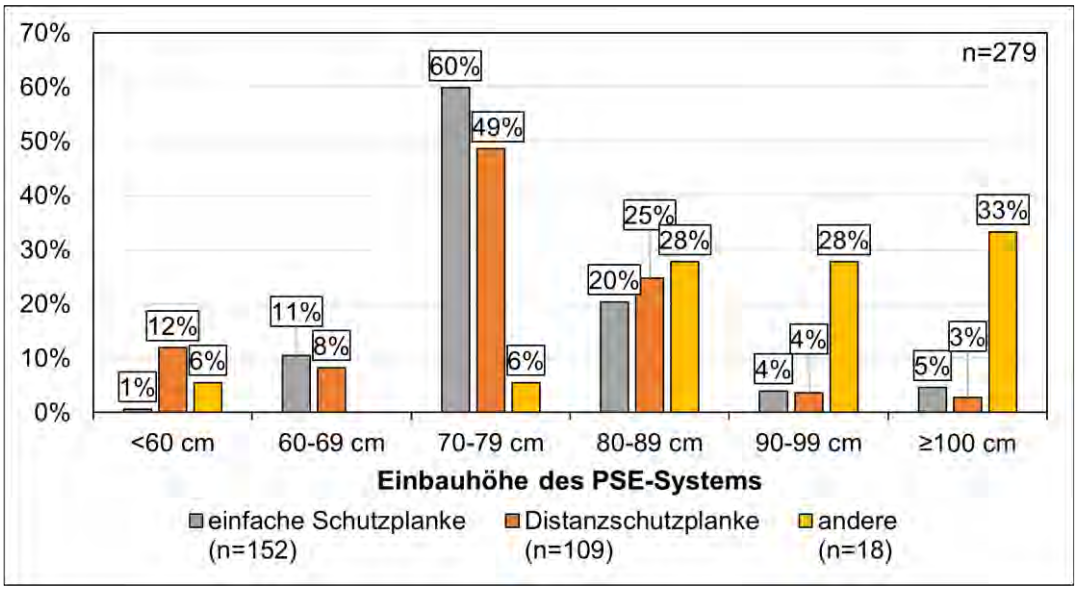


Abbildung 3-33: Verteilung der Einbauhöhe von PSE-Systemen (Fahrbahn bis PSE-Oberkante)

Schutzwand

Die meisten Erstkollisionen gegen Schutzwände in GIDAS werden für das New Jersey-Profil registriert. Neben den zwei verbreitetsten Profilen werden in GIDAS auch andere Formen identifiziert, welche hauptsächliche mobile Betonschutzwandsysteme sind. (Abbildung 3-34)

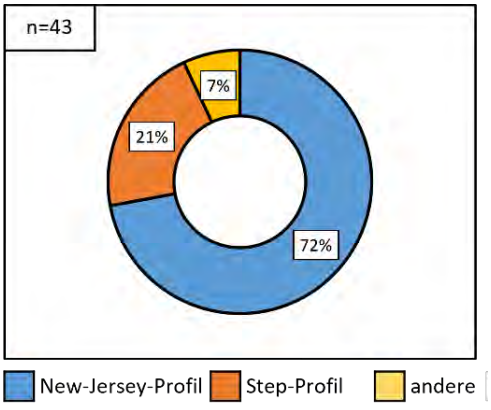


Abbildung 3-34: Verteilung der Unfälle mit Schutzwandanprall nach Art des Profils

3.3.5. Unfallfolgen für die Pkw-Insassen

Der folgende Abschnitt behandelt die Unfallfolgen für Pkw-Insassen in Unfällen mit einem PSE-Anprall. Dabei gelten einige Randbedingungen, die für die Interpretation der Ergebnisse von Bedeutung sind. Nicht alle Personen, die in ein Unfallereignis mit Personenschaden involviert sind, müssen zwangsläufig verletzt sein. Weiterhin wird die resultierende Verletzungsschwere der Personen betrachtet, welche im Falle von Mehrfachkollisionen (häufig bei hohen Ausgangsgeschwindigkeiten wie beispielsweise auf der BAB) nicht zwangsläufig aus dem PSE-Anprall resultieren muss. So bleiben in einigen Fällen PSE-Anpralle ohne Verletzungen für die Insassen, während der anschließende Sekundäranprall (z.B. mit einem anderen Fahrzeug) zu Verletzungen führt.

Abbildung 3-35 zeigt die Verletzungsschweren von Pkw-Insassen in GIDAS (ab 2005), für Unfälle mit Objektkollision und für PSE Unfälle. Pkw-Insassen weisen in GIDAS bei Unfällen mit Objektkollisionen höhere Verletzungsschweren auf als bei Unfällen mit PSE-Anprall.

Nahezu ein Drittel der Personen in PSE-Anprallen blieb unverletzt. Knapp über die Hälfte der Pkw-Insassen verletzte sich leicht und etwa jeder fünfte Insasse wurde stationär behandelt (schwer verletzt). Im Kollektiv der untersuchten Pkw-Unfälle mit PSE-Anprall aus GIDAS wurden 25 Personen (1,5 %) tödlich verletzt.

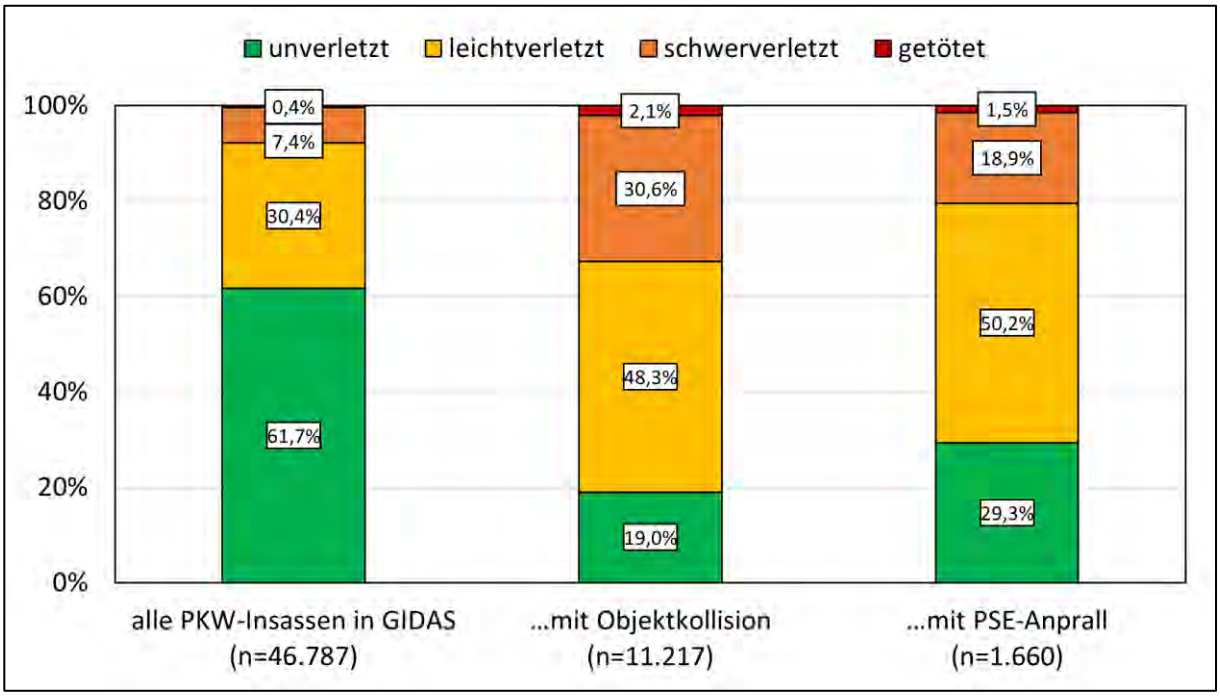


Abbildung 3-35: Verletzungsschwere der Pkw-Insassen

Neben der amtlichen Verletzungsschwere, die sich vor allem an der Hospitalisierung orientiert, wird die Betrachtung mit Informationen zum Abbreviated Injury Scale (AIS) ergänzt. Der AIS ist eine Bewertungsskala für die anatomische Verletzungsschwere, die sich an der Letalität von Einzelverletzungen orientiert (Tabelle 3-3).

Tabelle 3-3: Verletzungsschweren nach AIS-Werten

AIS	0	1	2	3	4	5	6
Verletzungsschwere	Unverletzt	Gering	Moderat	Ernst	Schwer	Kritisch	Maximal (nicht behandelbar)

Der maximale AIS (MAIS) entspricht dem höchsten AIS-Wert aller Einzelverletzungen und wird häufig zur repräsentativen Beschreibung der Gesamtverletzungsschwere einer Person verwendet.

Dabei sind die Darstellungen MAISx als MAIS = x und mit einem „+“, wie zum Beispiel MAIS2+ als MAIS ≥ 2 zu interpretieren. Für die gesamte Studie wird die Version AIS2005 Update 2008 herangezogen [42].

Abbildung 3-36 gibt die Anteile der Gesamtverletzungsschweregrade nach MAIS zwischen allen Pkw-Insassen in der GIDAS Datenbank und den darin enthaltenen Objekt- sowie PSE-Anprallen wieder. Die Unterschiede in den Häufigkeiten der Verletzungsschweren nach amtlicher Definition aus Abbildung 3-35 bestätigen sich auch in der MAIS-Verteilung. Im Vergleich zu allen Pkw-Insassen weisen Pkw-Unfälle mit Objektkollision höhere Verletzungsschweren auf. Die Verletzungsfolgen für Pkw-Insassen sind bei einem PSE-Anprall jedoch geringer als bei der Gesamtheit aller Objektkollisionen.

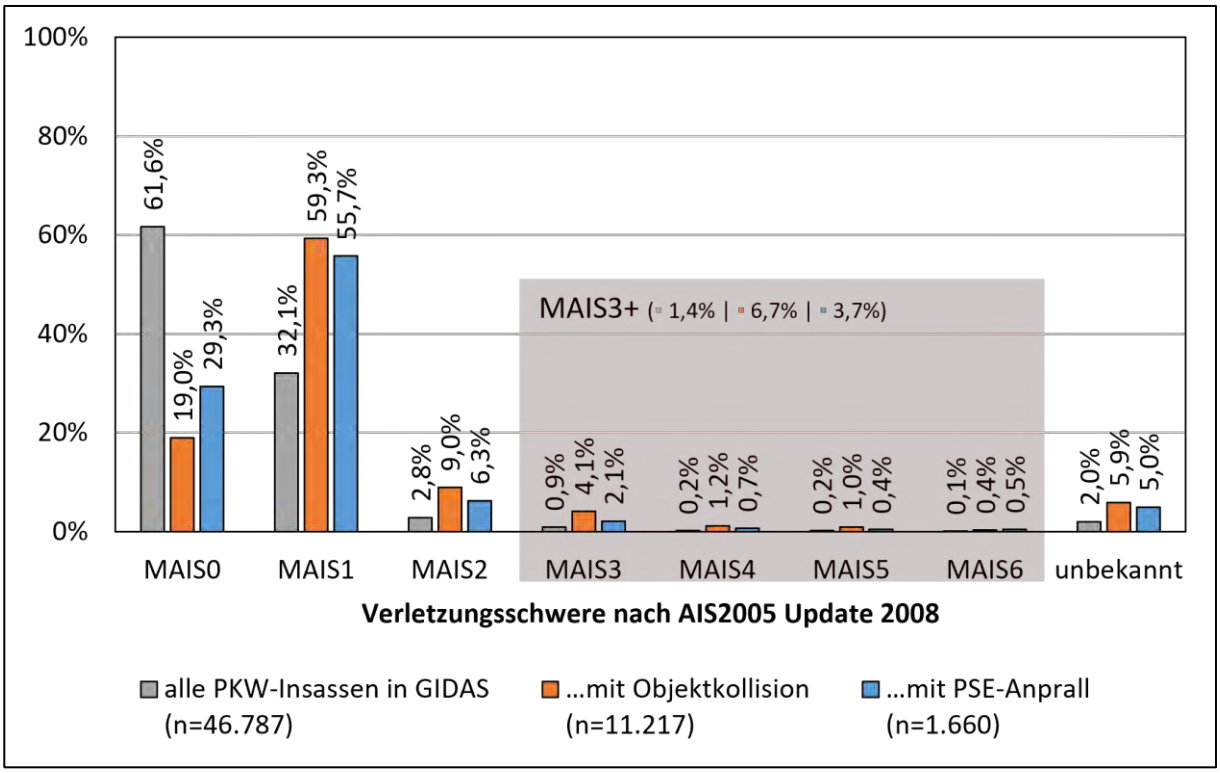


Abbildung 3-36: Verletzungsschweren von Pkw-Insassen (MAIS)

In den Unfällen mit PSE-Anprall erleiden die meisten Pkw-Insassen (58 %) eine Verletzungsschwere von MAIS1. Ein weiteres Drittel blieb unverletzt. Der Anteil an moderat verletzten Insassen (MAIS2) beträgt 6 %. Personen mit einer Verletzungsschwere von MAIS3+ machen bei Unfällen mit PSE-Anprallen knapp 4 % aus und sind damit mehr als doppelt so häufig wie bei der Gesamtheit aller Pkw-Insassen.

Auch innerhalb eines Fahrzeuges können verschiedene Verletzungsschweren auftreten (Abbildung 3-37). Die GIDAS Analyse zu den Unfalljahren von 2005 bis 2015 für verschiedene Sitzplätze im Pkw mit PSE-Anprall zeigt, dass die Fahrer tendenziell schwerer verletzt sind als die Beifahrer und Fondinsassen. Der Anteil der MAIS3+-verletzten Front-Insassen ist anderthalbmal bis doppelt so hoch wie bei Insassen auf der Rückbank. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass in der Gruppe der Fondinsassen auch gelegentlich Kinder in eigenen Rückhaltesystemen (Kindersitzen) zu finden sind, die meistens deutlich geringere Verletzungsschweren aufweisen.

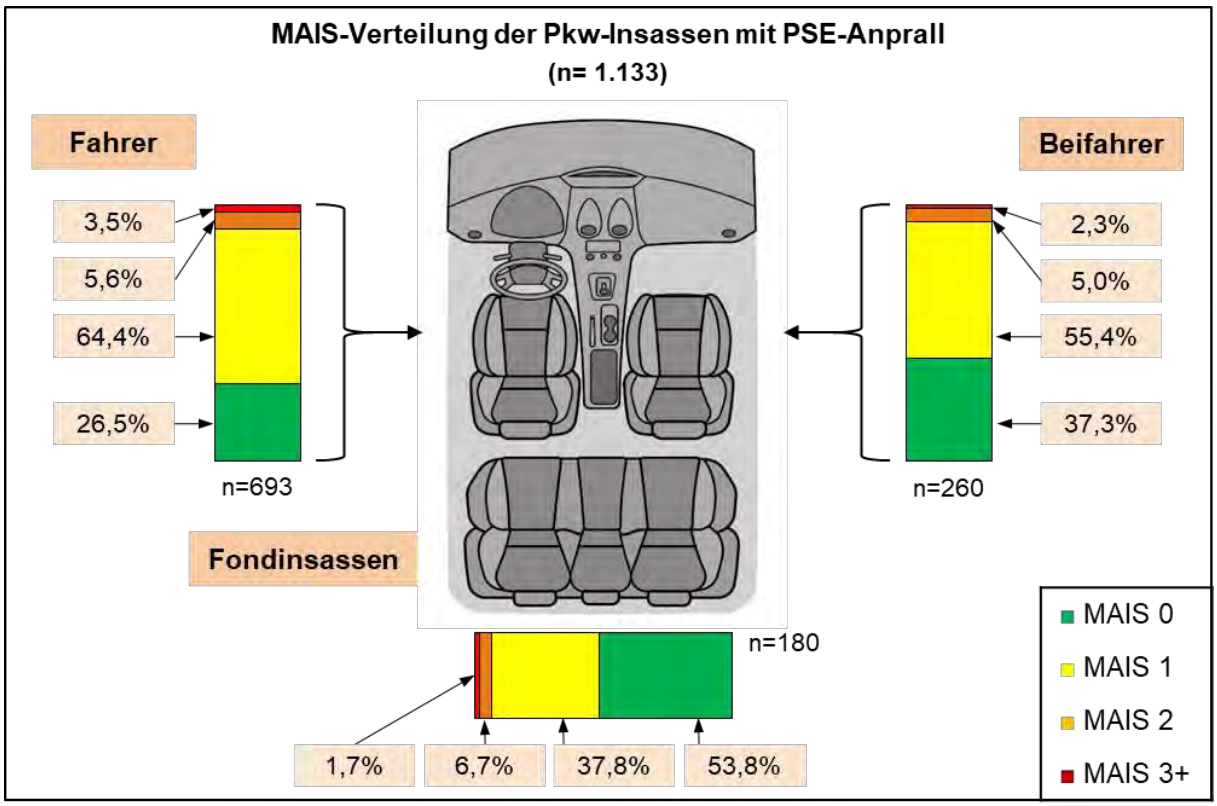
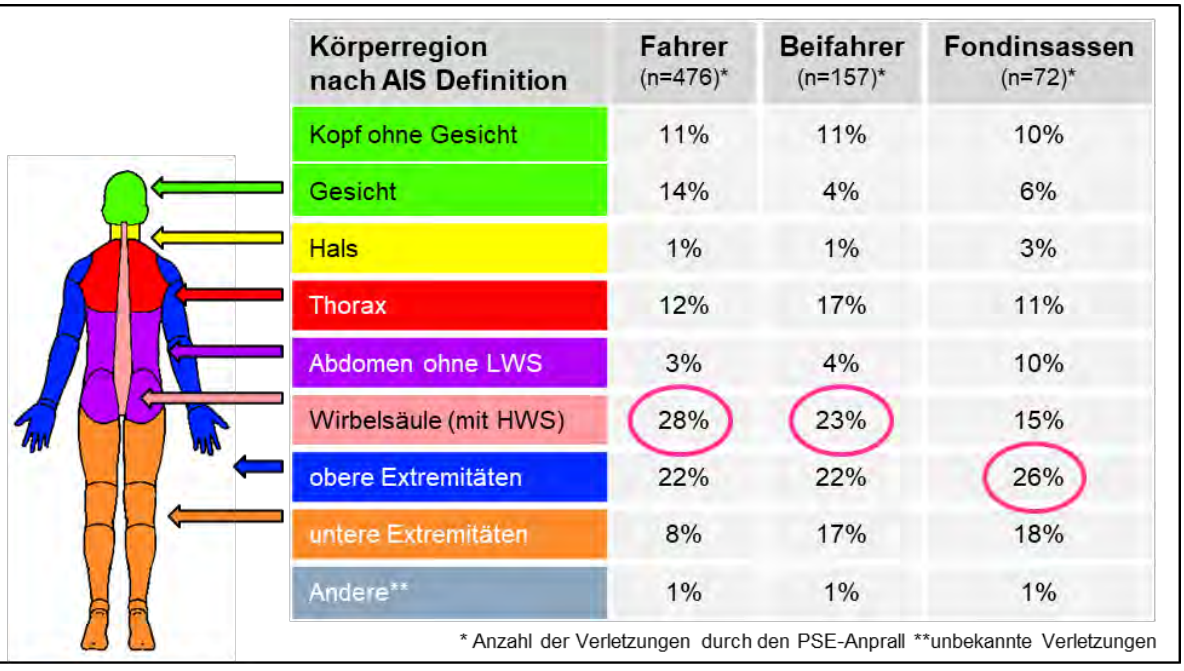


Abbildung 3-37: Verletzungsschweren (MAIS) auf verschiedenen Sitzplätzen

In Abhängigkeit des Sitzplatzes werden in Abbildung 3-38 die einzelnen Körperregionen verletzter Insassen betrachtet. Aus der Verletzungsübersicht wird deutlich, dass etwa jede vierte Verletzung bei Front-Insassen an der Wirbelsäule zu finden ist (insbesondere HWS-Distorsionen). Verletzungen im Bereich der oberen Extremitäten oder bei Fahrern im Gesichtsbereich sind ebenfalls relativ häufig. Fondinsassen werden am häufigsten an den oberen und unteren Extremitäten verletzt.



Körperregion nach AIS Definition	Fahrer (n=476)*	Beifahrer (n=157)*	Fondinsassen (n=72)*
Kopf ohne Gesicht	11%	11%	10%
Gesicht	14%	4%	6%
Hals	1%	1%	3%
Thorax	12%	17%	11%
Abdomen ohne LWS	3%	4%	10%
Wirbelsäule (mit HWS)	28%	23%	15%
obere Extremitäten	22%	22%	26%
untere Extremitäten	8%	17%	18%
Andere**	1%	1%	1%

* Anzahl der Verletzungen durch den PSE-Anprall **unbekannte Verletzungen

Abbildung 3-38: Verletzungsübersicht (ohne Differenzierung nach Verletzungsschwere) nach Körperregionen und Sitzplatz

3.3.6. Schutzwandanprall

Zur Untersuchung des Unfallgeschehens mit Schutzwandanprall stehen insgesamt 67 Unfälle aller Arten der Verkehrsteilnahme aus der GIDAS Datenbank zur Verfügung, in denen 43 beteiligte Pkw als ersten PSE-Anprall eine Schutzwandkollision aufweisen. Aufgrund der geringen Anzahl an Pkw-Unfällen mit Schutzwandanprall in GIDAS (Unfalljahre ≥ 2005) wird die Betrachtung durch 21 Unfälle eines Pkw mit Schutzwandkollision aus der Unfalldatenbank der Versicherer ergänzt, um ein aussagekräftigeres Bild der Unfallkonstellationen und Unfallfolgen widerspiegeln zu können. Trotz der Vereinigung beider Datenquellen ist die Fallanzahl zu gering für robuste Aussagen. Aus den nachfolgenden Analysen lassen sich lediglich Tendenzen ableiten.

Beim Anprall an eine Schutzwand mit seitlich abgeschrägtem Profil (z.B. New Jersey-Profil) zeigt sich infolge des Aufsteigens des Fahrzeuges an der Schutzeinrichtung mit anschließender Flugphase eine erhöhte Überschlagsgefahr im Vergleich zu anderen PSE-Systemen (Abbildung 3-39). Jede fünfte Erstkollision mit einer Schutzwand in der GIDAS Datenbank resultiert in einem Überschlag des Pkw. Der Überschlag ist ein unkontrollierbarer Fahrzustand, der eine potenziell gefährliche Situation darstellt, in der die Fahrenden keine Eingriffsmöglichkeiten haben.

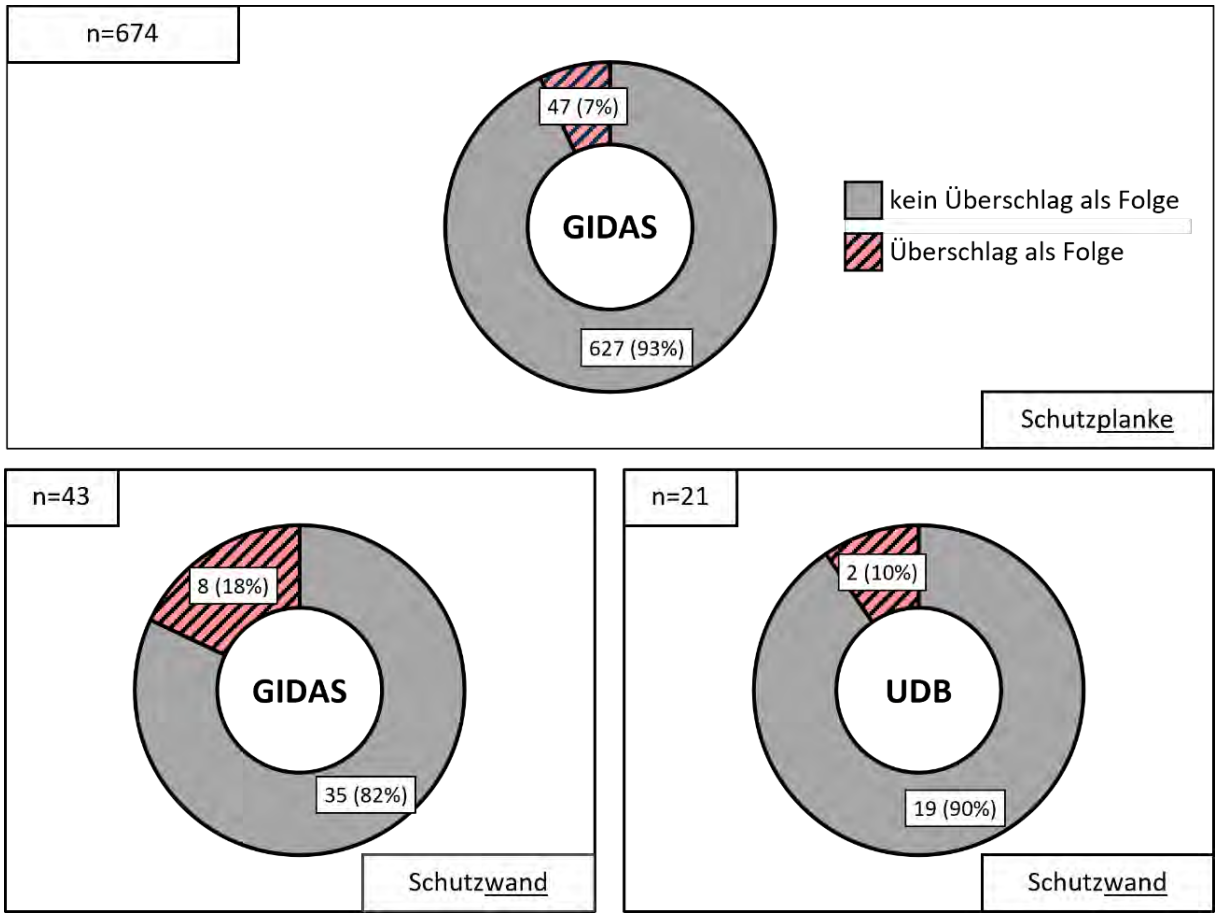


Abbildung 3-39: Anteil der Erstkollisionen an Schutzplanke und Schutzwand mit Überschlag als Folge

Aus Abschnitt 3.3.4 ist bekannt, dass die meisten Erstkollisionen gegen Schutzwände in der GIDAS Datenbank Kollisionen mit dem New Jersey-Profil sind. Auch in der UDB der Versicherer ist bei Pkw-Schutzwandanprallen das New Jersey-Profil häufiger kodiert als das Step-Profil. Zusätzlich beinhaltet die Abbildung 3-40 die Informationen über das Überschlagsverhalten des Pkw nach dem Schutzwandanprall.

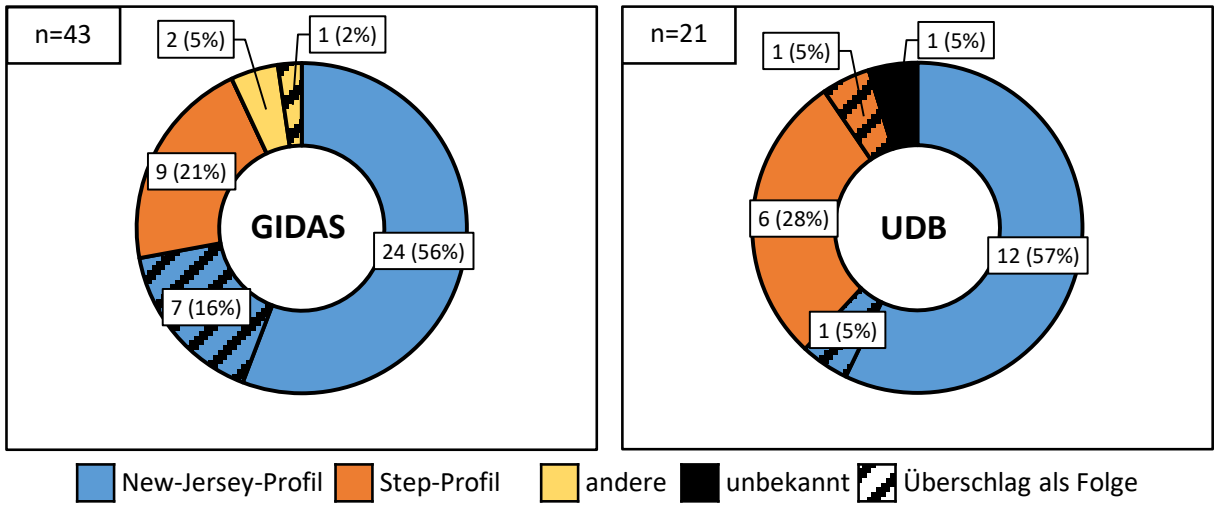


Abbildung 3-40: Verteilung der Erstkollisionen an Schutzwänden nach Art des Profils und Überschlag (li.: GIDAS | re.: UDB)

Jeder dritte Erstanprall in GIDAS gegen eine Schutzwand mit New Jersey-Profil resultiert in einem Pkw-Überschlag. Für das Step-Profil ist in GIDAS kein Überschlag registriert, jedoch einer in der UDB Datenbank.

Im GIDAS Kollektiv zeigen die folgenden Anprallkonstellation eine Tendenz zum Überschlag bei Pkw mit Schutzwandanprall (siehe Abbildung 3-41):

- mittlere bis hohe Kollisionsgeschwindigkeiten ≥ 80 km/h
- kleinere Kollisionswinkel α ≤ 5°
- leichte bis mittelschwere Fahrzeuge 1.100 kg ≤ m ≤ 1.699 kg
- Kleinwagen + Mittel-/Kompaktklassefahrzeug ähnliche Gesamtmasse

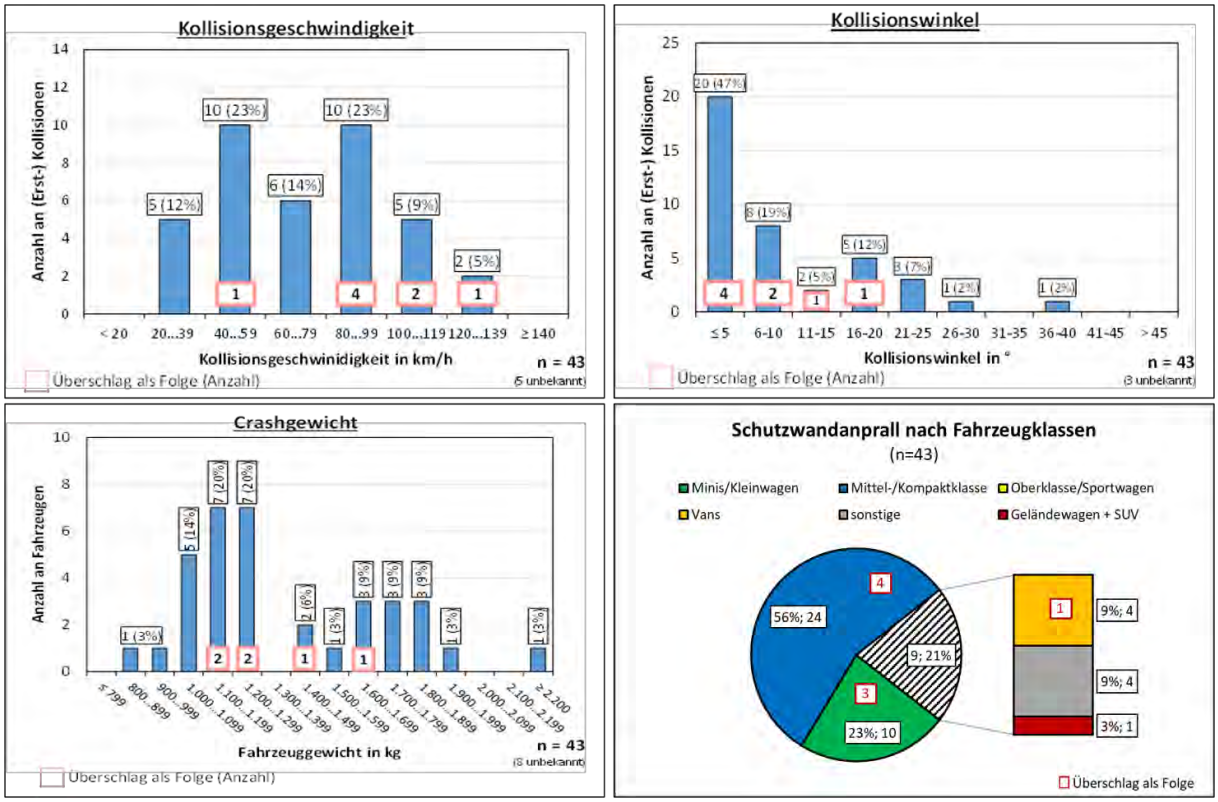


Abbildung 3-41: Merkmale von Pkw-Erstkollision an eine Schutzwand (GIDAS)

Die Richtung des wirkenden Stoßimpulses zeigt (Abbildung 3-42), dass die Stoßkraft entweder direkt von vorne oder schräg von vorne links auf den Schwerpunkt des Fahrzeuges wirkt. Für diese Bereiche werden auch die Überschläge registriert. Krafteinwirkungen von hinten, oder nahezu orthogonal von rechts oder links sind seltener.

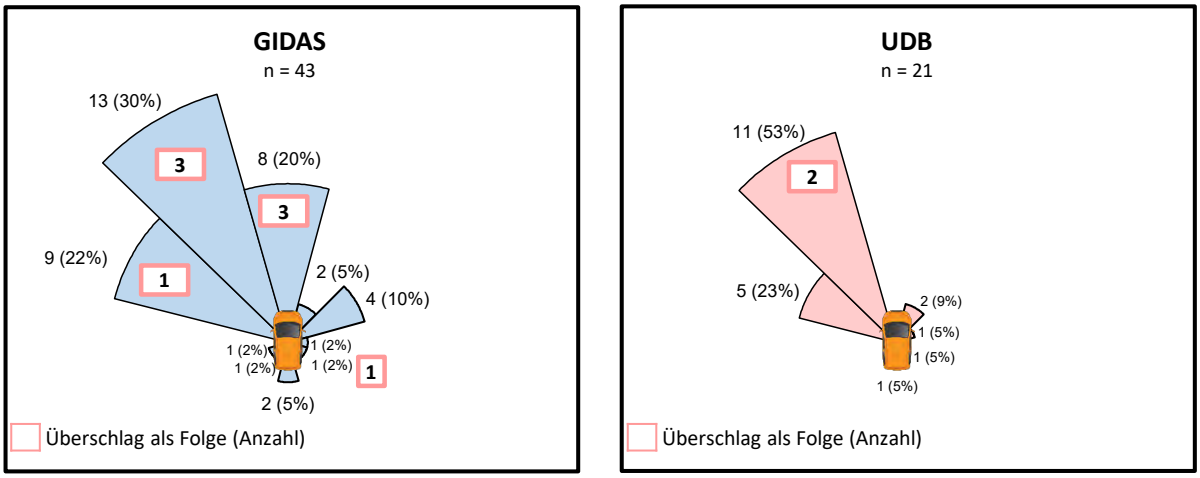


Abbildung 3-42: Richtung des wirkenden Stoßimpulses bei Erstkollision mit der Schutzwand (CDC1-2)

Aus Abschnitt 2.3.3 ist bekannt, dass die Verletzungsschweren der Insassen in Pkw-Unfällen mit PSE-Anprall höher sind als in der Gruppe aller Pkw-Insassen, jedoch niedriger als in Unfällen mit Objektkollision. In der Gruppe der PSE-Anpralle zeigen Schutzplankenkollisionen eine niedrigere maximale Verletzungsschwere der Insassen nach AIS als Schutzwandkollisionen (Abbildung 3-43). Für beide Kollektive werden nur Unfälle ohne Sonderfälle betrachtet (normaler seitlicher Anprall). Unfälle, in denen die PSE unter-, überfahren, durchbrochen werden oder es zu einem Auffahren auf die Anfangs- oder Endkonstruktion kommt, werden ausgeschlossen. Unabhängig von der Datenquelle weisen Schutzwandunfälle mit anschließendem Überschlag eine höhere Verletzungsschwere auf als Unfälle mit „normalem“ seitlichen Anprall an die Schutzwand.

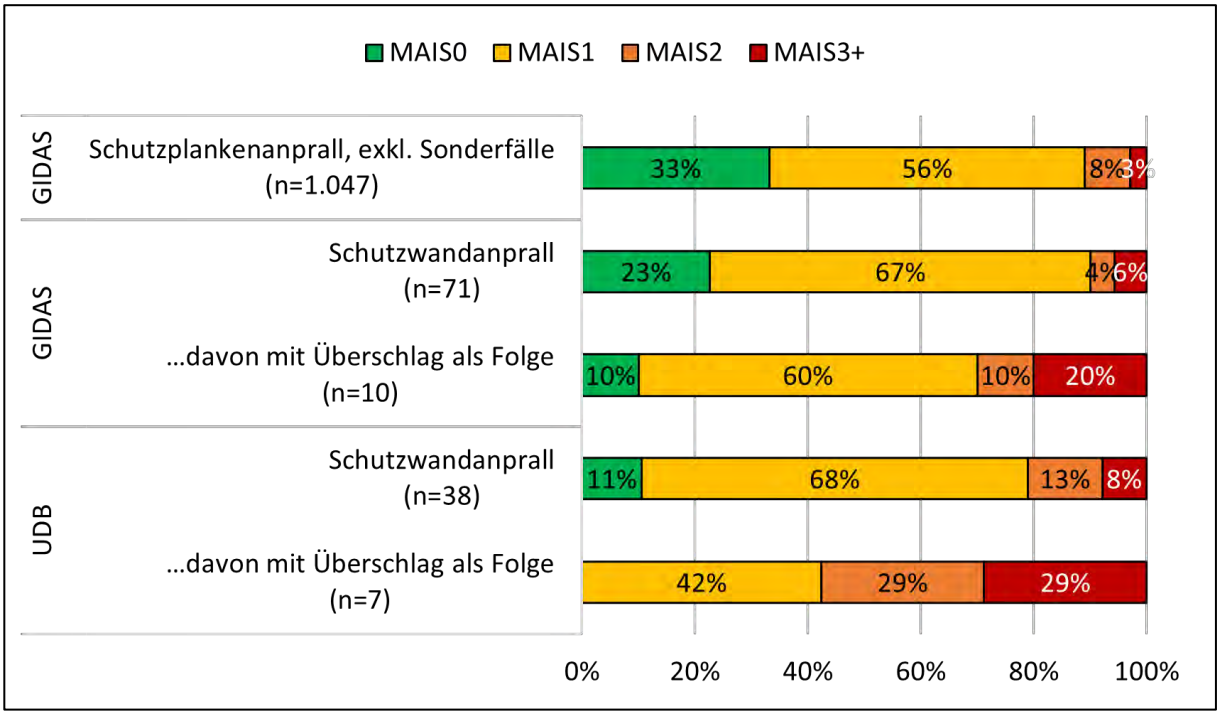


Abbildung 3-43: Max. Verletzungsschwere aller Insassen nach Art des Anpralles und Überschlag

3.3.7. Relevanz von Sonderfällen

Zur Wirksamkeit von PSE-Systemen werden diese standardisierten Anprallprüfungen unterzogen (siehe 2.4). Mithilfe dieser Tests werden die PSE-Systeme anhand von Aufhaltestufen, Wirkungsbereichsklassen sowie Anprallheftigkeitsstufen klassifiziert.

Allerdings zeigen die Unfalldaten der Unfalljahre 2005 bis 2015 aus der GIDAS Datenbank, dass bestimmte Anprallkonstellationen existieren, in denen Schutzeinrichtungen keine oder nur eine geringe Schutzwirkung entfalten und möglicherweise sogar ein erhöhtes Verletzungsrisiko für die Insassen hervorrufen können.

Abbildung 3-44 zeigt die Relevanz von Sonderfällen in 966 eindeutig zuordenbaren Pkw-Kollisionen mit einer PSE. Zu den Sonderfällen gehören folgende Szenarien:

- Unterfahren
- Überfahren
- Auffahren,
- Durchbrechen
- Kollision mit der PSE-Rückseite

Der Großteil der Kollisionen sind „normale“ PSE-Anpralle ohne Auffälligkeiten. Jede elfte Pkw-Kollision mit einem PSE-System stellt jedoch einen Sonderfall dar. Das Auffahren auf Anfangs- und Endkonstruktionen kommt dabei am häufigsten vor. Oft kommt es anschließend zum Abheben des Fahrzeuges, in dessen Folge ein Überschlag droht.

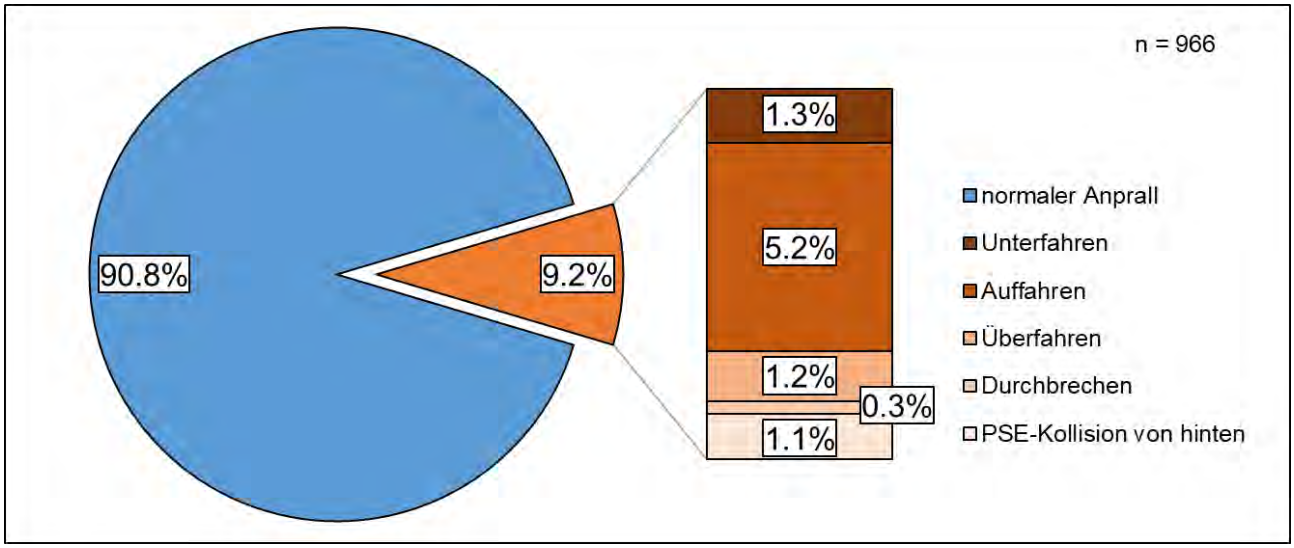


Abbildung 3-44: Relevanz von Sonderfällen bei Pkw-PSE-Anprallen

Das Überfahren hingegen beschreibt das tatsächliche Überwinden eines PSE-Systems. Die Abbildung 3-45 zeigt einen Unfall, bei dem ein Fahrzeug mit mittelhoher Geschwindigkeit über den letzten Teil der Anfangskonstruktion gekommen ist und sich daraufhin überschlagen hat.



Abbildung 3-45: Beispiel eines Auffahrens / Überfahrens mit anschließendem Überschlag

Das Unterfahren ist der zweithäufigste Sonderfall in den betrachteten PSE-Anprallen. Auffällig ist, dass die Kombination aus abfallender Böschung neben der Fahrbahn und großem Kollisionswinkel (> 20°) bei fast allen dieser Unfälle gegeben ist. Diese Konstellation begünstigt das Verhaken und anschließende Unterfahren der Schutzplanke, häufig begleitet vom Abreißen mehrerer Pfosten.

Das Durchbrechen einer Schutzplanke durch einen Pkw kommt sehr selten vor. Die Einzelfallanalyse der wenigen Fälle zeigte, dass die Beteiligten hierbei häufig mit hoher Ausgangsgeschwindigkeit (> 120 km/h) und großen Kollisionswinkeln (etwa 80° – 90°) mit einer einfachen Schutzplanke (ESP) oder Distanzschutzplanke (EDSP) kollidierten.

Häufigste Ursache für eine Kollision mit der PSE-Rückseite ist ein Abkommen des Fahrzeuges noch vor dem baulichen Beginn der Schutzeinrichtung.

Die Verteilung der Unfallfolgen für Pkw-Insassen mit PSE-Anprall bestätigt die These, dass Sonderfälle im Vergleich zu „normalen“ PSE-Anprallen eine höhere Verletzungsschwere aufweisen. Die Anteile an Getöteten und Schwerverletzten sind in Sonderfällen etwa doppelt so hoch.

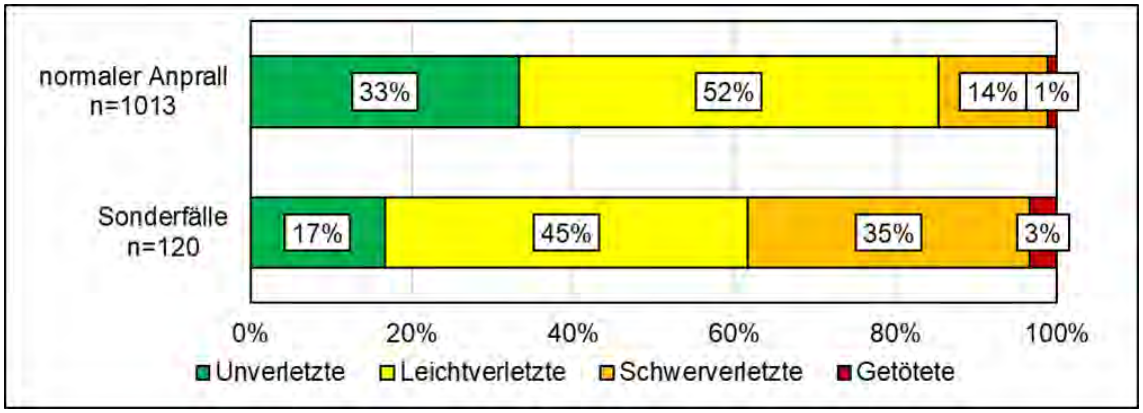


Abbildung 3-46: Verletzungsschwere der Pkw-Insassen

Die Zahl von Unfällen und verletzten Personen in GIDAS für Unterfahren, Überfahren, Durchbrechen oder Kollisionen mit der PSE-Rückseite sind zu gering, um robuste Aussagen treffen zu können. Einzig das Auffahren auf die PSE weist eine ausreichende Anzahl an Insassen auf, um Tendenzen zu den Verletzungsschweren abzuleiten. (Abbildung 3-47).

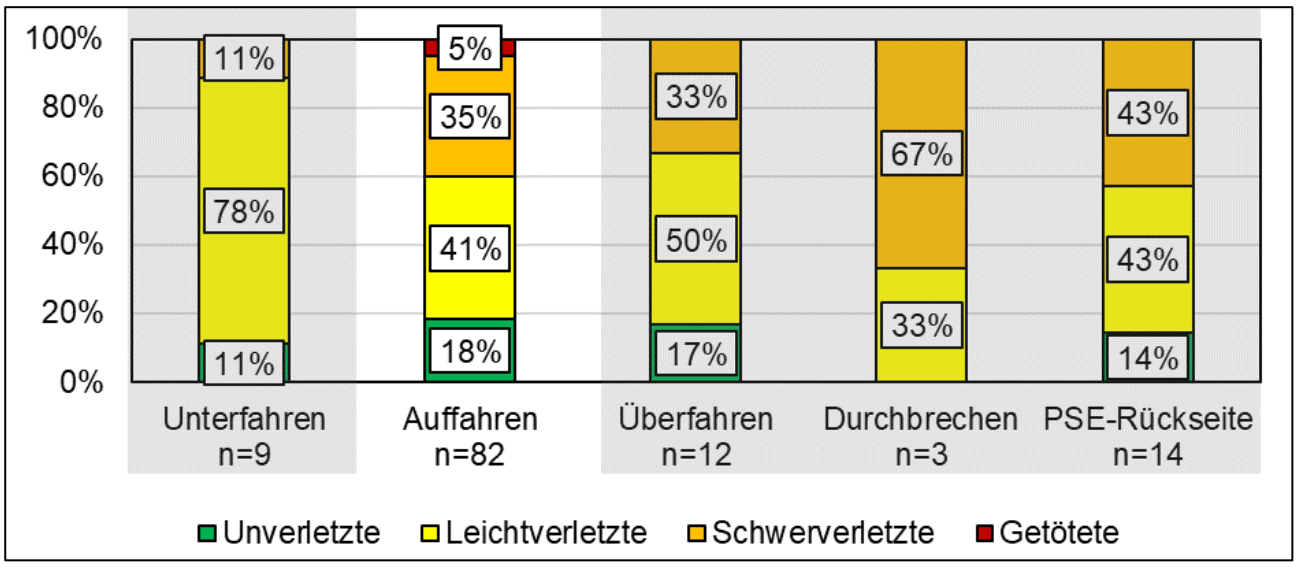


Abbildung 3-47: Verletzungsschweren der Pkw-Insassen in den Sonderfällen

Sonderfall des Auffahrens oder Überfahrens einer Anfangs- oder Endkonstruktion

In den Unfalldaten zeigt sich eine erhöhte Häufigkeit des Auffahrens oder Überfahrens auf eine Anfangs- oder Endkonstruktion und anschließenden Überschlag (siehe Abbildung 3-48). Damit geht ein deutlich erhöhtes Verletzungsrisiko einher (siehe Abbildung 3-49).



Abbildung 3-48: Beispiel einer realen Unfallstelle mit Auffahren auf eine PSE

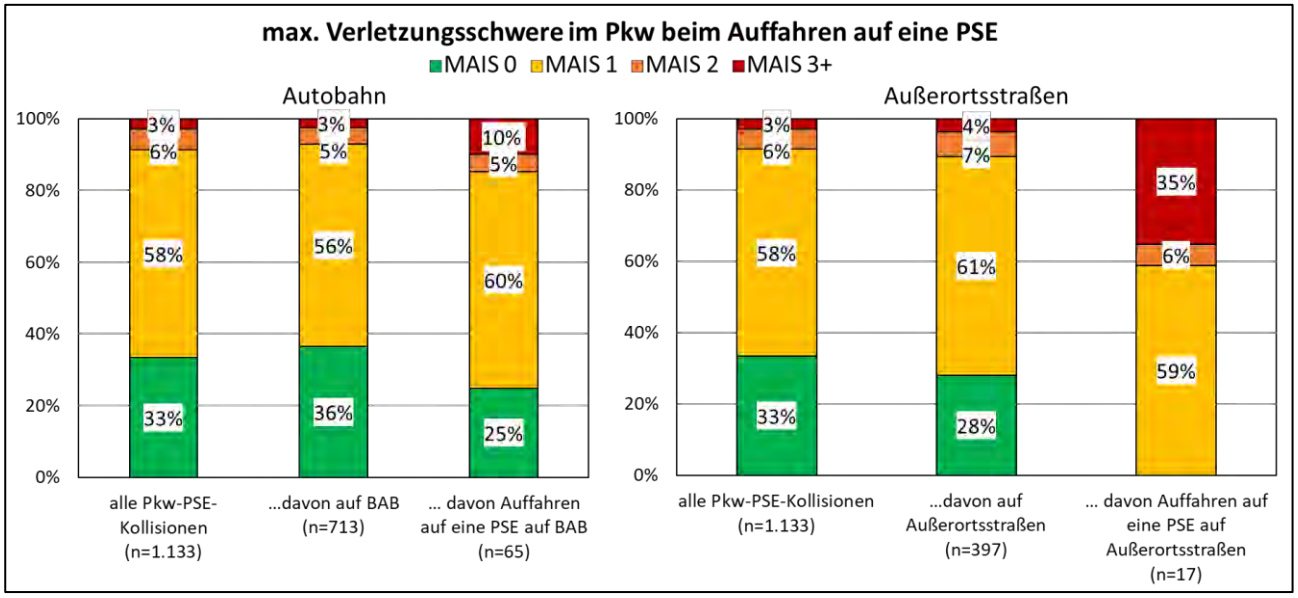
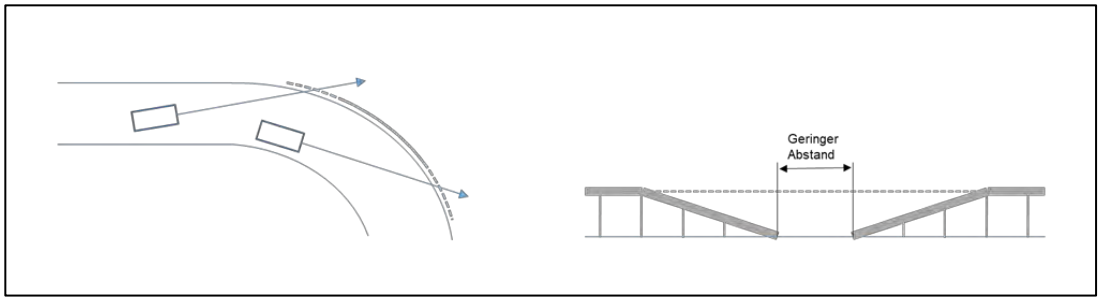


Abbildung 3-49: Verletzungsschwere auf Autobahnen (links) und Außerortsstraßen (rechts)

Eine Einzelfallanalyse dieser Unfälle macht deutlich, dass das Auf- oder Überfahren von Anfangs- und Endkonstruktion häufig vermeidbar gewesen wäre. Abhilfe hätten und könnten die folgenden baulichen Maßnahmen schaffen:

- verlängerte PSE über den Kurvenanfang oder das Kurvenende hinaus
- die Verbindung von zwei nahegelegenen Anfangs- und Endkonstruktionen
- alternative Anfangs- und Endkonstruktionen oder Anpralldämpfer
- Einhaltung und Aufrechterhaltung der Einbauhöhe

Auch Tomasch et al. stellen in ihrer Studie „Required length of guardrails before hazards“ [31] für Österreich fest, dass die Verlängerung von Fahrzeugrückhaltesystemen auf eine definierte Mindestlänge 8 % der PSE-Anpralle mit Auffahren adressieren könnte.



a) b)

Abbildung 3-50: Schematische Ansicht einer zu kurzen PSE
a) vor und nach einer Kurve und b) zwischen zwei PSE-Systemen

4. Identifikation kritischer Anprallkonstellationen

Die Untersuchungen der Unfalldaten zeigen, dass es bei einem Anprall an eine PSE verschiedene Einflussfaktoren gibt, die zu einem höheren Gefährdungspotential für die Fahrzeuginsassen führen. Diese sollen im weiteren Verlauf mithilfe simulativer Methoden und realer Anprallprüfungen überprüft und hinsichtlich der Insassenbelastung sowie der Rückhaltewirkung bewertet werden. Datengrundlage bildet die GIDAS Datenbank mit den Unfalljahren 2005 bis 2015.

Um kritische Konstellation hinsichtlich der Anprallprüfungen identifizieren zu können, orientieren sich die folgenden Auswertungen an deren Hauptparametern (Abschnitt 2.4):

- Anprallgeschwindigkeit
- Anprallwinkel
- Fahrzeugmasse

Abbildung 4-1 zeigt die Prüfkonfigurationen für Personenkraftwagen nach DIN EN 1317 mit ihren jeweiligen Parametern im v_k-α-Diagramm.

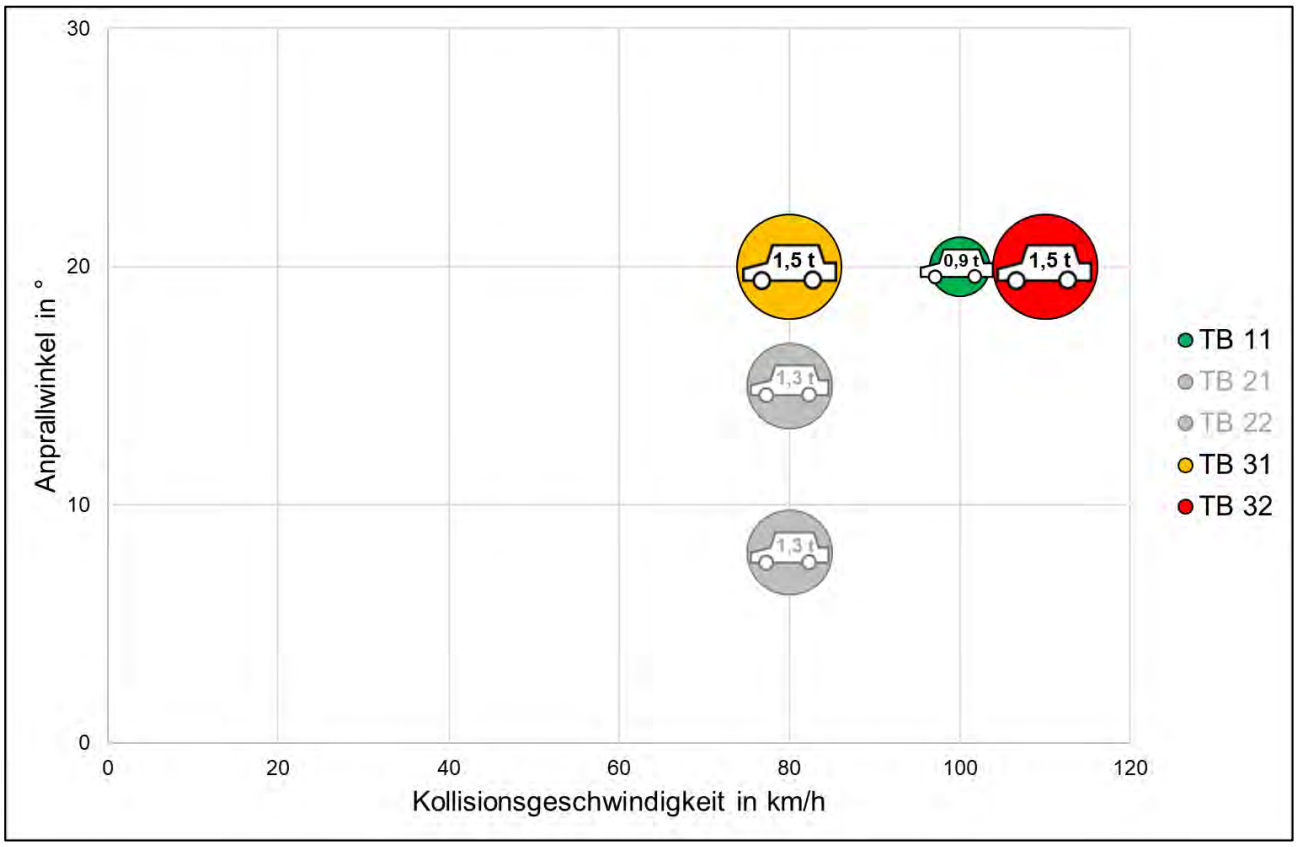


Abbildung 4-1: Prüfkonfigurationen für Pkw nach DIN EN 1317 im v_k-α-Diagramm

Allerdings ergibt sich bei einer dreidimensionalen Auswertung mit kontinuierlichen Parametern innerhalb des beobachteten Wertebereichs das Problem einer zu geringen Fallanzahl für eine lückenlose Darstellung (bei einer Diskretisierung mit $\mathrm{d}v_k = 1\,\mathrm{km/h}$, $\mathrm{d}\alpha = 1°$ und $\mathrm{d}m = 100\,\mathrm{kg}$ ergeben sich 110.400 Klassen, gegenüber 567 auszuwertenden Unfällen mit 642 PSE-Anprallen). Daher werden die Unfälle in einer zweidimensionalen Darstellung im v_k-α-Diagramm für vier diskrete Fahrzeugmassegruppen ausgewertet. Die Massegruppen ergeben sich anhand der Perzentile der enthaltenen Fahrzeuge, siehe Tabelle 4-1, sowie Abbildung 4-2. Pkw außerhalb dieser Gruppen werden für die weiteren Betrachtungen vernachlässigt.

Tabelle 4-1: Massegruppen auf Basis der Perzentilfestlegung

	Perzentil	Masse [kg]	Anzahl an PKW
Gruppe I	1% - 10%	798 - 1.016	59
Gruppe II	10% - 50%	1.017 – 1.361	262
Gruppe III	50% - 90%	1.362 – 1.780	262
Gruppe IV	90% - 99%	1.781 – 2.334	59

Die Massegruppe I deckt dabei die Anprallprüfung TB11 (900 kg) ab, Massegruppe II gerade noch TB21 und TB22 (1.300 kg) und Massegruppe III TB31 und TB32 (1.500 kg). Im Bereich der Massegruppe IV findet sich keine Anprallprüfung nach DIN EN 1317 wieder. Insbesondere durch die Entwicklung des Pkw-Bestandes mit einer steigenden Zahl an Zulassungen von Geländewagen und SUV (Abbildung 3-28) und damit steigender Fahrzeugmassen (Abbildung 3-29) repräsentieren die Anprallprüfungen an dieser Stelle nicht mehr das komplette Verkehrs- und Unfallgeschehen.

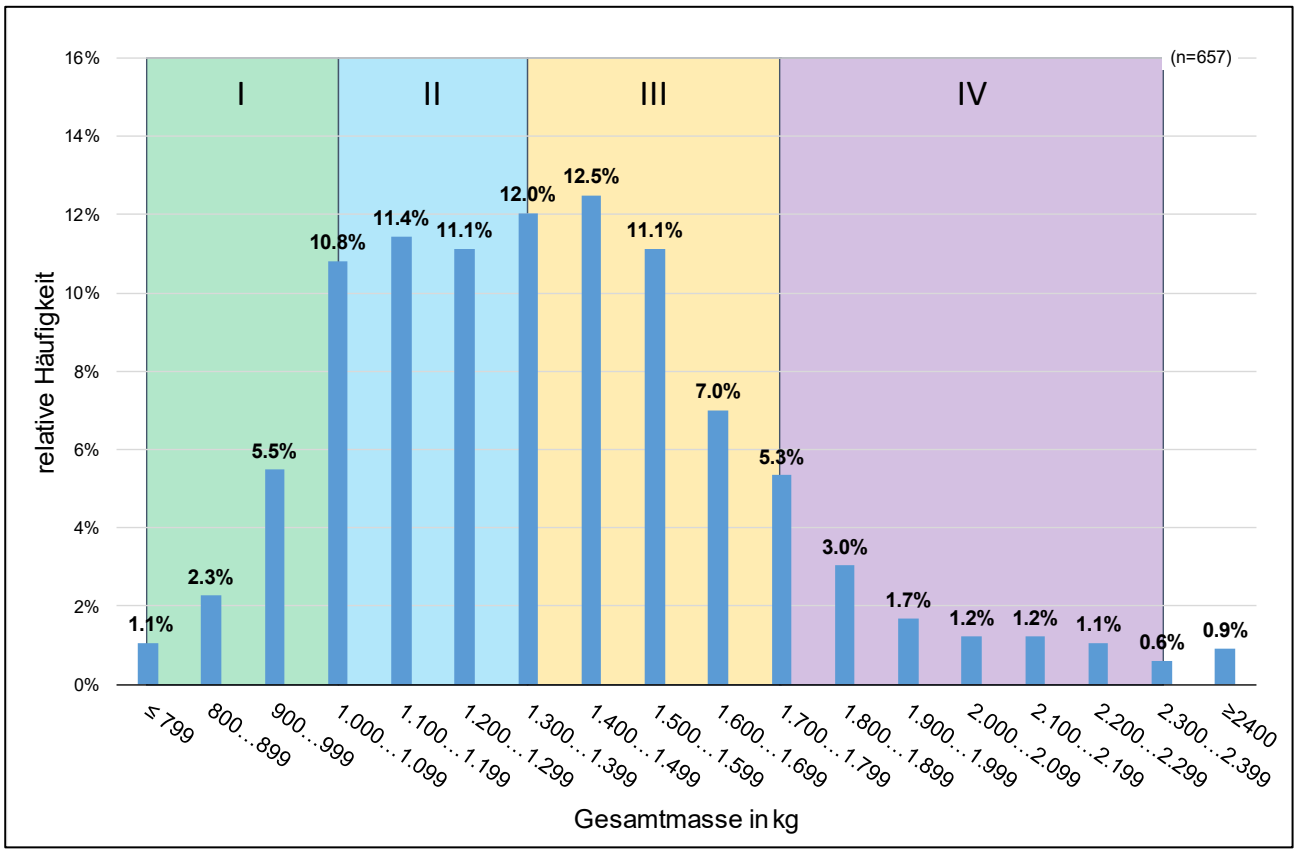


Abbildung 4-2: Massegruppen und deren Häufigkeit im Unfallgeschehen

Für alle Auswertungen muss dabei die Einschränkung beachtet werden, dass der Ursprung aller Werte eine Unfallrekonstruktion ist. Da diese ohne elektronische Abspeicherung der Kenngrößen (z.B. durch einen Event Data Recorder) zwangsläufig gewissen Ungenauigkeiten unterliegen, sind alle Werte mit einer Toleranz zu betrachten. Daher werden die Klassengrenzen für die Parameter v_k und α relativ breit gewählt. Aufgrund der begrenzten Anzahl von Fahrzeuginsassen innerhalb der Gruppen sind die abgeleiteten Aussagen als Tendenzen zu interpretieren.

4.1. Relevanz im v_k-α-Diagramm

Während in 3.3.2 in Abbildung 3-25 und Abbildung 3-26 die Anprallparameter getrennt betrachtet werden, kann durch eine kombinierte Auswertung im v_k-α-Diagramm der Zusammenhang zwischen Kollisionsgeschwindigkeit und -winkel betrachtet werden.

Abbildung 4-3 zeigt die Relevanz als relative Häufigkeit h (m, v_k, α) aller Unfälle mit PSE-Anprall für alle Massegruppen. In der Matrix sind nicht alle Bereiche besetzt, da manche Kombinationen nur sehr selten im Unfallgeschehen auftreten. Insbesondere hohe Kollisionsgeschwindigkeiten mit großem Kollisionswinkel sind nur selten oder gar nicht in der Stichprobe enthalten, weshalb sich dieser Bereich einer Auswertung entzieht. Es bedeutet, aber gleichzeitig auch, dass dieser Bereich als Belastungsfall für PSE sehr geringe Relevanz besitzt.

Die Anprallprüfungen nach DIN EN 1317 sind durch farbige Kreise gekennzeichnet, deren Durchmesser proportional zur geprüften Fahrzeugmasse gewählt ist. Unter der Annahme, dass eine höhere Kollisionsgeschwindigkeit und ein größerer Kollisionswinkel zu einem höheren Verletzungsrisiko für die Fahrzeuginsassen führen, decken die in der DIN enthaltenen Anprallprüfungen das Unfallgeschehen bezüglich der Anprallkonstellation sehr gut ab. Sehr hohe Kollisionsgeschwindigkeiten von $v_k \geq 120$ km/h werden nicht geprüft.

Bei der Auswertung wird deutlich, dass hohe Kollisionsgeschwindigkeiten meist mit kleineren Kollisionswinkeln (α < 10°) einhergehen. Insbesondere ab etwa 100 km/h treten Kollisionswinkel mit α > 20° nahezu nicht mehr auf. Hohe Kollisionsgeschwindigkeiten und kleine Kollisionswinkel entsprechen dem „klassischen“ Szenario von Unfällen auf – oft mehrspurigen – Außerortsstraßen und Autobahnen mit PSE neben der Fahrbahn. Durch die Trägheit der Fahrzeuge kommt es im Fall eines Kontrollverlustes meist zu keiner großen Ablenkung vor einem PSE-Anprall. Große Kurvenradien tragen ebenfalls dazu bei, dass auf Straßen mit hohen Fahrgeschwindigkeiten nur kleine Kollisionswinkel auftreten.

Abbildung 4-5 bis Abbildung 4-11 zeigen die Häufigkeitsverteilungen h (m, v_k, α) der Massegruppen I – IV.

Häufigkeit aller Unfälle mit PSE-Anprall (n_{PKW}=567, $n_{Personen}$=861)									
Kollisionswinkel in °	41...45	0.2%	0.2%	0.4%	0.0%	0.2%	0.2%	0.0%	0.0%
	36...40	0.2%	0.4%	0.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	31...35	0.2%	1.4%	0.5%	1.1%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%
	26...30	0.4%	0.7%	1.1%	0.5%	0.7%	0.2%	0.0%	0.0%
	21...25	0.4%	1.6%	2.3%	1.2%	0.0%	0.5%	0.4%	0.0%
	16...20	1.4%	0.9%	3.4%	3.7%	1.2%	0.9%	0.9%	0.0%
	11...15	1.1%	1.2%	2.6%	4.2%	2.6%	3.0%	1.4%	0.2%
	6...10	1.4%	1.9%	3.4%	4.1%	3.2%	4.4%	1.9%	0.7%
	0...5	3.4%	3.7%	5.1%	5.1%	5.1%	3.7%	2.1%	1.9%
		< 20	20…39	40…59	60…79	80…99	100…119	120...139	≥ 140
		Kollisionsgeschwindigkeit in km/h							

TB 11
TB 21
TB 22
TB 31
TB 32

Abbildung 4-3: Häufigkeitsmatrix h (m, v_k, α) – aller Unfälle mit PSE-Anprall

4.2. Gefährdungsmatrix

Die Häufigkeitsmatrizen $h(m, v_k, \alpha)$ in 4.1 geben Aufschluss darüber, welche Anprallkonstellationen in Unfällen mit Personenschäden wie häufig auftreten. Daraus ist jedoch nicht direkt abzulesen, welche der Konstellationen für Insassen gefährlicher sind und ob die Annahme, dass höhere Kollisionsgeschwindigkeiten und Kollisionswinkel zu höheren Verletzungsschweren führen, gerechtfertigt ist. Eine Betrachtung der Verletzungsschwere mithilfe der Abbreviated Injury Scale (AIS) oder des maximalen AIS (MAIS) bietet sich in diesem Fall leider nicht an, da sich der Wert als nicht-metrische Größe nicht in Form eines Mittelwertes oder eines ähnlichen repräsentativen Wertes je Parametergruppe berechnen lässt. Eine weitere übliche Betrachtungsweise stellt der Anteil der MAIS2+-verletzten Personen dar. Aufgrund der großen Anzahl möglicher Kombinationen aus vier Massengruppen, neun Kollisionswinkelgruppen und acht Kollisionsgeschwindigkeitsgruppen besitzt eine solche Betrachtung wegen zu geringer Unfallzahlen keine Aussagekraft.

Alternativ werden zur Identifikation potenziell gefährlicher Konstellationen die Aspekte Relevanz (Exposition) und (Unfall)Folgen in einer kombinierten Bewertung berücksichtigt. Als Maß für die (Unfall)Folgen wird die Letalität als Funktion der Verletzungsschwere $f(MAIS)$ verwendet. Die Bewertung der Insassengefährdung wird in Anlehnung an die ISO 26262 [32] wie folgt vorgeschlagen:

$$R = E(1 - C)S * 100.000 \qquad 4.1$$

mit:	R … Risk	Risiko,	hier: Insassengefährdung g
	E … Exposure	Exposition,	hier: im Verhältnis zu allen PSE-Anprallen
	C … Controllability	Kontrollierbarkeit,	hier: $C_{Unfall} \stackrel{\text{def}}{=} 0$
	S … Severity	Schwere,	hier: $Letalität = f(MAIS)$ (Abbildung 4-4)

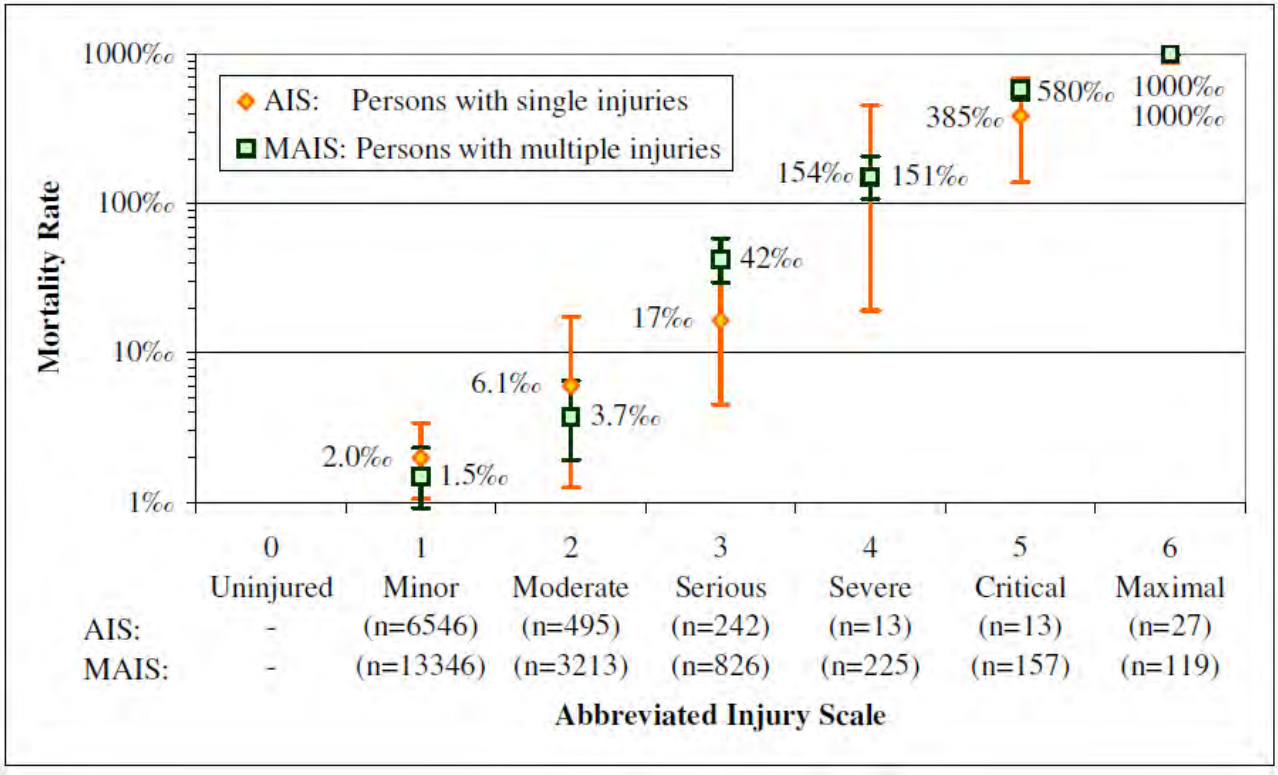


Abbildung 4-4: Letalität in Verkehrsunfällen [33]

Die Gefährdungsmatrix ist somit eine Darstellung der Gefährdung als Produkt aus Letalität und der relativen Häufigkeit von allen Unfällen im v_k-α-Diagramm. Der Faktor 100.000 ist beliebig gewählt und dient lediglich zum vereinfachten Umgang mit den Zahlen, die relativen Unterschiede werden davon nicht beeinflusst. Die Werte der Gefährdungsmatrix sind einheitenlos und können somit auch zwischen den verschiedenen Massegruppen miteinander verglichen werden, da sich die Häufigkeit auf die gesamte Population von Pkw-Unfällen mit PSE-Anprall bezieht.

Abbildung 4-6 bis Abbildung 4-12 zeigen die Gefährdungsmatrizen $g(m, v_k, \alpha, Letalität)$ der Massegruppen. Auf Basis der Diagramme bestätigt sich dabei die Annahme, dass große Kollisionsgeschwindigkeiten und Kollisionswinkel zu einer hohen Insassengefährdung führen, nur bedingt. Auch andere Bereiche gehen mit einer erhöhten Insassengefährdung einher. Die Anprallprüfungen nach DIN EN 1317 decken nicht alle dieser Bereiche ab.

Massegruppe I (798 – 1.016 kg) (n_{PKW}=59, $n_{Personen}$=65)									
Kollisionswinkel in °	41...45	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	36...40	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	31...35	0.0%	2.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	26...30	0.0%	0.0%	2.2%	0.0%	2.2%	0.0%	0.0%	0.0%
	21...25	0.0%	0.0%	4.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	16...20	2.2%	2.2%	4.4%	6.7%	0.0%	0.0%	2.2%	0.0%
	11...15	0.0%	6.7%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	0.0%	0.0%
	6...10	0.0%	2.2%	4.4%	2.2%	2.2%	2.2%	0.0%	0.0%
	0...5	2.2%	6.7%	4.4%	11.1%	8.9%	4.4%	0.0%	0.0%
		< 20	20…39	40…59	60…79	80…99	100…119	120...139	≥ 140
		Kollisionsgeschwindigkeit in km/h							

TB 11 TB 21 TB 22 TB 31 TB 32

Abbildung 4-5: Häufigkeitsmatrix h (m, v_k, α) – Massegruppe I

Massegruppe I (798 – 1.016 kg) (n_{PKW}=59, $n_{Personen}$=65)									
Kollisionswinkel in °	41...45	0,0	0,0	0,0	n.a.	0,0	0,0	n.a.	n.a.
	36...40	0,0	0,0	0,0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	31...35	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	n.a.	n.a.	n.a.
	26...30	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	n.a.	n.a.
	21...25	0,0	0,0	0,0	0,0	n.a.	0,0	0,0	n.a.
	16...20	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	n.a.
	11...15	0,0	0,0	2,0	3,2	0,0	4,5	0,0	0,0
	6...10	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	8,2	0,0	0,0
	0...5	0,0	0,0	0,0	3,8	1,5	0,0	0,0	0,0
		< 20	20…39	40…59	60…79	80…99	100…119	120...139	≥ 140
		Kollisionsgeschwindigkeit in km/h							

TB 11 TB 21 TB 22 TB 31 TB 32

Abbildung 4-6: Gefährdungsmatrix g (m, v_k, α, Letalität) – Massegruppe I

In Massegruppe I zeigt der Bereich, in dem die TB11 Anprallprüfung liegt, keine erhöhte Gefährdung, da keine Unfälle mit dieser Kombination von Kollisionsgeschwindigkeit, Kollisionswinkel und Fahrzeugmasse in den Unfalldaten auftreten (Abbildung 4-5). Allerdings liegen alle erhöhten Gefährdungswerte im Bereich kleinerer Kollisionsgeschwindigkeiten und Kollisionswinkel. Zusätzlich zeigt der Bereich von 40 – 60 km/h und 6 – 20° höhere Werte, findet sich allerdings nicht in den geforderten Anprallprüfungen wieder. Der deutlich erhöhte Wert im Bereich von Kollisionsgeschwindigkeit von 100 – 119 km/h und Winkeln von 6 – 15° spricht für eine höhere Gefährdung bei kleineren Anprallwinkeln als im Test. Diese resultiert hauptsächlich aus der großen Häufigkeit.

Massegruppe II (1.017 – 1.361 kg) (n_{PKW}=269, $n_{Personen}$=367)									
Kollisionswinkel in °	41...45	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	36...40	0.4%	0.4%	0.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	31...35	0.0%	1.7%	0.9%	1.7%	0.9%	0.0%	0.0%	0.0%
	26...30	0.4%	0.9%	1.3%	0.4%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%
	21...25	0.0%	0.9%	2.6%	0.9%	0.0%	0.4%	0.4%	0.0%
	16...20	0.9%	0.4%	5.1%	3.8%	0.9%	1.7%	0.9%	0.0%
	11...15	0.9%	0.4%	3.8%	6.0%	3.0%	4.7%	1.7%	0.0%
	6...10	2.6%	0.9%	2.1%	5.1%	3.4%	3.0%	2.6%	0.4%
	0...5	3.4%	3.4%	4.3%	3.8%	3.8%	1.7%	2.6%	0.4%
		< 20	20…39	40…59	60…79	80…99	100…119	120...139	≥ 140
		Kollisionsgeschwindigkeit in km/h							

TB 11
TB 21
TB 22
TB 31
TB 32

Abbildung 4-7: Häufigkeitsmatrix h (m, v_k, α) – Massegruppe II

Massegruppe II (1.017 – 1.361 kg) (n_{PKW}=269, $n_{Personen}$=367)									
Kollisionswinkel in °	41...45	0,3	0,0	0,5	n.a.	0,0	0,0	n.a.	n.a.
	36...40	0,0	0,3	0,0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	31...35	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	n.a.	n.a.	n.a.
	26...30	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,1	n.a.	n.a.
	21...25	0,0	2,4	1,6	1,6	n.a.	4,9	0,0	n.a.
	16...20	0,0	0,0	3,0	2,8	0,9	0,7	0,7	n.a.
	11...15	0,5	0,0	1,8	3,5	2,3	2,5	2,1	0,0
	6...10	0,0	1,0	1,4	1,5	2,0	1,1	10,9	0,0
	0...5	0,0	1,1	1,3	2,2	1,4	2,8	0,7	0,0
		< 20	20…39	40…59	60…79	80…99	100…119	120...139	≥ 140
		Kollisionsgeschwindigkeit in km/h							

TB 11
TB 21
TB 22
TB 31
TB 32

Abbildung 4-8: Gefährdungsmatrix g (m, v_k, α, Letalität) – Massegruppe II

Massegruppe III (1.362 – 1.780 kg) (n_{PKW}=269, $n_{Personen}$=462)									
Kollisionswinkel in °	41...45	0.0%	0.4%	0.4%	0.0%	0.4%	0.4%	0.0%	0.0%
	36...40	0.0%	0.4%	1.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	31...35	0.4%	0.4%	0.4%	0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	26...30	0.4%	0.8%	0.4%	0.8%	0.8%	0.4%	0.0%	0.0%
	21...25	0.8%	3.0%	2.1%	2.1%	0.0%	0.4%	0.4%	0.0%
	16...20	1.7%	0.8%	2.1%	3.0%	2.1%	0.4%	0.8%	0.0%
	11...15	1.3%	1.3%	2.1%	3.4%	3.0%	1.3%	1.7%	0.0%
	6...10	0.4%	2.1%	3.8%	3.8%	3.0%	5.9%	1.7%	1.3%
	0...5	4.2%	3.8%	5.1%	5.5%	3.0%	5.9%	2.5%	2.5%
		< 20	20…39	40…59	60…79	80…99	100…119	120...139	≥ 140
		Kollisionsgeschwindigkeit in km/h							

TB 11
TB 21
TB 22
TB 31
TB 32

Abbildung 4-9: Häufigkeitsmatrix h (m, v_k, α) – Massegruppe III

Massegruppe III (1.362 – 1.780 kg) (n_{PKW}=269, $n_{Personen}$=462)									
Kollisionswinkel in °	41...45	0,0	0,0	0,0	n.a.	0,0	0,0	n.a.	n.a.
	36...40	0,0	0,3	0,0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	31...35	0,0	0,4	0,0	0,8	0,4	n.a.	n.a.	n.a.
	26...30	0,0	0,3	0,3	0,5	0,0	0,0	n.a.	n.a.
	21...25	0,0	1,5	0,0	0,6	n.a.	0,8	0,0	n.a.
	16...20	0,0	0,0	1,6	2,4	4,4	0,2	1,3	n.a.
	11...15	0,0	0,2	1,7	3,4	1,6	0,7	1,1	0,0
	6...10	0,0	1,3	2,2	0,5	4,0	1,2	2,2	0,4
	0...5	0,0	0,4	3,1	2,1	1,6	15,3	2,2	1,3
		< 20	20…39	40…59	60…79	80…99	100…119	120...139	≥ 140
		Kollisionsgeschwindigkeit in km/h							

TB 11
TB 21
TB 22
TB 31
TB 32

Abbildung 4-10: Gefährdungsmatrix g (m, v_k, α, Letalität) – Massegruppe III

Massegruppe II und III stellen die größten Gruppen dar (Abbildung 4-7 – Abbildung 4-10). Die Bereiche erhöhter Gefährdung werden zum Teil durch die Anprallprüfungen TB31 und TB32 abgedeckt (TB21, TB22 nur für Schutzplanken in Arbeitsbereichen); es finden sich aber auch erhöhte Gefährdungswerte im Bereich größerer Geschwindigkeiten und Kollisionswinkel. Es zeigen sich darüber hinaus auch erhöhte Werte bei sehr kleinen Kollisionswinkeln (α ≤ 5°). Beide Gruppen weisen erhöhte Gefährdungswerte (lokale Maxima über alle Massegruppen) im Bereich hoher Kollisionsgeschwindigkeiten (v_k = 100 – 139 km/h) und kleiner Winkel (α ≤ 10°) auf.

Massegruppe IV (1.781 – 2.334 kg) (n_{PKW}=59, $n_{Personen}$=114)									
Kollisionswinkel in °	41...45	0.0%	0.0%	1.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	36...40	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	31...35	0.0%	3.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	26...30	0.0%	0.0%	1.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	21...25	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.9%	0.0%	0.0%
	16...20	1.9%	1.9%	0.0%	3.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	11...15	1.9%	0.0%	0.0%	1.9%	0.0%	3.8%	0.0%	1.9%
	6...10	1.9%	5.8%	5.8%	1.9%	3.8%	5.8%	1.9%	0.0%
	0...5	0.0%	1.9%	9.6%	3.8%	17.3%	1.9%	0.0%	7.7%
		< 20	20…39	40…59	60…79	80…99	100…119	120...139	≥ 140
		Kollisionsgeschwindigkeit in km/h							

TB 11
TB 21
TB 22
TB 31
TB 32

Abbildung 4-11: Häufigkeitsmatrix h (m, v_k, α) – Massegruppe IV

Massegruppe IV (1.781 – 2.334 kg) (n_{PKW}=59, $n_{Personen}$=114)									
Kollisionswinkel in °	41...45	0,0	0,0	0,0	n.a.	0,0	0,0	n.a.	n.a.
	36...40	0,0	0,0	0,0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	31...35	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	n.a.	n.a.	n.a.
	26...30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	n.a.	n.a.
	21...25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	n.a.
	16...20	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	n.a.
	11...15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0
	6...10	0,0	0,0	1,3	1,2	1,0	0,8	0,0	0,0
	0...5	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	0,0	0,0	1,9
		< 20	20…39	40…59	60…79	80…99	100…119	120...139	≥ 140
		Kollisionsgeschwindigkeit in km/h							

TB 11
TB 21
TB 22
TB 31
TB 32

Abbildung 4-12: Gefährdungsmatrix g (m, v_k, α, Letalität) – Massegruppe IV

Massegruppe IV repräsentiert sehr große und schwere Fahrzeuge, die tendenziell im kostenintensiven und gut ausgestatteten Segment angesiedelt sind. Es ist keine Anprallprüfung innerhalb dieser Gruppe definiert. Die geringen Werte zeigen generell eine relativ geringe Gefährdung der Insassen. Insbesondere ist auffällig, dass der Bereich v_k = 40 – 60 km/h und α ≤ 10° trotz großer Häufigkeit kaum Gefährdung aufweist. Dies spricht für einen sehr guten Insassenschutz dieser Fahrzeuge. Lediglich im Bereich höherer Kollisionsgeschwindigkeit (80 – 119 km/h) und kleiner Winkel zeigen sich höhere Gefährdungswerte. Der Bereich sehr hoher Geschwindigkeiten (≥ 140 km/h) zeigt in einer Konfiguration mit kleinerem Kollisionswinkel einen leicht erhöhten Wert. Unfälle mit einer Kollisionsgeschwindigkeit über 140 km/h treten vorrangig in dieser Massegruppe auf.

4.3. Auswahl der zu untersuchenden Anprallkonstellationen

Auf Basis der Analysen des Unfallgeschehens werden ausgewählte Anprallkonstellationen für die weiteren Betrachtungen abgeleitet, mithilfe numerischer der Finite Elemente Methode (FEM) simuliert und anhand von zwei realen Anprallversuchen geprüft. Die Simulationen werden dabei getrennt für den Anprall des Fahrzeugs gegen die Schutzeinrichtung und für den Insassen (Fahrer) des Fahrzeugs durchgeführt (vergleiche Abschnitt 6.1). Auf diese Weise sollen Bereiche mit erhöhten Insassenbelastungswerten identifiziert werden, die derzeit nicht oder nur unzureichend durch die DIN EN 1317 adressiert werden. Insbesondere der Vergleich der genormten Anprallprüfungen mit den Stellen hoher Werte in den Gefährdungsmatrizen (erhöhte Häufigkeit und Schwere von Verletzungen) aus Unfalldaten gibt Aufschluss über potenzielle Prüfbereiche. Die Konstellationen werden im Wesentlichen durch die Parameter Anprallwinkel, Anprallgeschwindigkeit, Fahrzeugmodell (vor allem durch die Fahrzeugmasse) und die Eigenschaften der Schutzeinrichtung (Schutzplankenhöhe und -steifigkeit) beschrieben. Durch die Variation der Parameter bei gleichzeitiger Vergleichbarkeit mit vorhandenen Anprallprüfungen nach DIN EN 1317 kann der Einfluss auf die Insassenbelastung und die Verformung der Schutzeinrichtung untersucht werden.

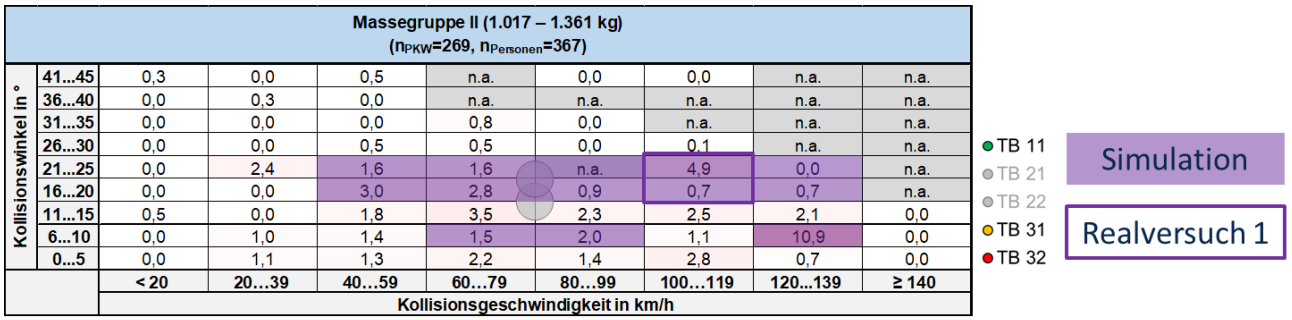


Abbildung 4-13: Auswahl der Anprallkonstellationen für Simulation und Realversuch 1

Abbildung 4-6 und Abbildung 4-8 zeigen die Gefährdungsmatrizen für sehr kleine bis mittlere Fahrzeuge (Massegruppe I und II). Derartige Fahrzeuge werden bei der Anprallprüfung TB11 (v_k = 100 km/h, α = 20°) adressiert, welche insbesondere die Gewährleistung des Insassenschutzes bei sehr steifen PSE berücksichtigen soll. Dafür wird gezielt der unterste Bereich der im Markt vertretenen Fahrzeugmassen spezifiziert. Bezüglich der Anprallgeschwindigkeit und des Anprallwinkels deckt TB11 durchaus den Bereich der höchsten Insassengefährdung ab. Eine Einschränkung gibt es dahingehend nur bezüglich höherer Geschwindigkeiten von 100 bis 140 km/h. Dies wird besonders deutlich für die Massegruppe II, wo der zweithöchste Gefährdungswert aller Massegruppen im Geschwindigkeitsbereich zwischen 120 und 140 km/h liegt.

Die Betrachtung aktueller Unfalldaten zeigt, dass es sich bei verunglückten Fahrzeugen mit Massen im Bereich des TB11 häufig um ältere Modelle handelt. Auch für Anpralltests im Rahmen der Zertifizierung von PSE werden häufig sehr alte Fahrzeuge verwendet, da sich in den jüngeren Modellpaletten der Hersteller kaum noch Fahrzeuge mit einer Fahrzeugmasse von 900 kg finden. Die Anpralltests TB31 und TB32 werden mit der höheren Masse von 1.500 kg durchgeführt, welche somit nicht mehr die leichtesten Fahrzeuge im Verkehr repräsentiert.

Im Rahmen des Forschungsprojekts werden je fünf Fahrzeug- und Insassensimulationen (Simulationsnummer 1, 1a, 2, 2a, 3, 3a, 4, 4a, 7, 7a) und ein Realversuch mit einem modernen Kleinwagen mit einer Fahrzeugmasse von 1.100 kg durchgeführt. Die Anprallgeschwindigkeit wird durch 50 km/h, 80 km/h, 110 km/h, 130 km/h und der Anprallwinkel durch 8° und 20° variiert. Der Realversuch wird in Anlehnung an die Anprallprüfung TB32 mit 110 km/h und 20° durchgeführt, wobei die Masse des Kleinwagens geringer ist als für ein Testfahrzeug nach TB32 gefordert. Bezogen auf die Anprallprüfung TB11 wird der Realversuch hingegen mit einer um 200 kg höheren Fahrzeugmasse und um

10 km/h höheren Anprallgeschwindigkeit durchgeführt als in TB11 vorgesehen. Der Anprallwinkel entspricht den Vorgaben der Anprallprüfung.

Im Bereich der Massegruppe III liegen die Anprallprüfungen TB31 und TB32, welche mit ihren Anprallparametern die Bereiche der größten Gefährdung der Insassen gut abdecken. Auch die Entwicklung der Fahrzeugflotte scheint durch die vorgeschriebene Masse des Testfahrzeugs von 1.500 kg bereits adressiert. Daher werden für diesen Bereich keine gesonderte Simulation oder Realversuch durchgeführt.

Massegruppe IV (1.781 – 2.334 kg)
(n_{PKW}=59, $n_{Personen}$=114)

Kollisionswinkel in °	< 20	20…39	40…59	60…79	80…99	100…119	120…139	≥ 140
41…45	0,0	0,0	0,0	n.a.	0,0	0,0	n.a.	n.a.
36…40	0,0	0,0	0,0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
31…35	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	n.a.	n.a.	n.a.
26…30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	n.a.	n.a.
21…25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	n.a.
16…20	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	n.a.
11…15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0
6…10	0,0	0,0	1,3	1,2	1,0	0,8	0,0	0,0
0…5	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	0,0	0,0	1,9

Kollisionsgeschwindigkeit in km/h

TB 11
TB 21
TB 22
TB 31
TB 32

Simulation

Realversuch 2

Abbildung 4-14: Auswahl der Anprallkonstellationen für Simulation und Realversuch 2

Im Bereich der Massegruppe IV findet sich derzeit keine Anprallprüfung nach DIN EN 1317 wieder. Insbesondere durch die Entwicklung des Pkw-Bestandes mit einer steigenden Zahl an Zulassungen von Geländewagen und damit steigender Fahrzeugmassen auch über 2.000 kg hinaus ist gerade diese Massegruppe für die weiteren Untersuchungen interessant. Beim Zusammenprall eines SUV mit einem Pkw ist das Risiko für schwerste und tödliche Verletzungen beim Unfallgegner um ein Mehrfaches höher als beim SUV. Dies liegt insbesondere an der Frontgeometrie und der größeren Masse des SUV [34]. Das lässt vermuten, dass SUV auch in PSE-Anprallen eine andere Charakteristik bezüglich Insassenbelastung und Schutzplankendeformation zeigen. Um dies genauer zu untersuchen, werden je zwei Fahrzeug- und Insassensimulationen mit 80 km/h bei 8° und mit 110 km/h bei 20° durchgeführt (Simulationsnummer 5, 5a, 6, 6a). Insbesondere die zweite Kombination ist im Vergleich mit der Anprallprüfung TB32 von Interesse, da sie sich von dieser durch die höhere Fahrzeugmasse unterscheidet. Daher wird der zweite Realversuch ebenfalls in Anlehnung an die Anprallprüfung TB32 mit 110 km/h und 20° mit einem Fahrzeug hoher Masse durchgeführt.

In zwei Simulationen mit PSE mit einer geringen Einbauhöhe (60 cm statt 75 cm, Simulationsnummer 8 und 9) wird zusätzlich der Einfluss zu niedrig eingebauter Systeme (vergleiche Abbildung 3-33) und damit das Risiko des Überfahrens als Sonderfall (vergleiche Abschnitt 3.3.6) betrachtet. Zur Vergleichbarkeit werden die Anprallparameter analog der Anprallprüfung TB32 gewählt. Insbesondere beim Anprall eines SUV ist aufgrund des hohen Schwerpunktes und der Frontstruktur des Fahrzeugs das Risiko des Auffahrens auf die Schutzeinrichtung erhöht. Für beide Fahrzeuge werden lediglich Fahrzeugsimulationen durchgeführt, um den Einfluss der Einbauhöhe der Schutzplanke auf die Fahrzeugkinematik qualitativ zu beurteilen. Auf zusätzliche Insassensimulationen zur Prognose biomechanischer Belastungen wird in diesem Zusammenhang verzichtet.

Bei den Simulationen 5 und 6 sowie dem Realversuch mit einem SUV ist damit zu rechnen, dass der Wirkungsbereich größer ausfällt als bei der Normprüfung TB32. Daher ist es interessant, eine Verstärkung des Systems zu simulieren (Simulationsnummer 10, 10a, 11, 11a) und die Auswirkungen auf den Wirkungsbereich und die Insassenbelastung zu untersuchen.

Auf Basis der erarbeiteten kritischen Anprallkonstellationen für Schutzplankenkollisionen wird die Betrachtung um Schutzwandkollisionen ergänzt, wobei mit dem Realversuch und den ersten Simulationen ein abweichender Weg beschritten wird. Anhand eines Realversuches (Nummer 3) werden

Fahrzeug- und Insassenbelastungen im Schutzwandanprall ermittelt. Die Simulationen 12 und 12a dienen zur Validierung des Anprallversuches im numerischen Modell.

Im Realversuch 3 wird ein Profil getestet, das bei Neugestaltungen oder Neubauprojekten von Streckenabschnitten mit Schutzwänden kaum mehr Verwendung findet. Folglich werden die Simulationen 13 bis 15 erweitert durch ein aktuelleres Schutzwandsystem, das sich im Simulationsmodell durch ein abweichendes Querschnittsprofil unterscheidet.

Auf Grundlage der unfalldatenbasierten Simulationsmatrix werden drei Anprallkonstellationen für Kleinwagen ausgewählt, die sich zu folgenden Variationen ergeben:

I. Variation der Schutzwand (Simulation 12 und 13)
II. Variation des Anprallwinkels (Simulation 13 und 14)
III. Variation der Kollisionsgeschwindigkeit (Simulation 14 und 15 | Simulation 13 und 16)

Tabelle 4-2 zeigt eine Übersicht aller Anprallkonstellationen, die mittels Simulation und den drei Realversuchen behandelt werden.

Tabelle 4-2: Anprallkonstellationen für die Simulationen und Realversuche

	Nr.	Anprall-winkel in °	Anprall-geschwindig-keit in km/h	Fahrzeugmodell
Stahlschutzplanke, normale Einbauhöhe (75 cm)	1	20	80	Kleinwagen
	1a	20	80	Kleinwagen Insassensimulation
	2	20	110	Kleinwagen
	2a	20	110	Kleinwagen Insassensimulation
	Realver-such 1	**20**	**110**	**Kleinwagen**
	3	8	80	Kleinwagen
	3a	8	80	Kleinwagen Insassensimulation
	4	20	50	Kleinwagen
	4a	20	50	Kleinwagen Insassensimulation
	5	8	80	SUV
	5a	8	80	SUV-Insassensimulation
	6	20	110	SUV
	6a	20	110	SUV-Insassensimulation
	Realver-such 2	**20**	**110**	**SUV**
	7	8	130	Kleinwagen
	7a	8	130	Kleinwagen Insassensimulation

	Nr.	Anprall-winkel in °	Anprall-geschwindigkeit in km/h	Fahrzeugmodell
Stahlschutzplanke, geringe Einbauhöhe (60 cm)	8	20	110	Kleinwagen
	9	20	110	SUV
Verstärkte **Stahlschutzplanke**, normale Einbauhöhe (75 cm)	10	20	110	SUV
	10a	20	110	SUV-Insassensimulation
	11	20	110	Kleinwagen
	11a	20	110	Kleinwagen Insassensimulation
Schutzwand mit New Jersey-Profil (älteres Schutzwandsystem)	**Realversuch 3**	**20**	**110**	**Kleinwagen**
	12	20	110	Kleinwagen
	12a	20	110	Kleinwagen Insassensimulation
Schutzwand mit New Jersey-Profil (aktuelleres Schutzwandsystem)	13	20	110	Kleinwagen
	13a	20	110	Kleinwagen Insassensimulation
	14	8	110	Kleinwagen
	14a	8	110	Kleinwagen Insassensimulation
	15	8	130	Kleinwagen
	15a	8	130	Kleinwagen Insassensimulation
	16	20	80	Kleinwagen
	16a	20	80	Kleinwagen Insassensimulation

5. Realversuche von Anprallen an Schutzeinrichtungen

Zur Überprüfung der Schutzwirkung der PSE werden drei reale Anprallversuche durchgeführt. Mit diesen Versuchen können die Anprallkonstellationen hinsichtlich ihrer Belastungen für den Fahrer genauer betrachtet werden. Insbesondere bei der Auswahl der Fahrzeuge soll sichergestellt werden, dass diese hinsichtlich Modelljahr, Ausführung und weiteren Parametern so gut wie möglich den in der Simulation verwendeten Fahrzeugmodellen entsprechen. Die Versuchsfahrzeuge müssen daher besonders hinsichtlich der Frontstruktur in gutem Zustand sein und funktionsfähige Rückhaltesysteme aufweisen.

Die Crashversuche erfolgen in Anlehnung an die Anprallprüfung TB32 aus der Norm DIN EN 1317. Es werden alle Vorgaben für Anprallprüfungen wie Versuchstoleranzen, Sensorpositionen, Messtoleranzen, Filterkriterien berücksichtigt. Die abweichenden und ergänzenden Prüfbedingungen werden in den folgenden Unterpunkten aufgeführt. Mithilfe des Crashtest-Dummys und der Messtechnik sollen Belastungen für den Fahrer bestimmt und damit Rückschlüsse auf die biomechanischen Belastungen gezogen werden.

Tabelle 5-1: Fahrzeugvorbereitung, Versuchsausstattung, Messtechnik

Versuchsgelände:	Siehe Abbildung 5-1
Videoaufzeichnung	Außenaufnahme und Positionen gemäß DIN EN 1317 OnBoard – Aufnahmen zur Aufzeichnung der Dummy-Bewegung
Fahrzeug:	Funktionsfähige Rückhaltesysteme fahrerseitig • Markierung des Gurtbandes und der Dummy-Brust zur Kenntlichmachung der Gurtstraffung • farbliche Markierungen am Dummy (abwischbar; zur Identifizierung eines eventuellen Dummy-Anpralls an Innenraumteilen): o Kopf links / Gesicht: Augenbraun, Nase, Mund o obere Extremität links: Hand, 2x Unterarm, 2x Oberarm o untere Extremität: Oberschenkel, Knie, Unterschenkel Triaxiale Beschleunigungsaufnehmer: • im Bereich des Mitteltunnels (nahe dem Fahrzeugschwerpunkt) • am Fahrzeugboden unterhalb des Fahrersitzes
Insasse (Fahrer):	Hybrid III „50th percentile male“-Dummy mit triaxialen Beschleunigungsaufnehmern in: o Kopf o Brust o Becken

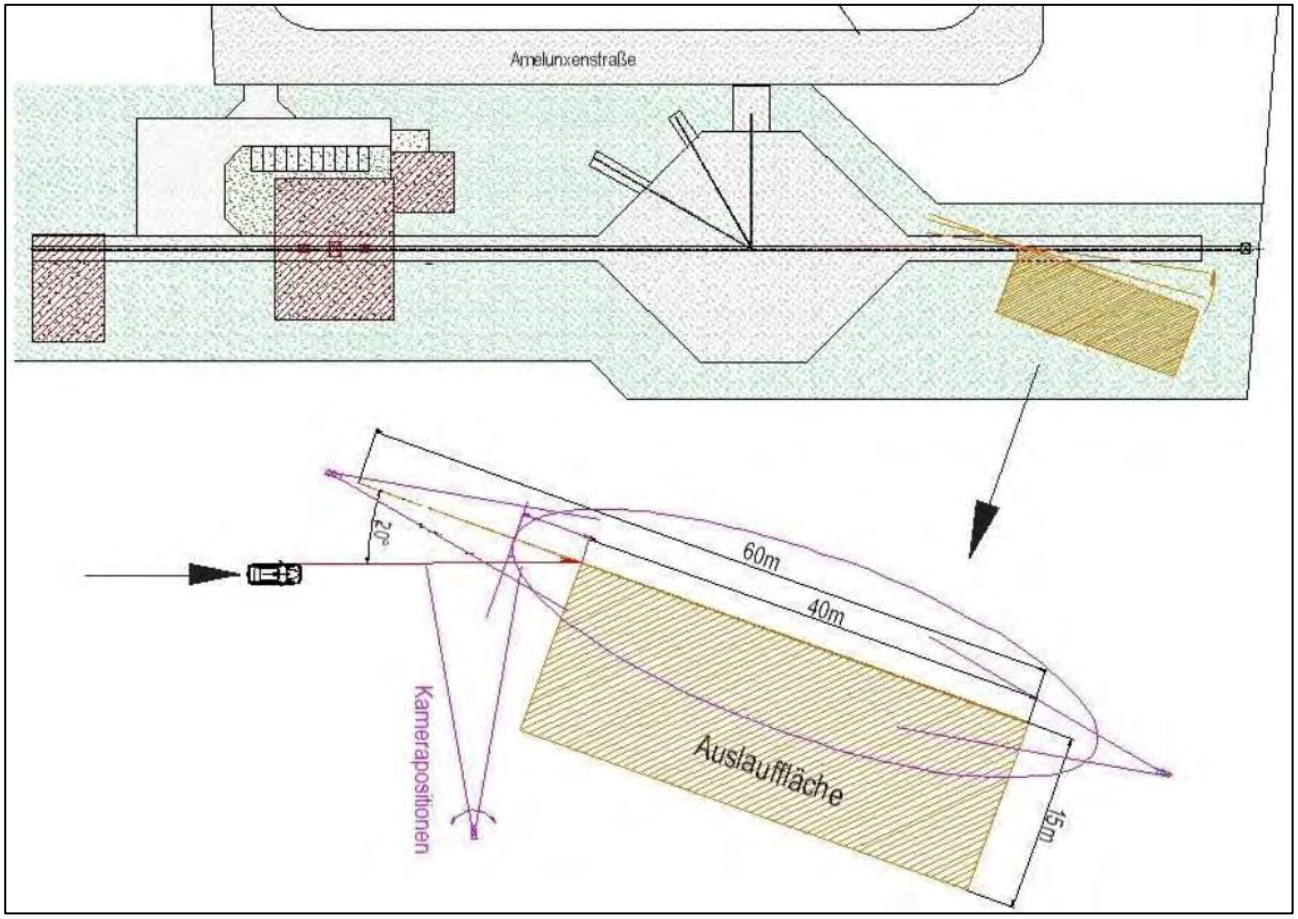


Abbildung 5-1: Prüfgelände

Die in den Realversuchen ermittelten Beschleunigungsbelastungen für Kopf, Brust und Becken liegen als zeitliche Verläufe vor. Aus diesen werden die für die Beurteilung der biomechanischen Belastung maßgeblichen Maximalwerte bestimmt und in der Ergebnistabelle wiedergegeben. Als relevanter Maximalwert für die jeweilige Körperregion gilt der „3-ms-Wert“ der resultierenden Beschleunigung der drei Achsenrichtungen. Dieser bezeichnet den höchsten Beschleunigungswert, der für eine Dauer von mindestens 3 ms erreicht wird. Für den Kopf wird zudem aus der resultierenden Beschleunigung der HIC-Wert (Head Injury Criterion) bestimmt. Dieser bewertet nicht nur die Höhe der Kopfbeschleunigung, sondern auch deren Einwirkdauer und gilt als Indikator für das Risiko eines Schädel-Hirn-Traumas.

Die Grenzwerte für die einzelnen Körperregionen sind:

- Biomechanische Limits im Bereich des Kopfes [37]
  - HIC 15 < 700
  - $a_{max,3ms}$ < 80 g
- Biomechanisches Limit im Brustbereich [38]
  - $a_{max,3ms}$ < 60 g
- Biomechanisches Limit im Beckenbereich [39]
  - $a_{max,3ms}$ < 60 g

5.1. Anprallversuch 1: Kleinwagen vs. Schutzplanke, 110 km/h, 20°

Tabelle 5-2 zeigt die Versuchsbedingungen für den ersten Anprallversuch. Die Ergebnisse der Anprallversuche sind berechnete Werte aus den Beschleunigungen des Fahrzeugs (ASI, THIV) und Belastungswerte für die Körperregionen Kopf, Brust und Becken des Dummys. Aus diesen Verläufen werden die relevanten Maximalwerte bestimmt. Die folgenden Diagramme zeigen den Verlauf der Fahrzeugbeschleunigung und die Belastungsverläufe für die drei Körperregionen.

Tabelle 5-2: Versuchsbedingungen Anprallversuch 1

Schutzsystem:	Stahlschutzplanke ESP (normale Einbauhöhe)
Fahrzeug:	Kleinwagen, 1.100 kg Masse mit Gurtstraffer, Gurtkraftbegrenzer Airbags auf der Fahrerseite aktiv: Frontairbag, Knieairbag, Thorax-Seitenairbag und Kopf-Seitenairbag Airbags auf der Beifahrerseite inaktiv/deaktiviert[8]: Frontairbag, Thorax-Seitenairbag und Kopf-Seitenairbag
Insasse (Fahrer):	Hybrid III “50th percentile male”-Dummy
Prüfanforderung:	In Anlehnung an TB32
Konstellation:	v_k = 110 km/h; α = 20°

Tabelle 5-3 zeigt die Zusammenfassung der Versuchsergebnisse des Anprallversuchs. Aufgrund der deutlichen Abweichung der Fahrzeugmasse von der Vorgabe bei der Anprallprüfung nach Norm ist die Bestimmung des normalisierten Wirkungsbereichs (siehe Abschnitt 2.3.3) nicht mehr sinnvoll anzuwenden. Auf eine Berechnung wird daher verzichtet.

Tabelle 5-3: Versuchsergebnisse Anprallversuch 1

Tatsächliche Anprallparameter:	v_k = 113,8 km/h (+3,5 %); α = 20° (±0 %)
Abprallgeschwindigkeit[9]	57,2 km/h
Index der Schwere der Beschleunigung (ASI)	0,73
Anprallheftigkeitsstufe	A
Theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfes (THIV)	22,6 km/h (Flugzeit: 132 ms)
Dynamische Durchbiegung	0,95 m
Wirkungsbereich	0,98 m
Klasse des Wirkungsbereiches	W3
Kontaktstrecke[10]	12,32 m
ausgelöste Rückhaltesysteme im Prüffahrzeug	Fahrerairbag und Knieairbag

[8] Zur besseren Dokumentation des Anprallversuches durch On-Board Kameras wurden die beifahrerseitigen Airbags deaktiviert.
[9] Die Abprallgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, die das Fahrzeug noch besitzt, wenn es das Schutzsystem zum ersten Mal verlassen hat.
[10] Die Kontaktstrecke ist die Strecke, auf der das Fahrzeug Kontakt mit dem Schutzsystem hat, vom ersten Punkt des Anpralls, bis zum letzten Kontakt beim ersten Verlassen des Systems. Ein erneutes Hineinfahren in das System wird hierbei nicht berücksichtigt.

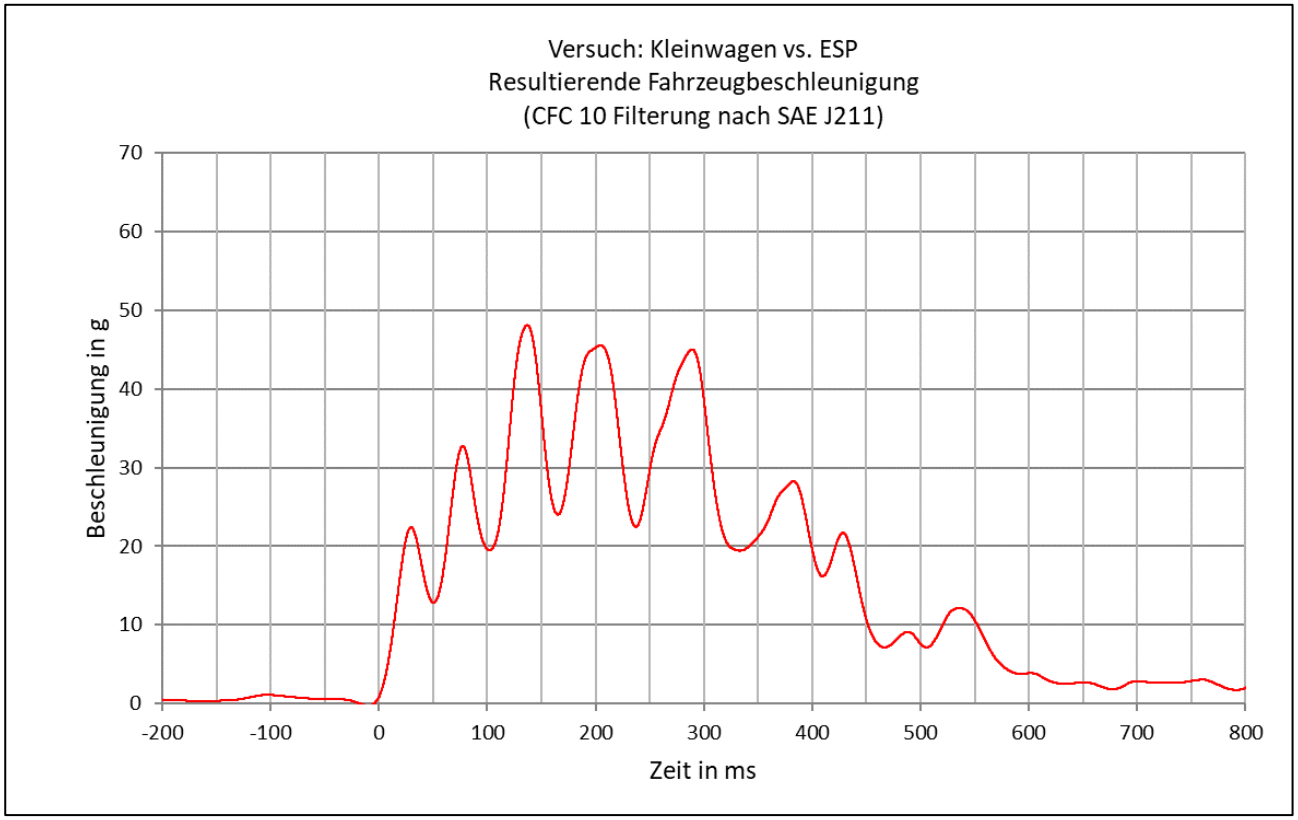


Abbildung 5-2: Anprallversuch 1 – Fahrzeugbeschleunigung, Messstelle Mitteltunnel

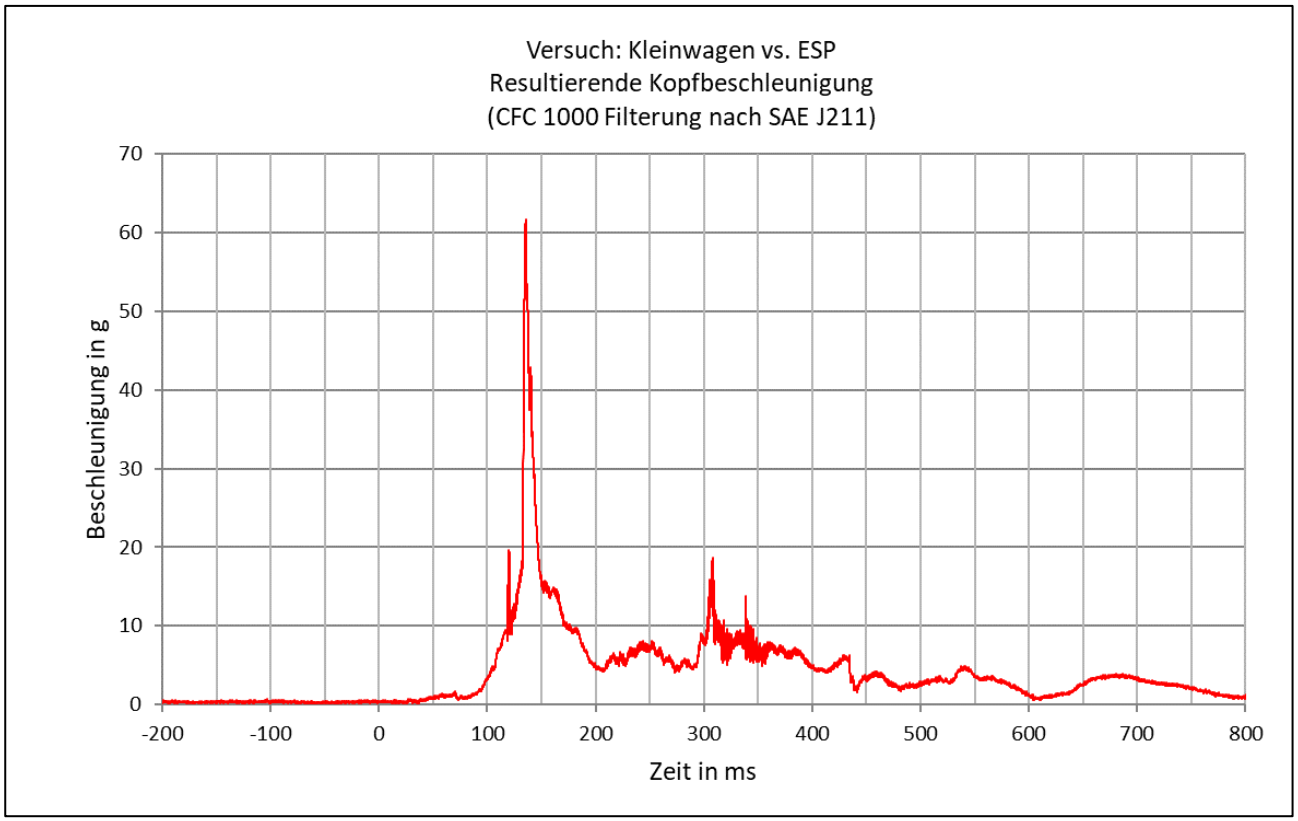


Abbildung 5-3: Anprallversuch 1 – Kopfbeschleunigung

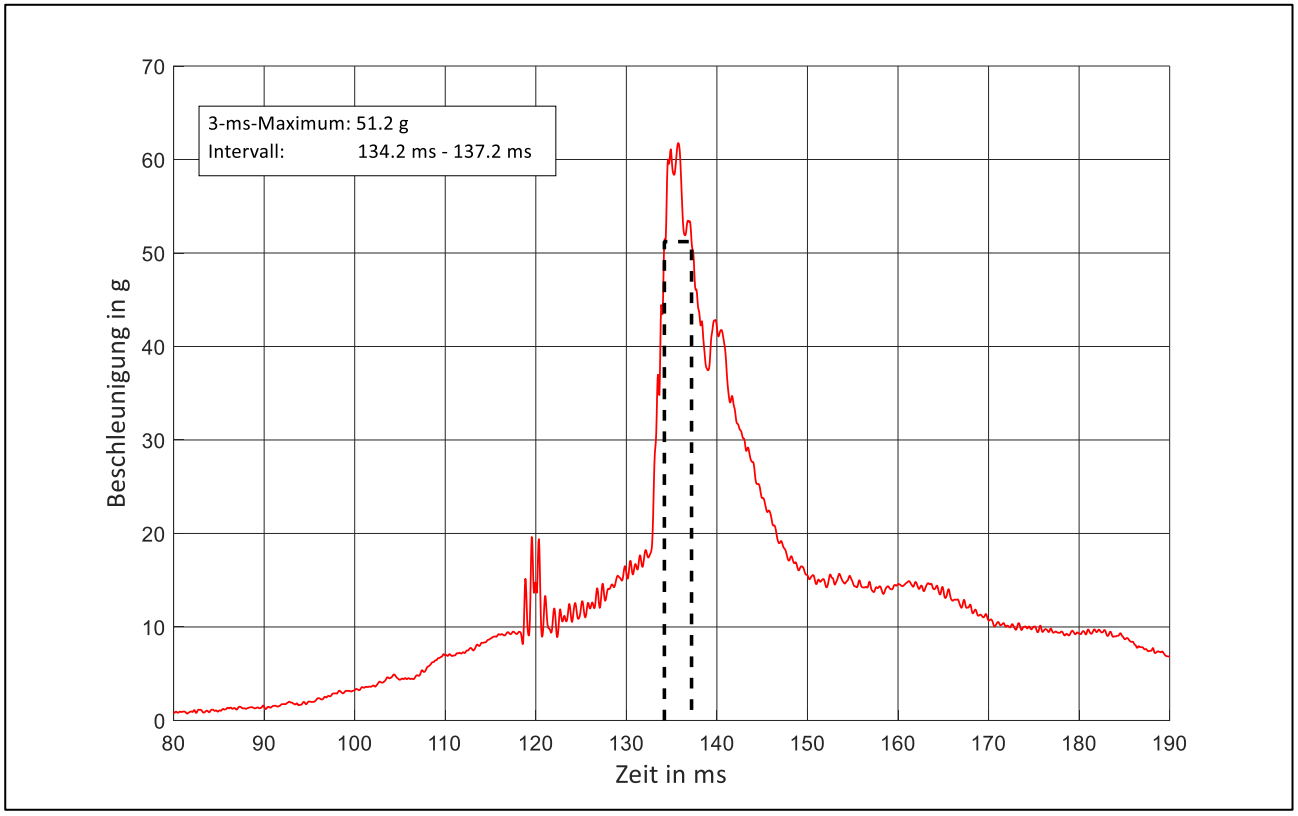


Abbildung 5-4: Anprallversuch 1 – Kopfbeschleunigung – 3-ms-Maximum

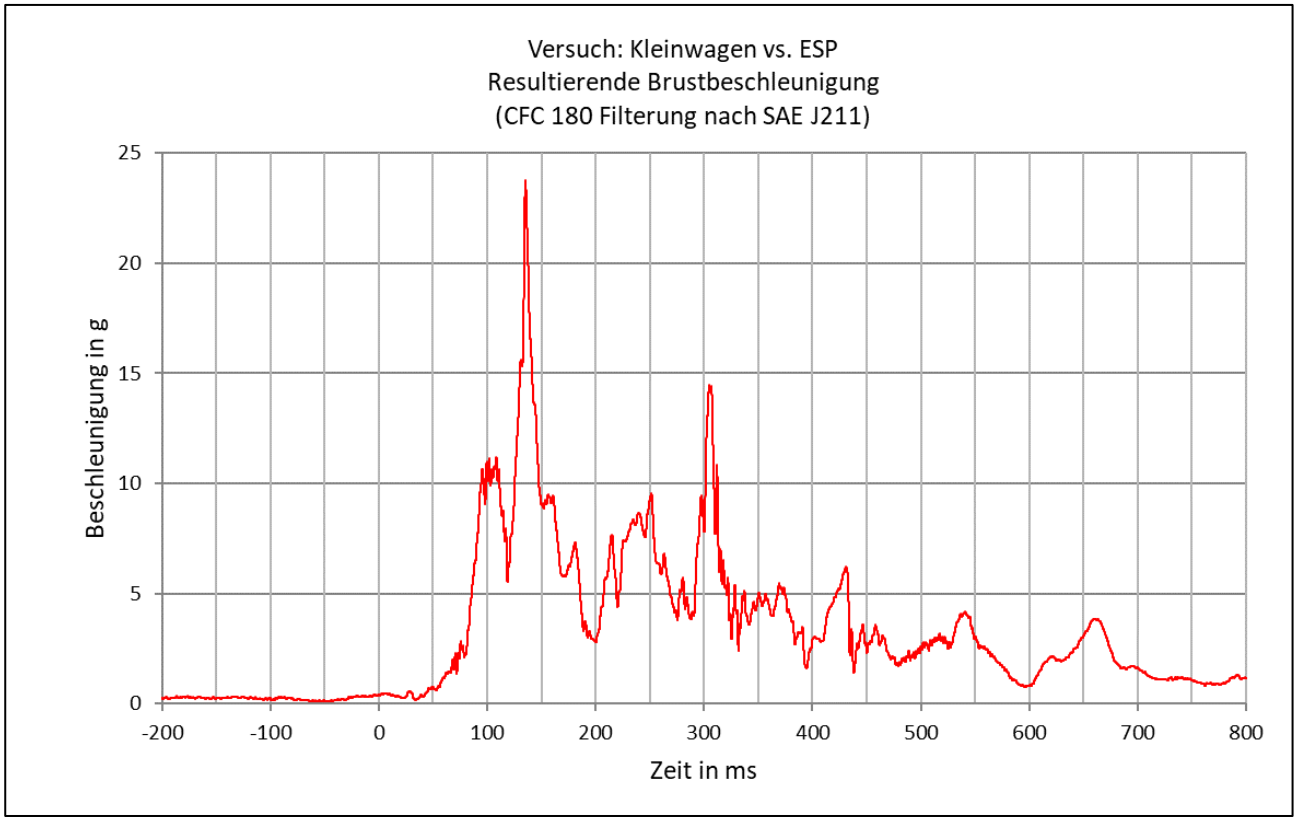


Abbildung 5-5: Anprallversuch 1 – Brustbeschleunigung

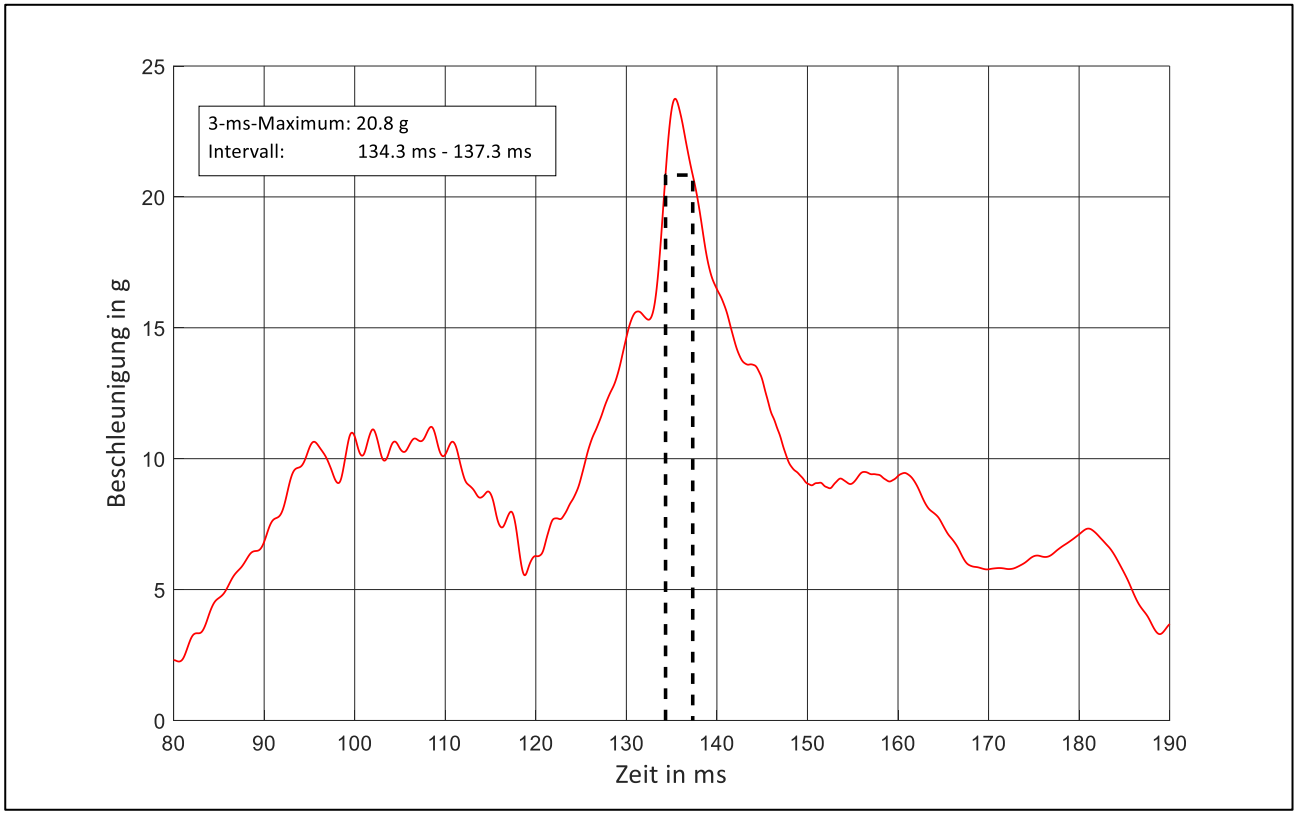


Abbildung 5-6: Anprallversuch 1 – Brustbeschleunigung – 3-ms-Maximum

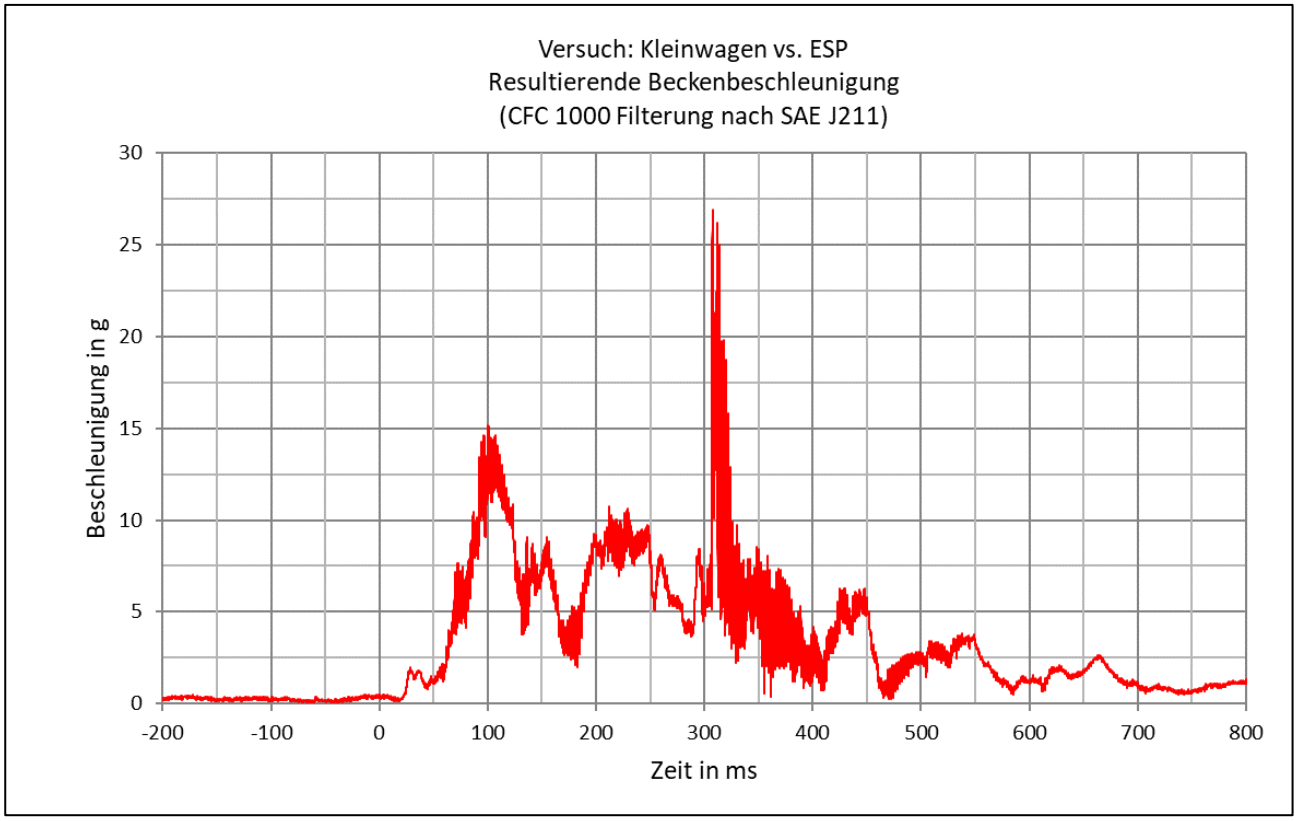


Abbildung 5-7: Anprallversuch 1 – Beckenbeschleunigung

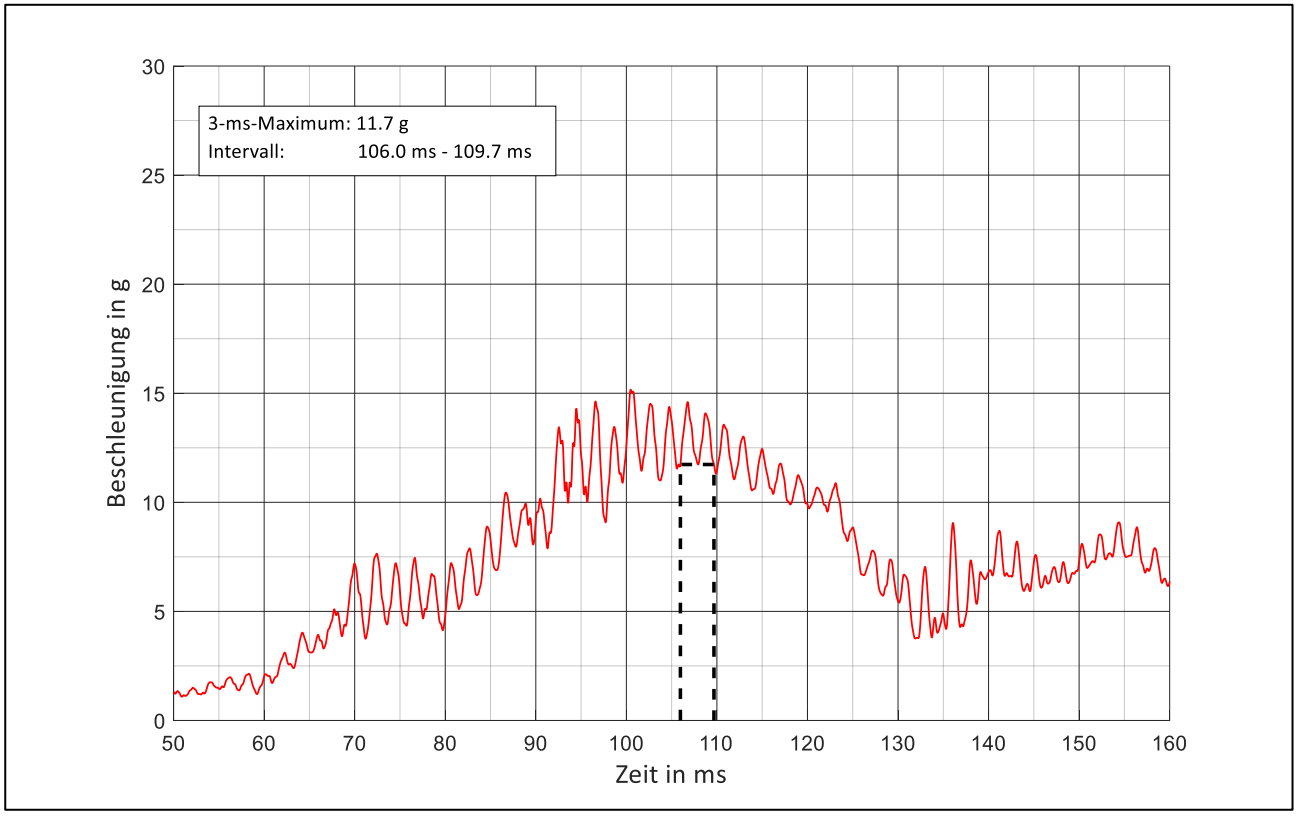


Abbildung 5-8: Anprallversuch 1 – Beckenbeschleunigung – 3-ms-Maximum[11]

Abbildung 5-9 zeigt Bilder der Videoaufzeichnung des Anprallversuchs 1 im Abstand von jeweils 35 Frames (Aufnahme mit 200 Hz = 200 fps, Zeitspanne zwischen zwei Abbildungen: 0,175 s).

Die Schutzeinrichtung hat das Prüffahrzeug erfolgreich aufgehalten, das Fahrzeug ist innerhalb des vorgegebenen Abprallbereichs (siehe 2.4) geblieben und der Anprallversuch hat auch darüber hinaus keine Auffälligkeiten im Sinne der Abnahmekriterien gezeigt. Die im Anprallversuch ermittelten ASI- und THIV-Werte sowie die Verformung der Schutzplanke resultieren in einer Anprallheftigkeit der Klasse A, einem maximalen Wirkungsbereich der Klasse W3 und einer dynamischen Durchbiegung von 1,0 m.

Die Dummy-Messwerte unterschreiten die kritischen Werte der Insassenbelastung. Auch der aus einem seitlichen Anprall des Kopfes gegen die seitliche Innenraumstruktur herrührende 3-ms-Wert der Kopfbeschleunigung (51 g) liegt noch deutlich unterhalb des Grenzwertes von 80 g. Der vorhandene Thorax- und Kopfseitenairbag lösten beim Anprall nicht aus. Der Fahrer- und der Knieairbag lösten erst etwa 280 ms nach dem Erstkontakt mit der Schutzplanke aus, vermutlich aufgrund des Verhakens des linken Vorderrades am fünften Pfosten. Ein Kontakt des Kopfes mit dem aufgeblasenen Luftsack fand nicht statt.

Abbildung 5-10 zeigt Bilder der OnBoard-Videoaufzeichnung des Anprallversuchs 1 im Abstand von jeweils 175 Frames (Aufnahme mit 1.000 Hz = 1.000 fps, Zeitspanne zwischen zwei Abbildungen: 0,175 s).

[11] Der betrachtete Bereich wird auf den Erstanprall ($0\ ms \leq t \leq 300\ ms$) begrenzt, da dort der Hauptenergieeintrag stattfindet. Die großen Ausschläge im weiteren Verlauf ($300\ ms \leq t \leq 400\ ms$) sind mit dem Verhaken des linken Vorderrades mit dem Pfosten in Verbindung zu bringen (globales 3-ms-Maximum: 12,7 g im Bereich $309{,}3\ ms \leq t \leq 312.3\ ms$)

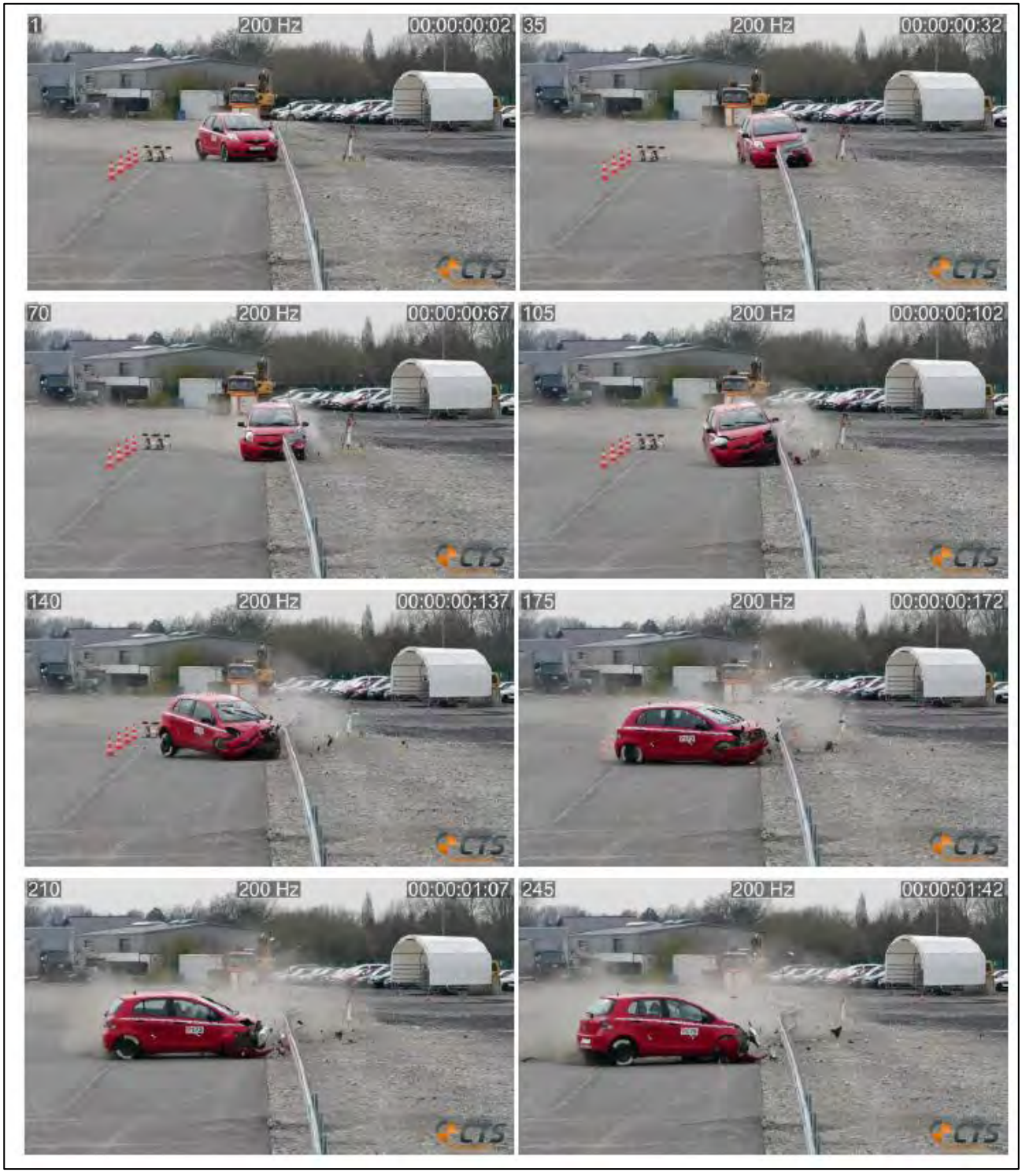


Abbildung 5-9: Anprallversuch 1 – Bildsequenz (0 ms bis 1225 ms)

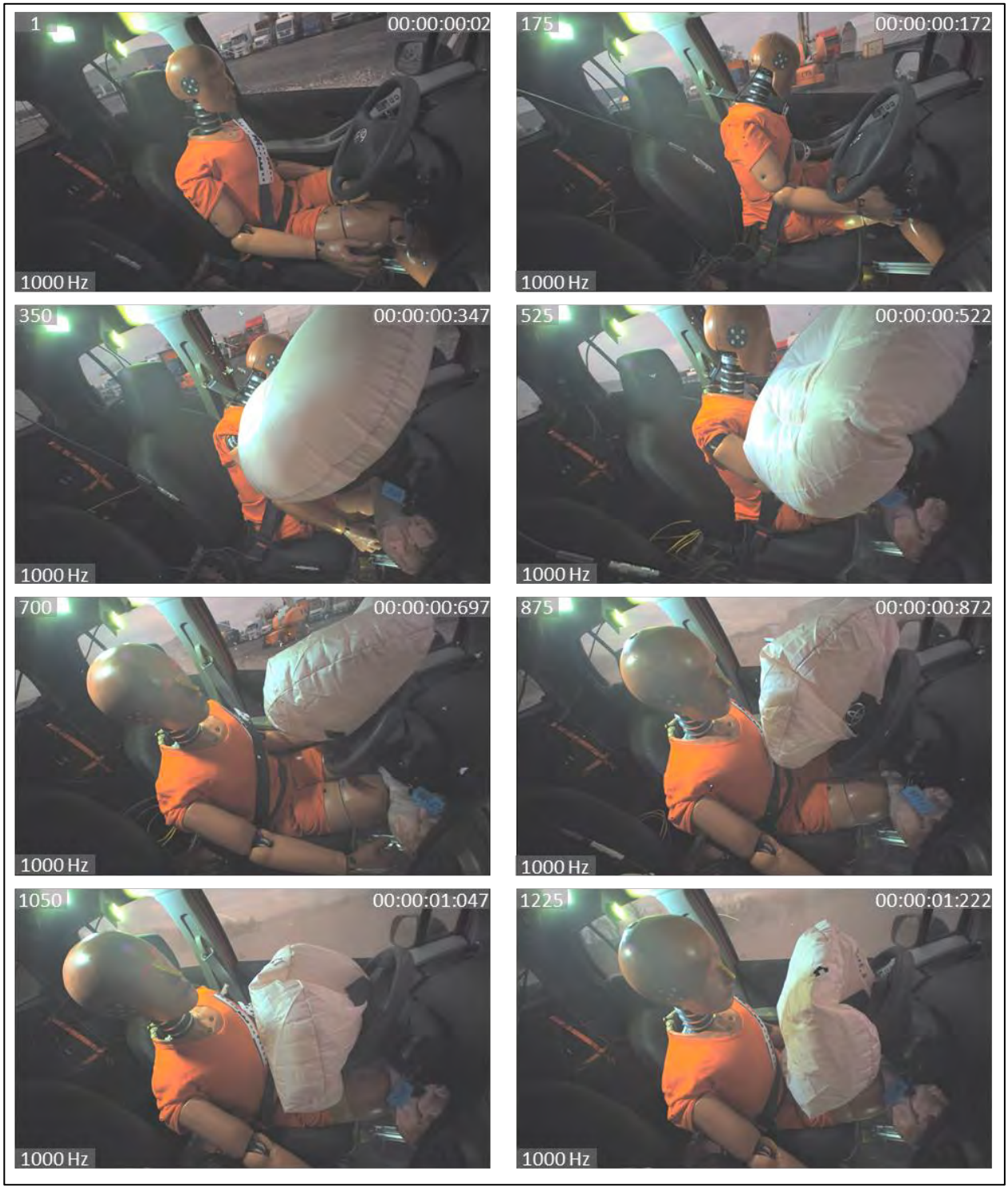


Abbildung 5-10: Anprallversuch 1 – Bildsequenz – OnBoard (0 ms bis 1225 ms)

5.2. Anprallversuch 2: SUV vs. Schutzplanke, 110 km/h, 20°

Tabelle 5-4 gibt die Versuchsbedingungen für den zweiten Anprallversuch wieder.

Tabelle 5-4: Versuchsbedingungen Anprallversuch 2

Schutzsystem:	Stahlschutzplanke ESP (normale Einbauhöhe)
Fahrzeug:	SUV, 2.100 kg Masse mit Gurtstraffer Airbag auf der Fahrerseite aktiv: Frontairbag Airbag auf der Beifahrerseite inaktiv/deaktiviert[12]: Frontairbag
Insasse (Fahrer):	Hybrid III “50th percentile male”-Dummy
Prüfanforderung	In Anlehnung an TB32
Konstellation:	v_k = 110 km/h; α = 20°

Tabelle 5-5 zeigt die Zusammenfassung der Versuchsergebnisse des Anprallversuchs.

Tabelle 5-5: Versuchsergebnisse Anprallversuch 2

Tatsächliche Anprallparameter:	v_k = 112,5 km/h (+2,3 %); α = 20° (±0 %)
Abprallgeschwindigkeit	64,0 km/h
Index der Schwere der Beschleunigung (ASI)	0,54
Anprallheftigkeitsstufe	A
Theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfes (THIV)	19,4 km/h (Flugzeit: 178 ms)
Dynamische Durchbiegung	1,53 m
Wirkungsbereich	1,57 m
Klasse des Wirkungsbereiches	W5
Kontaktstrecke	20,15 m
ausgelöste Rückhaltesysteme im Prüffahrzeug	keine

Die Ergebnisse des Anprallversuchs 2 sind berechnete Werte aus den Beschleunigungen des Fahrzeugs (ASI, THIV) und Belastungswerte für die Körperregionen Kopf, Brust und Becken des Dummys. Aus diesen Verläufen werden die relevanten Maximalwerte der Beschleunigung (3-ms-Werte) bestimmt. Die folgenden Diagramme zeigen die Fahrzeugbeschleunigung im Mitteltunnel und die Belastungsverläufe für die drei Körperregionen.

[12] Zur besseren Dokumentation des Anprallversuches durch On-Board Kameras wurde der beifahrerseitige Airbag deaktiviert.

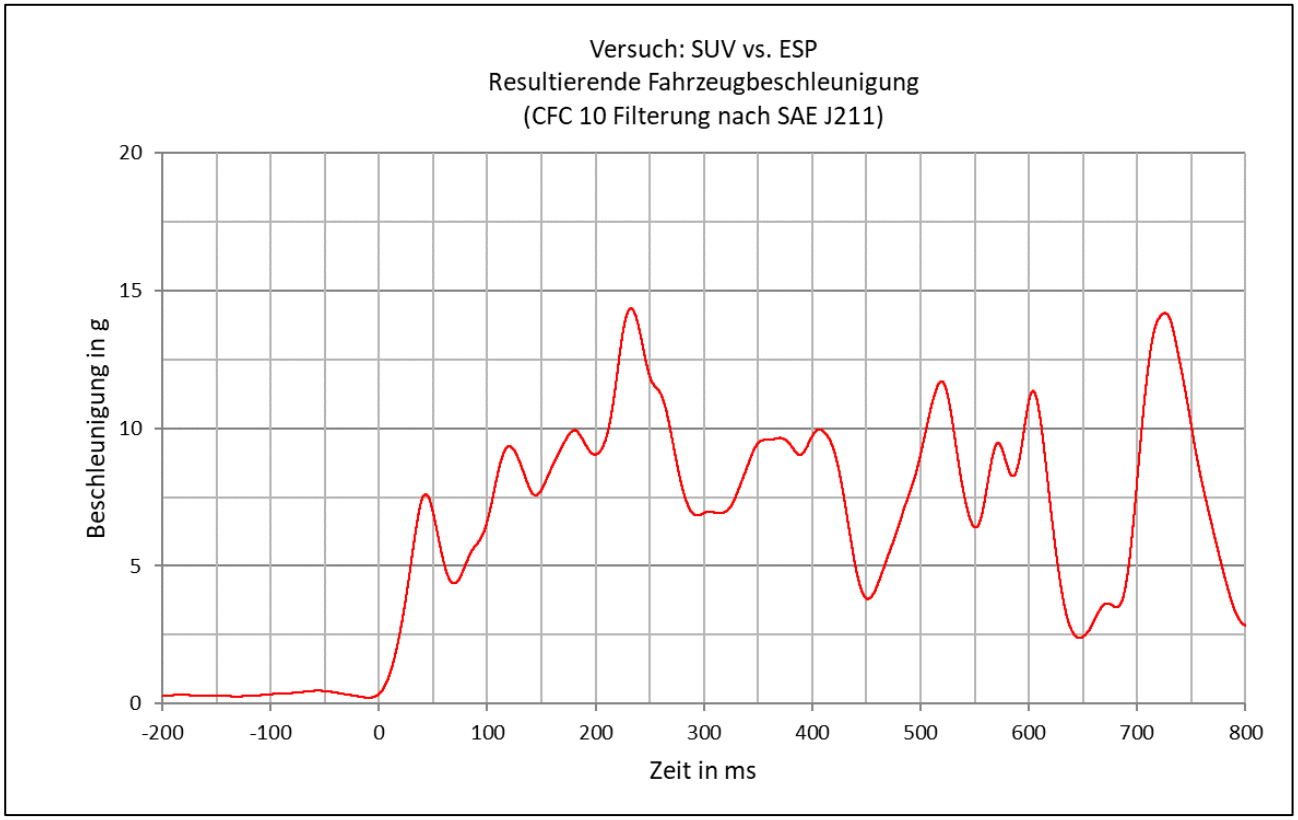


Abbildung 5-11: Anprallversuch 2 – Fahrzeugbeschleunigung, Messstelle Mitteltunnel

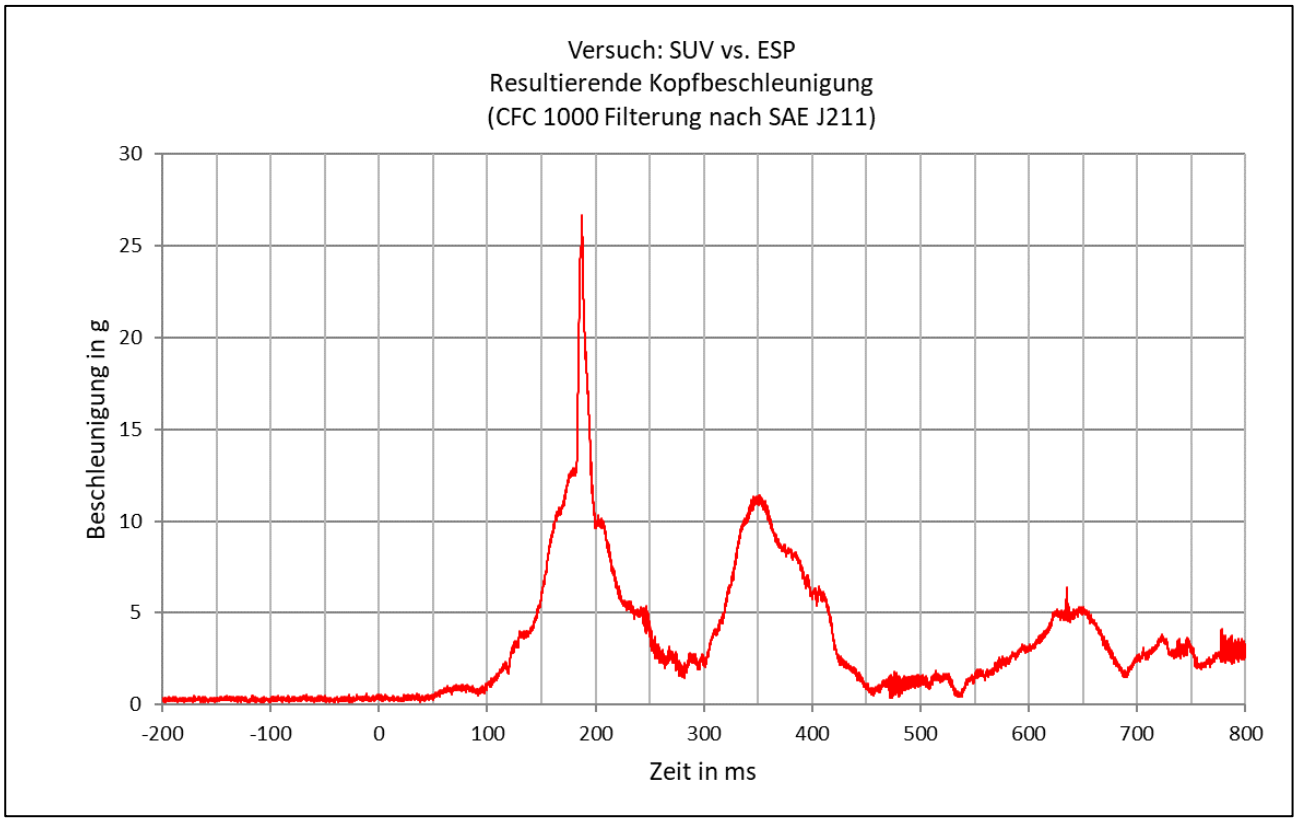


Abbildung 5-12: Anprallversuch 2 – Kopfbeschleunigung

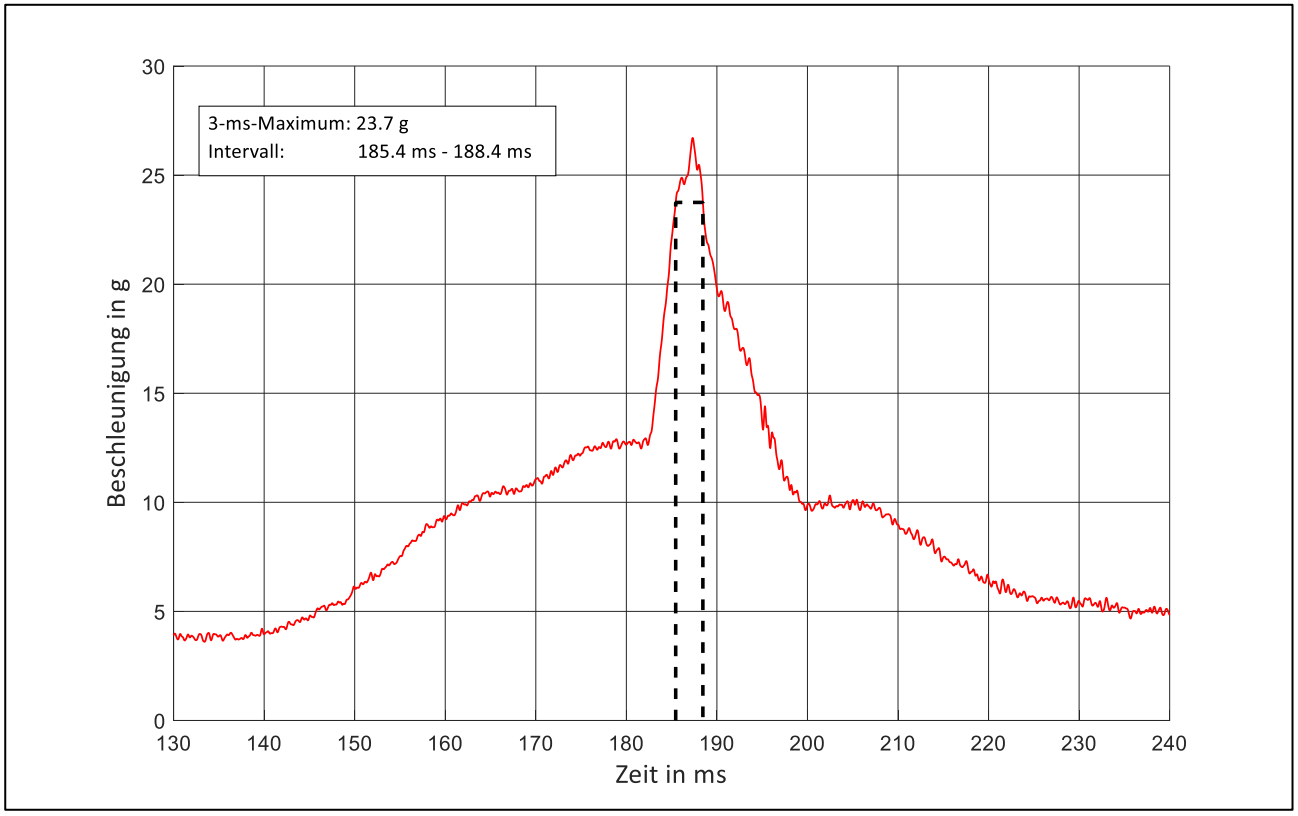


Abbildung 5-13: Anprallversuch 2 – Kopfbeschleunigung – 3-ms-Maximum

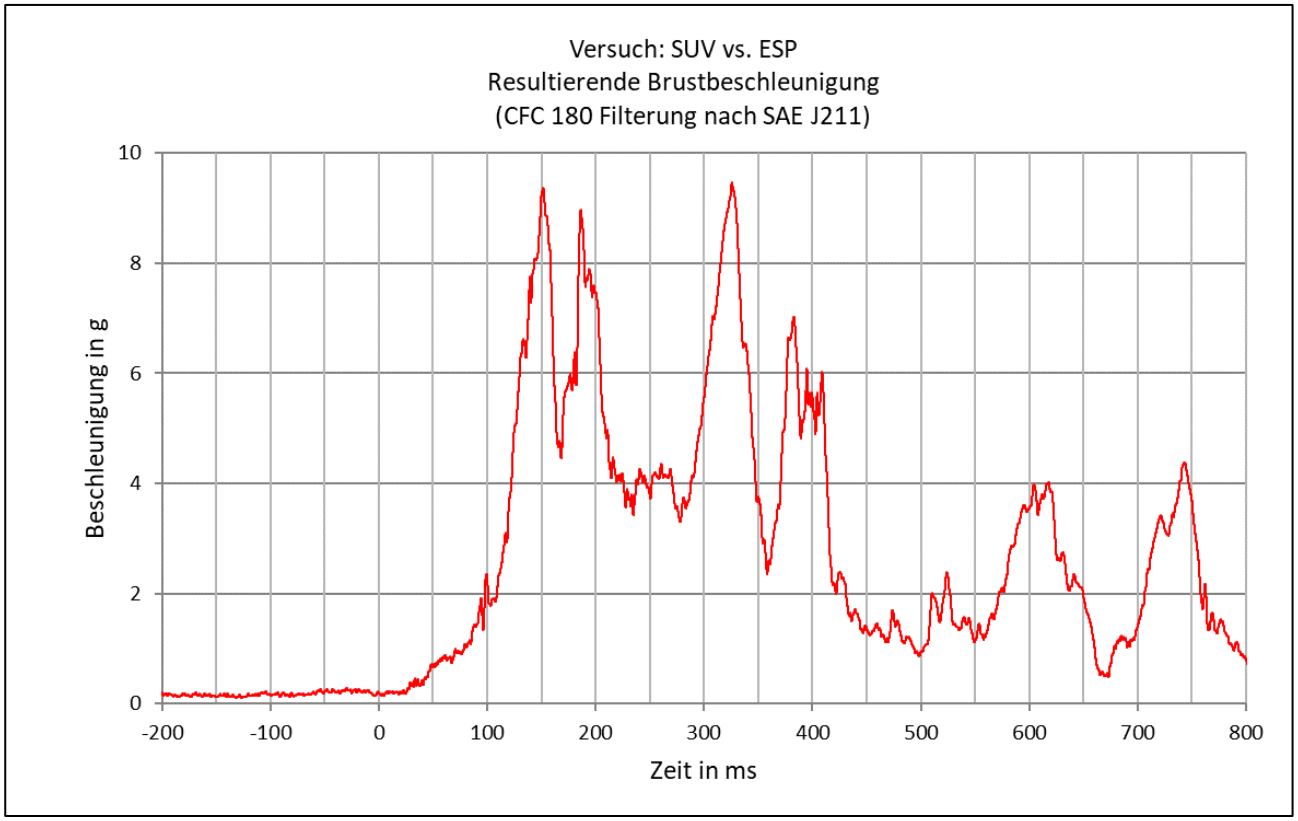


Abbildung 5-14: Anprallversuch 2 – Brustbeschleunigung

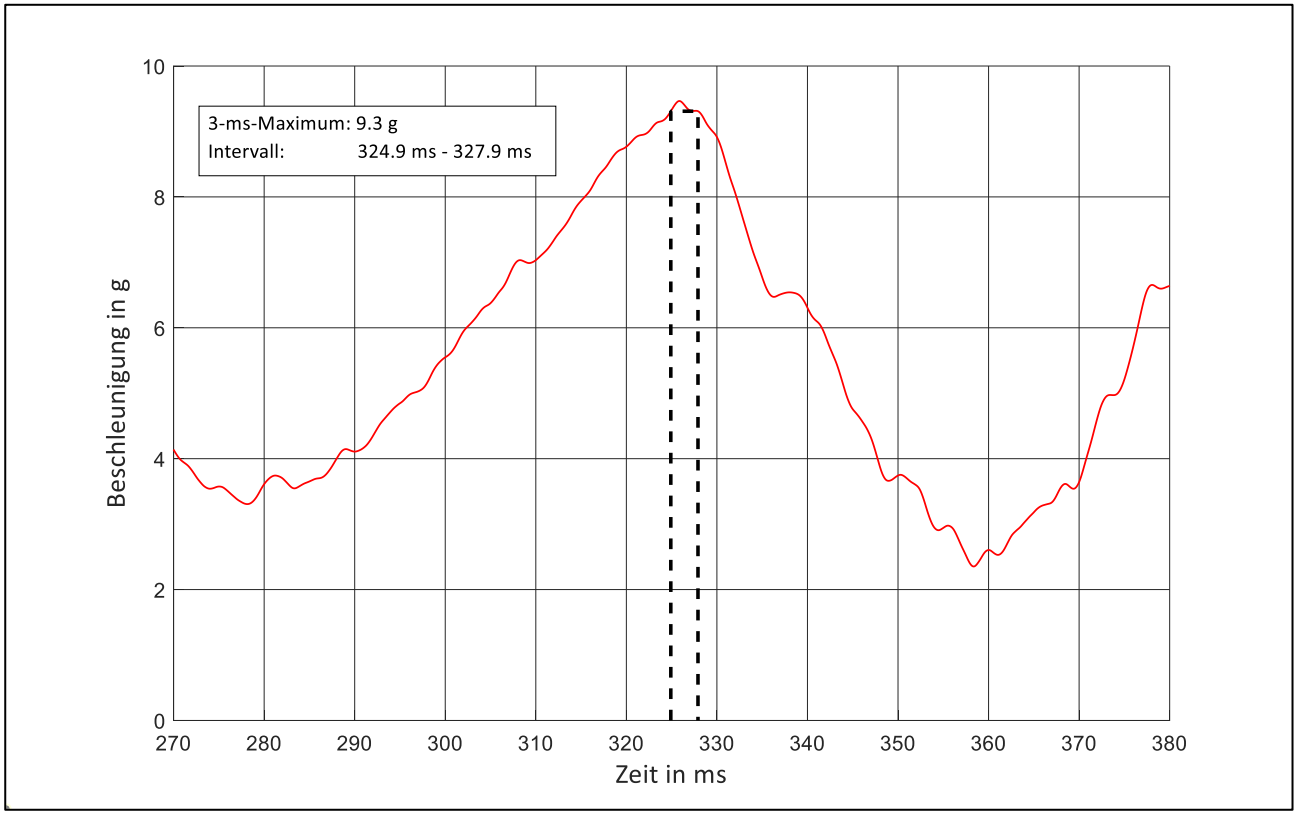


Abbildung 5-15: Anprallversuch 2 – Brustbeschleunigung – 3-ms-Maximum

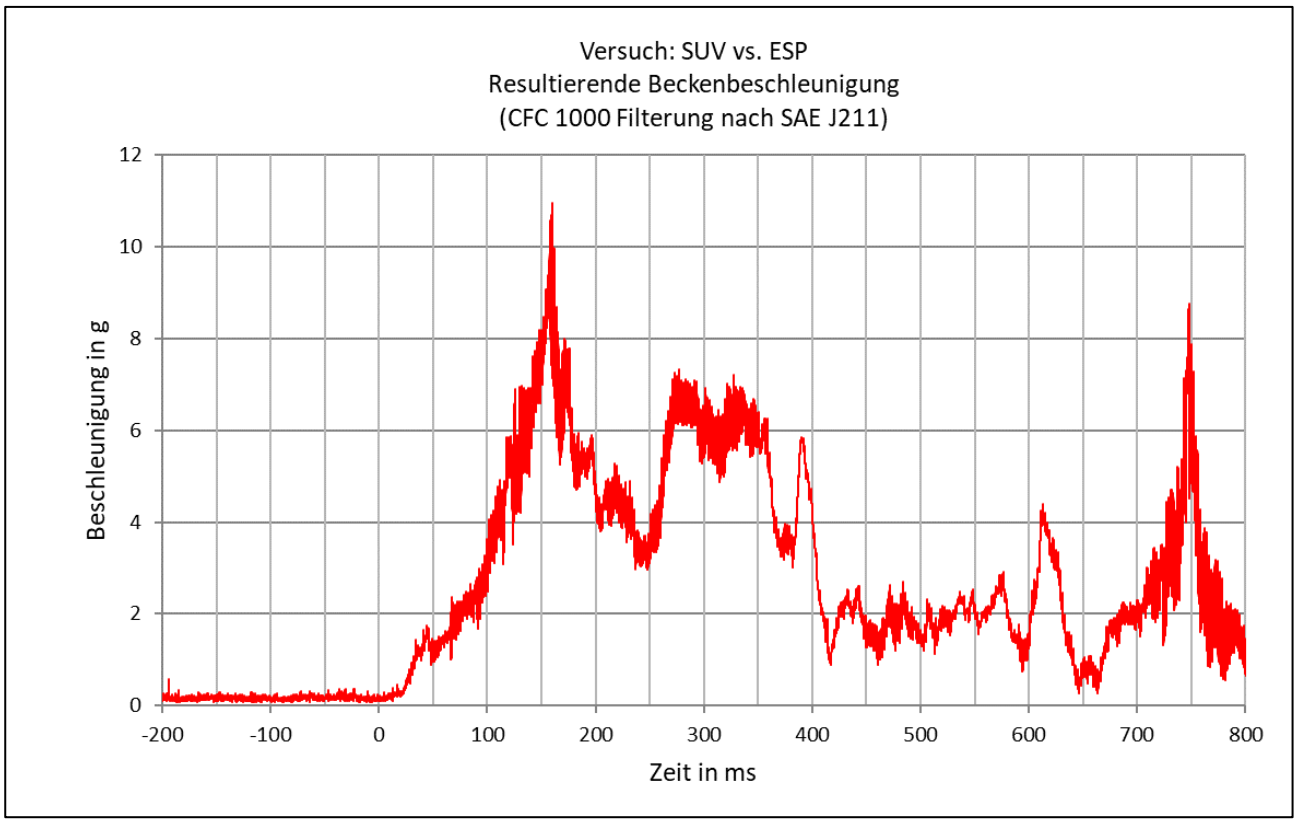


Abbildung 5-16: Anprallversuch 2 – Beckenbeschleunigung

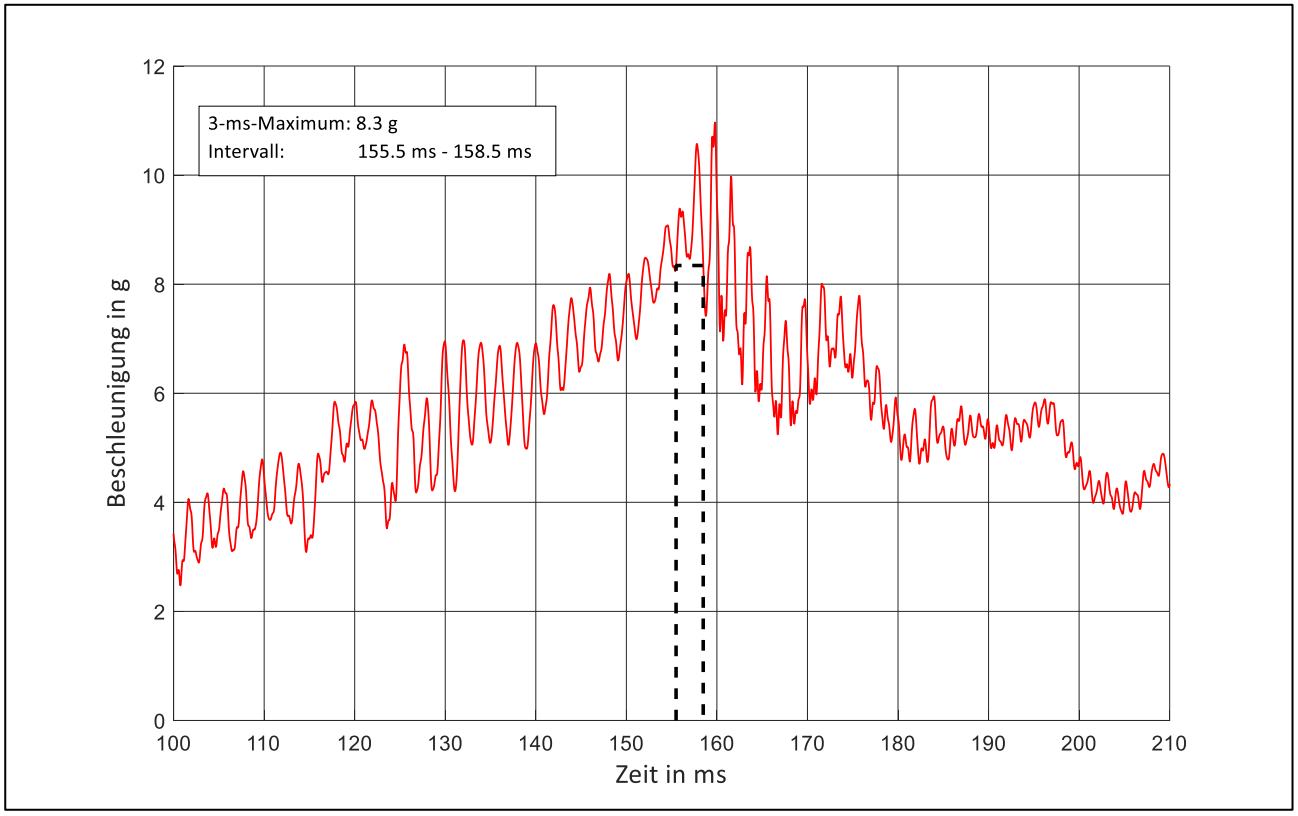


Abbildung 5-17: Anprallversuch 2 – Beckenbeschleunigung – 3-ms-Maximum

Abbildung 5-18 zeigt Bilder der Videoaufzeichnung des Anprallversuchs 2 im Abstand von jeweils 35 Frames (Aufnahme mit 200 Hz = 200 fps, Zeitspanne zwischen zwei Abbildungen: 0,175 s).

Die Schutzeinrichtung hat das Prüffahrzeug erfolgreich aufgehalten, das Fahrzeug ist innerhalb des vorgegebenen Abprallbereichs (siehe 2.4) geblieben und der Anprallversuch hat auch darüber hinaus keine Auffälligkeiten im Sinne der Abnahmekriterien gezeigt. Die bei der Anprallprüfung gemessenen Werte zeigen eine Anprallheftigkeit der Klasse A, einen maximalen Wirkungsbereich der Klasse W5 und eine dynamische Durchbiegung von 1,5 m. Die Dummy-Messwerte unterschreiten die kritischen Werte der Insassenbelastung deutlich. Der Fahrerairbag wurde nicht ausgelöst, obwohl es zum Abreißen des linken Vorderrades am achten oder neunten Pfosten kam. Eventuell blieb die Airbag-Auslösung wegen eines technischen Defekts an der Spannungsversorgung des Rückhaltesystems aus.

Abbildung 5-19 zeigt Bilder der OnBoard-Videoaufzeichnung des Anprallversuchs 2 im Abstand von jeweils 175 Frames (Aufnahme mit 1.000 Hz = 1.000 fps, Zeitspanne zwischen zwei Abbildungen: 0,175 s).

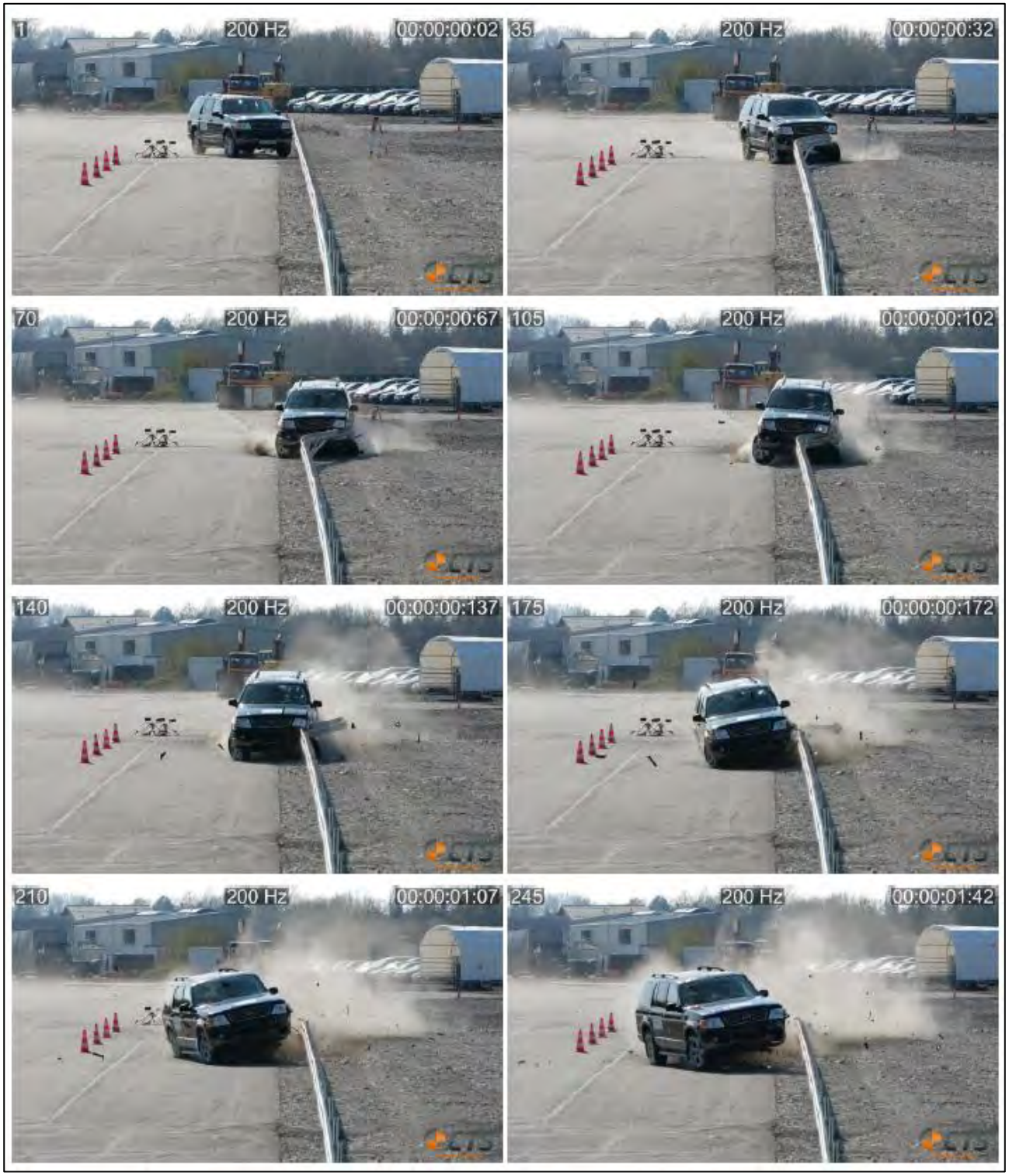


Abbildung 5-18: Anprallversuch 2 – Bildsequenz (0 ms bis 1225 ms)

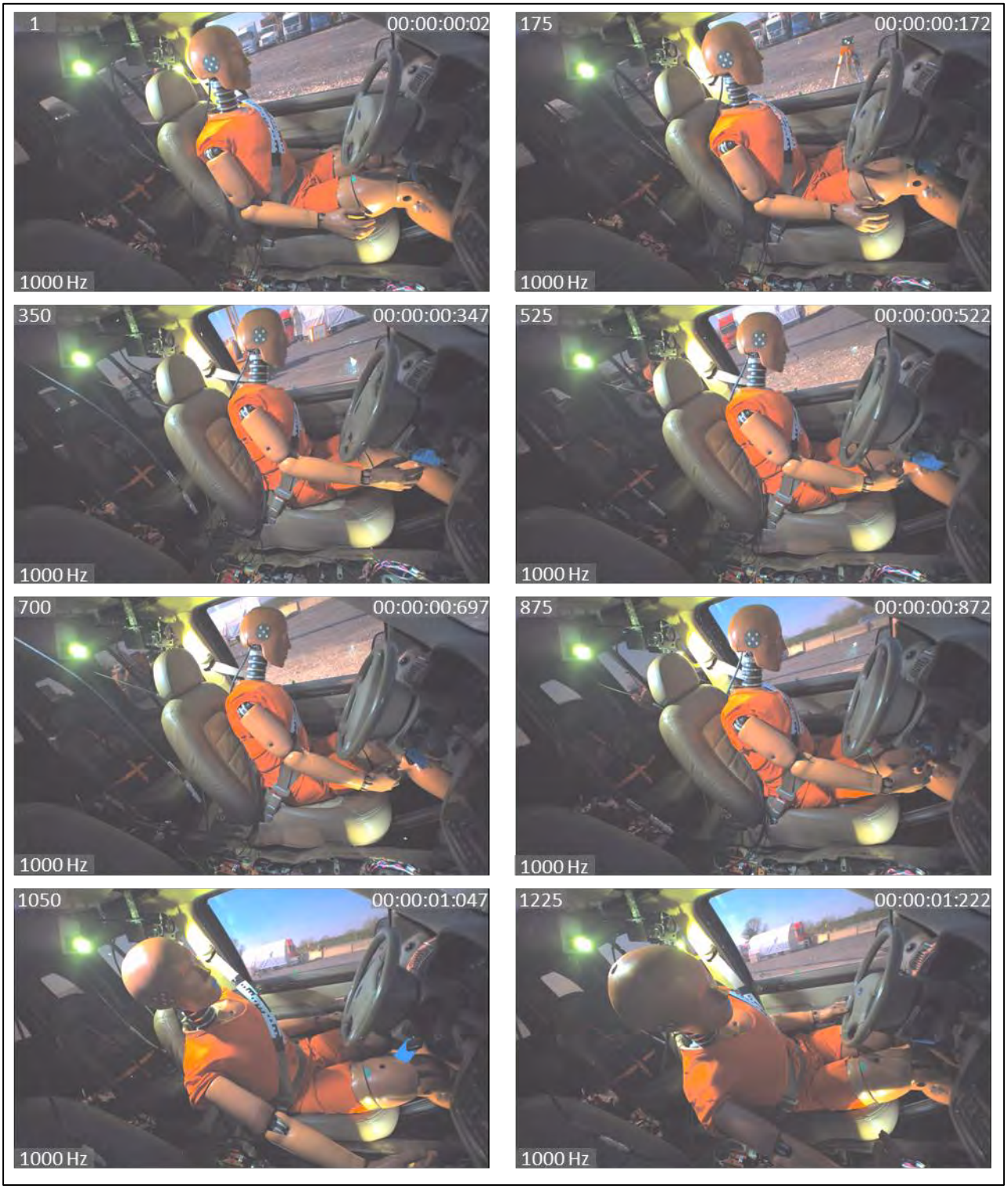


Abbildung 5-19: Anprallversuch 2 – Bildsequenz – OnBoard (0 ms bis 1225 ms)

5.3. Anprallversuch 3: Kleinwagen vs. Schutzwand, 110 km/h, 20°

Tabelle 5 6 zeigt die Versuchsbedingungen für den Realversuch. Bei der getesteten PSE handelt es sich um eine vollfundamentierte Ortbetonschutzwand mit New Jersey-Profil und einer Systemhöhe von 81 cm, welche auf einer Länge von 60 m (11 Elemente je 5 m mit Anfangs- und Endkonstruktion von je 2,5 m) auf dem Prüfgelände gefertigt ist. Vereinfachend wird das getestete Schutzwandsystem als „New Jersey 81“ bezeichnet.

Tabelle 5-6: Versuchsbedingungen Anprallversuch 3

Schutzwandsystem:	vollfundamentierte Ortbetonschutzwand mit New Jersey-Profil Systemhöhe H=81 cm Systemlänge L=60 m
Fahrzeug:	Kleinwagen, 1.100 kg Masse mit Gurtstraffer, Gurtkraftbegrenzer Airbags auf der Fahrerseite aktiv: Frontairbag, Knieairbag, Thorax-Seitenairbag und Kopf-Seitenairbag Airbags auf der Beifahrerseite inaktiv/deaktiviert[13]: Frontairbag, Thorax-Seitenairbag und Kopf-Seitenairbag
Insasse (Fahrer):	Hybrid III “50th percentile male”-Dummy
Prüfanforderung:	In Anlehnung an TB32 v_k = 110 km/h; α = 20 °

Das Prüffahrzeug prallt mit einer Geschwindigkeit von 114,3 km/h unter einem Winkel von 20 ° an das System. Der Erstkontakt erfolgt in Anprallrichtung 0,13 m nach dem Übergang von Element 3 zu Element 4 der Schutzeinrichtung in Anfahrrichtung. Lediglich auf Element 4 gibt es Spuren durch den Anprall des Prüffahrzeuges. Der Anprallbereich erstreckt sich über eine Kontaktstrecke von 3,75 m. Während des Anpralls lösen sich keine Bauteile von der PSE und es findet keine Durchbiegung der Schutzeinrichtung statt. (Abbildung 5-20).

Aufgrund des Schutzwandanpralls werden Fahrer-, Knieairbag und Gurtstraffer ausgelöst. Der Thorax-Seitenairbag und Kopf-Seitenairbag werden nicht ausgelöst. In der Videoaufzeichnung des Innenraums zeigt sich, dass die Vorverlagerung des Dummy-Oberkörpers zum Zeitpunkt des Anpralles früher einsetzt als der Gurtstraffer zündet. In der Folge hat der gezündete Gurtstraffer nicht die erforderliche Kraft, um den vorverlagerten Dummy-Oberkörper enger an den Fahrersitz zu binden. Das Gurtsystem (einschließlich Gurtstraffer) am Fahrersitz ist überprüft worden; ein Funktionsfehler wird ausgeschlossen.

[13] Zur besseren Dokumentation des Anprallversuches durch On-Board Kameras wurden die beifahrerseitigen Airbags deaktiviert.



Abbildung 5-20: Prüffahrzeug und Kontaktspuren am Anprallort

Tabelle 5-7 zeigt die Zusammenfassung der Versuchsergebnisse des Realversuchs.

Tabelle 5-7: Versuchsergebnisse Anprallversuch 3

Tatsächliche Anprallparameter:	v_k = 114,3 km/h (+3,9 %); α = 20 ° (±0 %)
Abprallgeschwindigkeit[14]	92,7 km/h
Index der Schwere der Beschleunigung (ASI)	2,34
Anprallheftigkeitsstufe	>C
Theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfes (THIV)	32,97 km/h (Flugzeit: 80 ms)
Dynamische Durchbiegung	0,0 m
Wirkungsbereich	0,0 m
Klasse des Wirkungsbereiches	W2
Kontaktstrecke[15]	3,75 m
ausgelöste Rückhaltesysteme im Prüffahrzeug	Gurtstraffer Fahrer, Fahrerairbag und Knieairbag

Die Ergebnisse des Anprallversuchs 3 sind berechnete Werte aus den Beschleunigungen des Fahrzeugs (ASI, THIV) und Belastungswerte für die Körperregionen Kopf, Brust und Becken des Dummys. Aus diesen Verläufen werden die relevanten Maximalwerte der Beschleunigung (3-ms-Werte) bestimmt. Die folgenden Diagramme zeigen die Belastungsverläufe für die drei Körperregionen, die Fahrzeugbeschleunigung im Mitteltunnel.

[14] Die Abprallgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, die das Fahrzeug noch besitzt, wenn es das Schutzsystem zum ersten Mal verlassen hat.
[15] Die Kontaktstrecke ist die Strecke, auf der das Fahrzeug Kontakt mit dem Schutzsystem hat, vom ersten Punkt des Anpralls, bis zum letzten Kontakt beim ersten Verlassen des Systems. Ein erneutes Hineinfahren in das System wird hierbei nicht berücksichtigt.

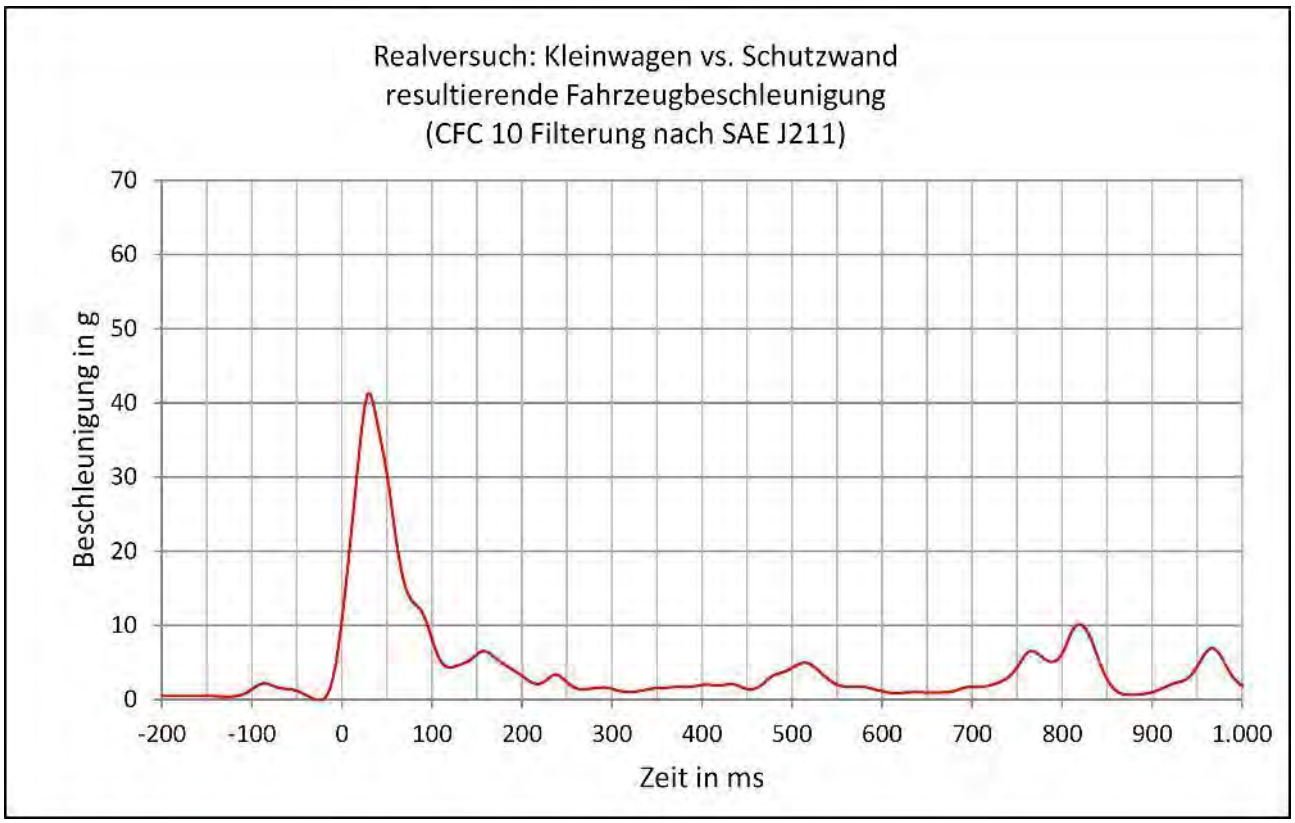


Abbildung 5-21: Anprallversuch 3 – Fahrzeugbeschleunigung, Messstelle Mitteltunnel

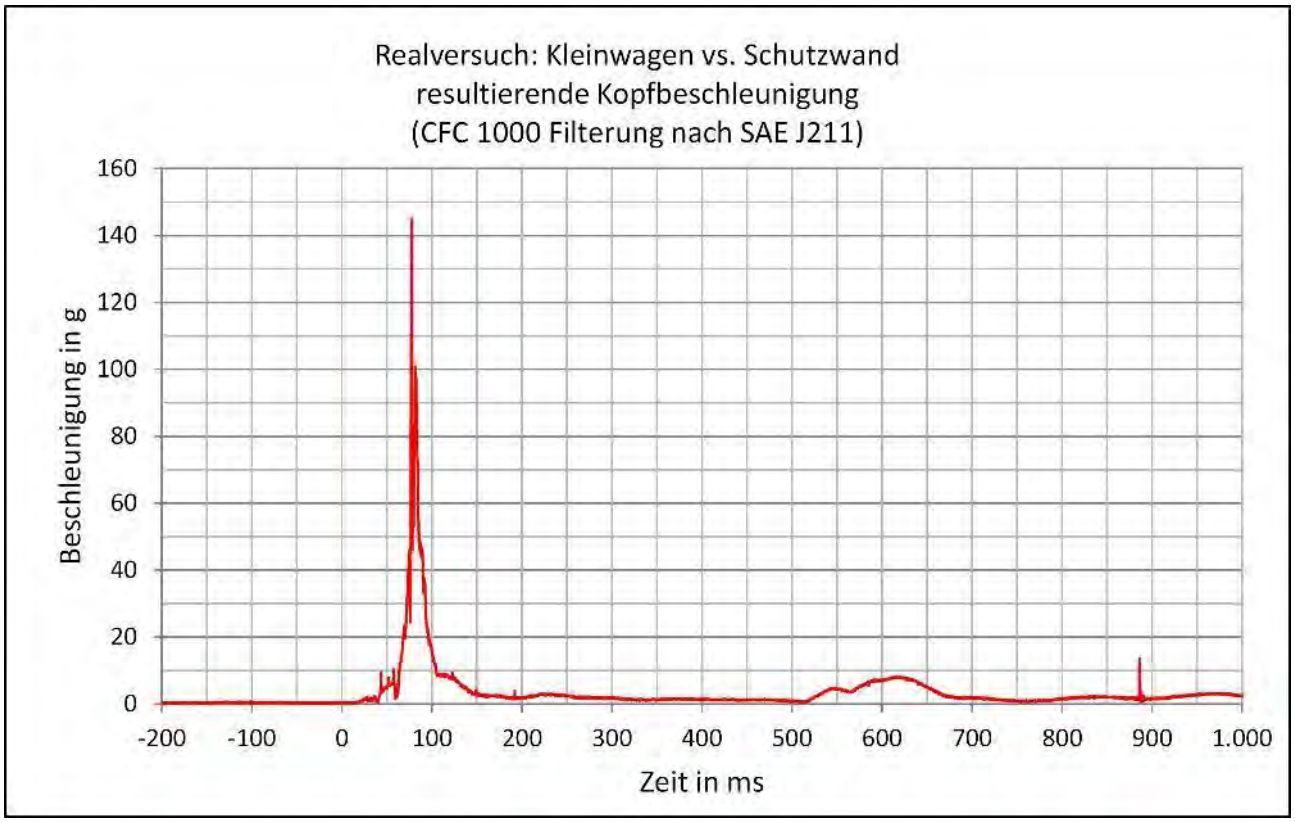


Abbildung 5-22: Anprallversuch 3 – Kopfbeschleunigung

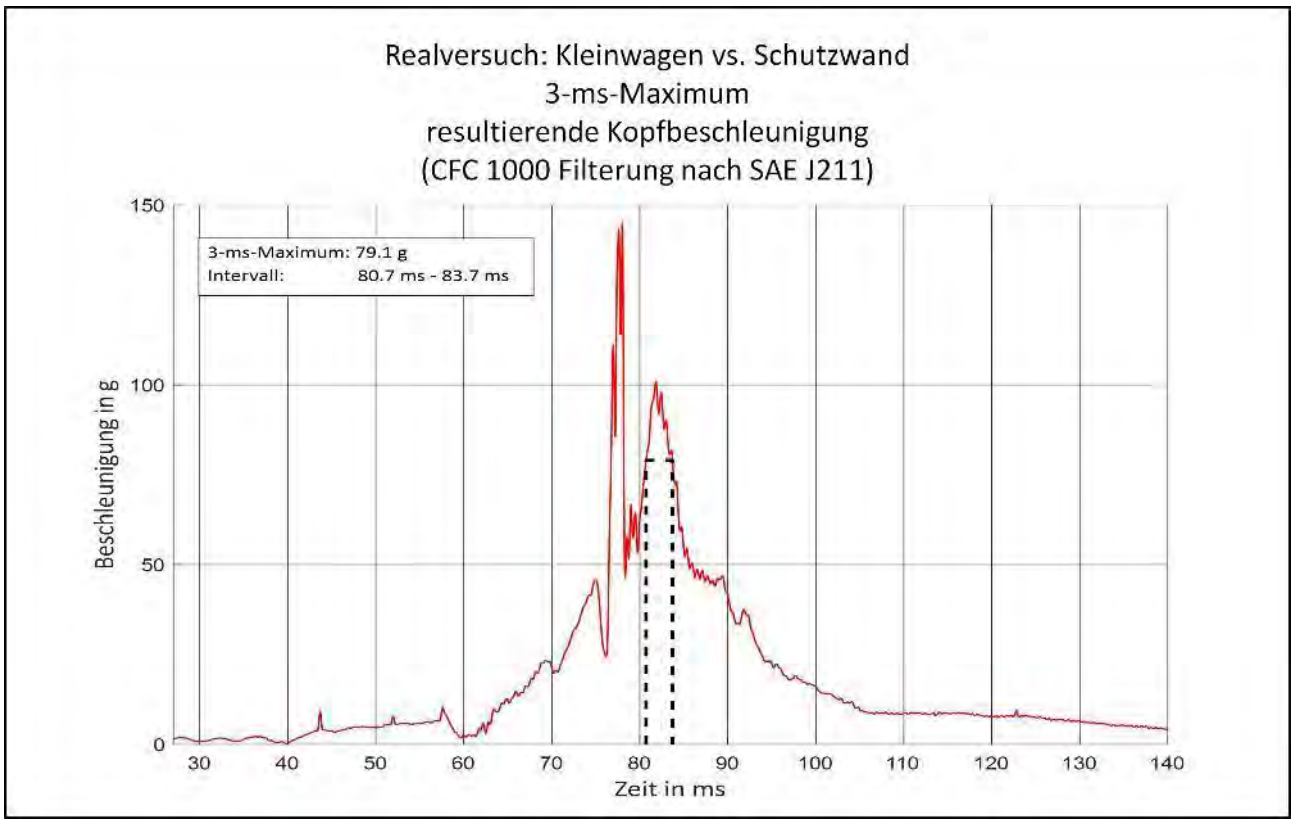


Abbildung 5-23: Anprallversuch 3 – Kopfbeschleunigung – 3-ms-Maximum

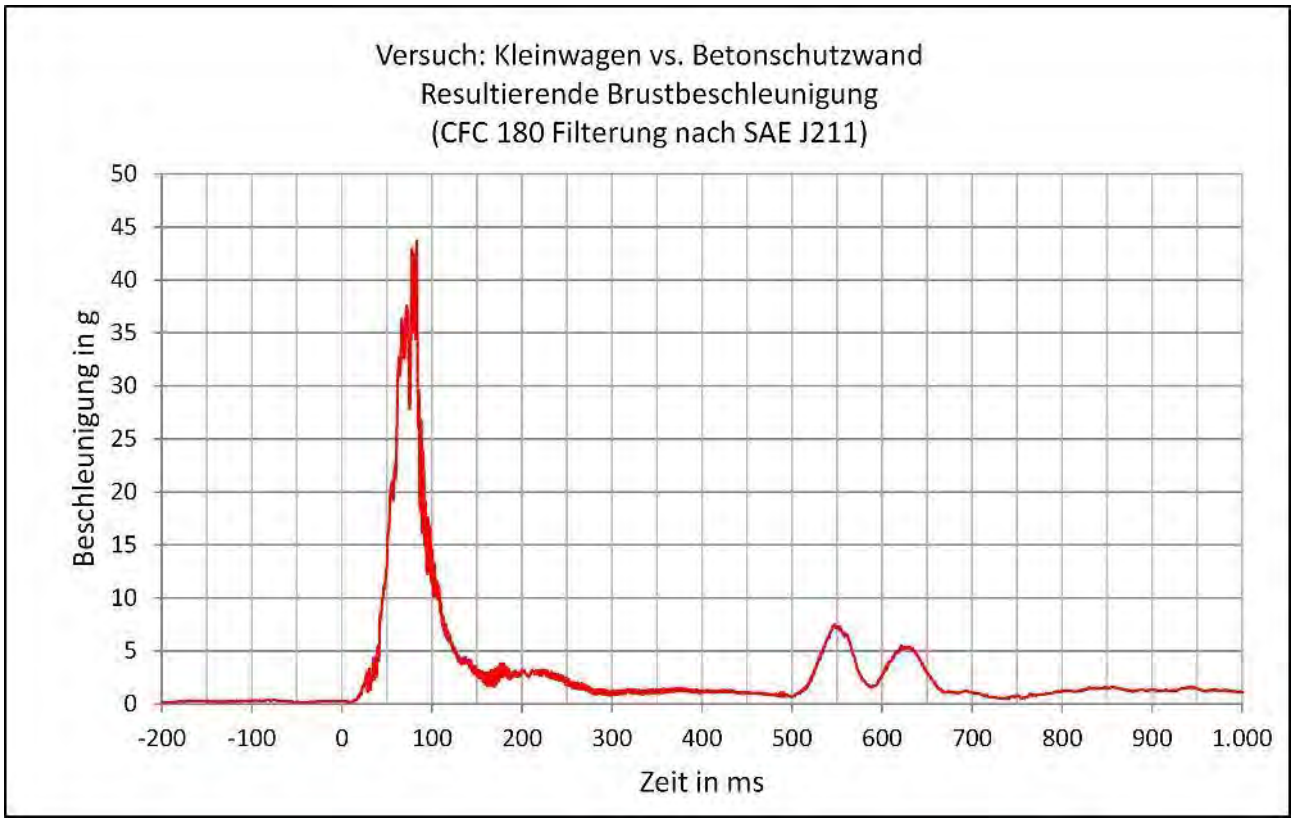


Abbildung 5-24: Anprallversuch 3 – Brustbeschleunigung

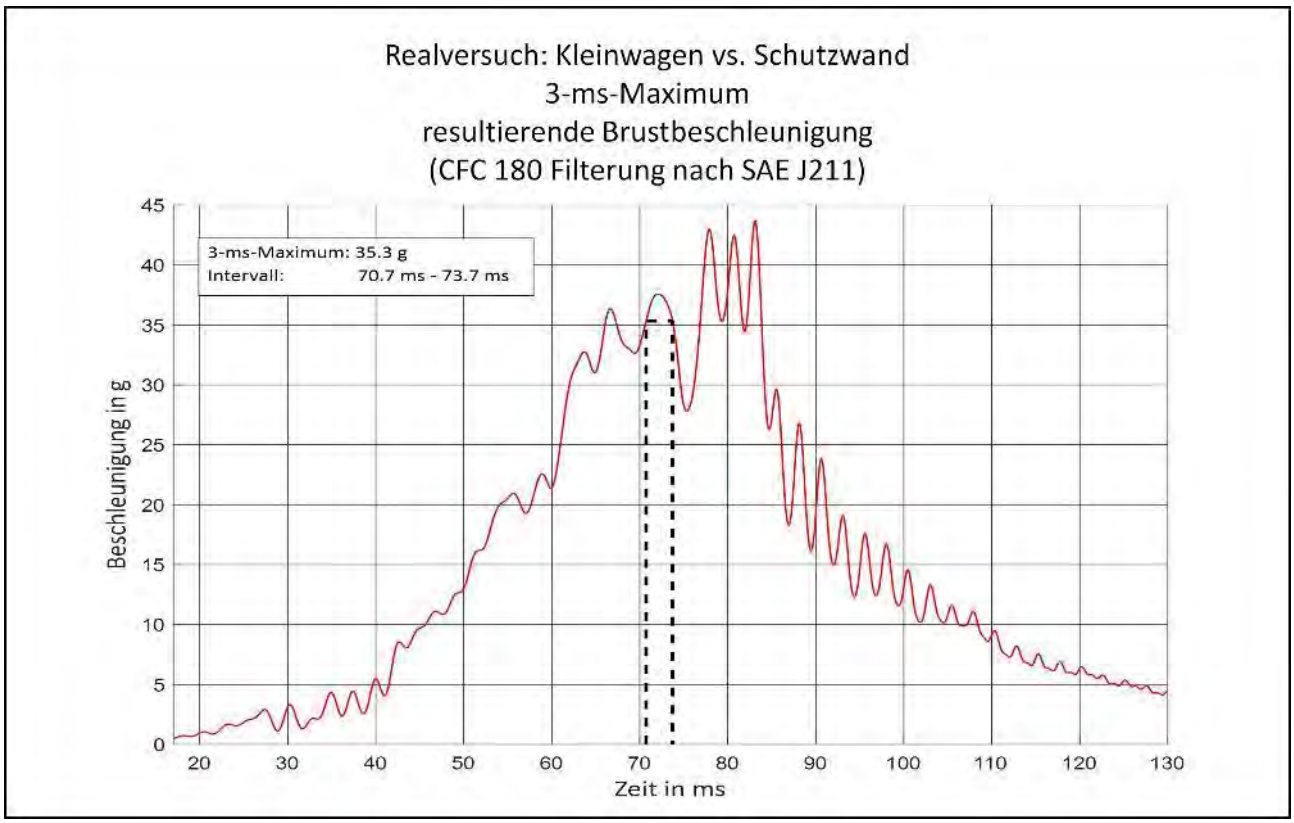


Abbildung 5-25: Anprallversuch 3 – Brustbeschleunigung – 3-ms-Maximum

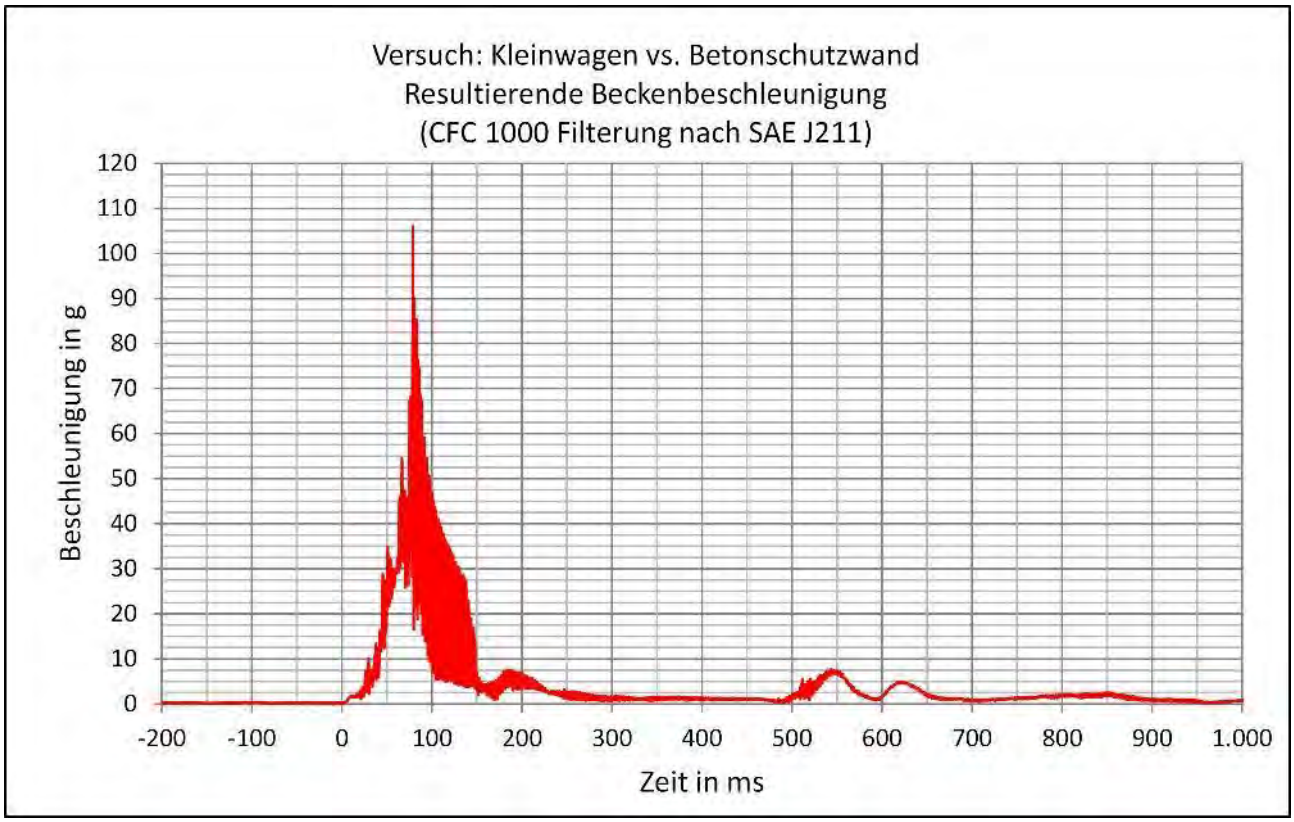


Abbildung 5-26: Anprallversuch 3 – Beckenbeschleunigung

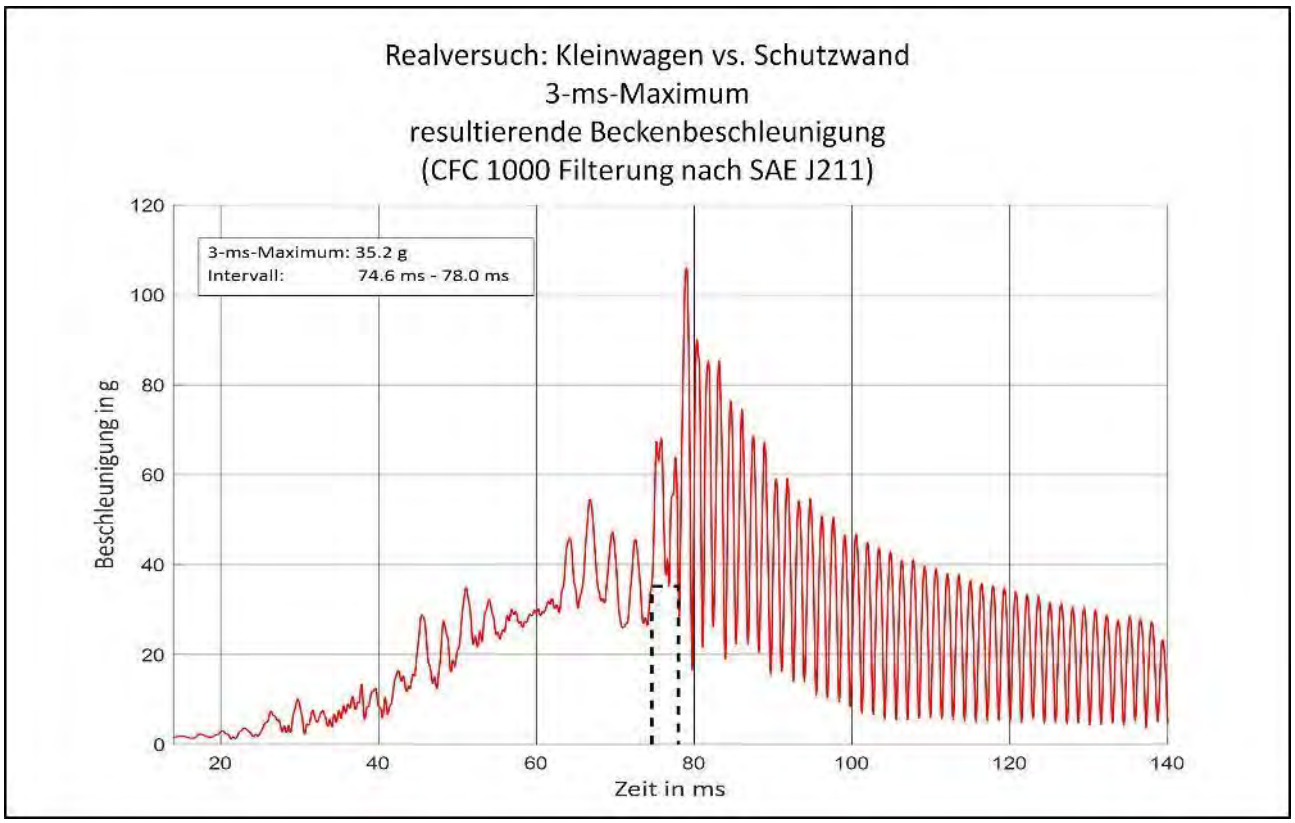
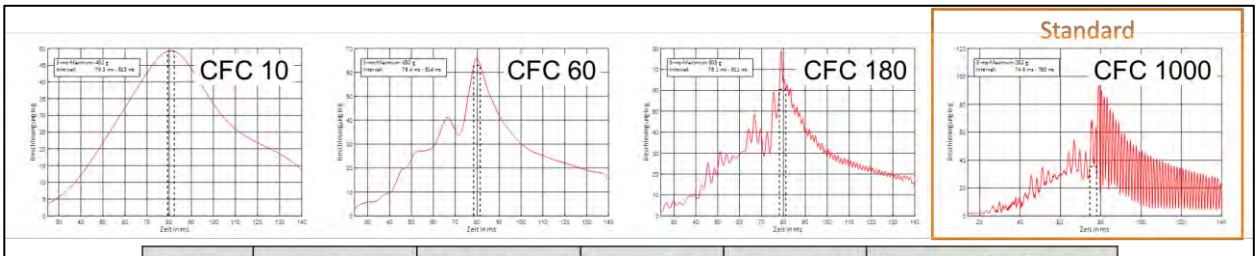


Abbildung 5-27: Anprallversuch 3 – Beckenbeschleunigung – 3-ms-Maximum

Die im Realversuch ermittelten ASI- und THIV-Werte sowie die Nicht-Verformung der Schutzwand resultieren in einer Anprallheftigkeit der Klasse >C, einem maximalen Wirkungsbereich der Klasse W2 und einer normalisierter dynamischen Durchbiegung von 0,0 m.

Die 3-ms-Kopfbeschleunigung zeigt mit 79,1 g einen erhöhten Wert knapp unterhalb des biomechanischen Grenzwertes von 80 g, der aus dem seitlichen Kopfanprall gegen die Seitenscheibe der Fahrertür resultiert, wobei diese zerspringt. Die 3-ms-Werte für Becken- (35,3 g) und Brustbeschleunigung (35,2 g) liegen deutlich unterhalb der Grenzwerte.

In Folge des Messwertrauschens des Beckenbeschleunigungssensors und unter der Verwendung der geforderten Filterklasse (CFC 1000) aus den Standards der Instrumentierung für die Aufprallprüfung [43] ergibt sich eine hohe Diskrepanz für die Beschleunigungsmessung am Becken zwischen Maximalwert (106 g) und 3-ms-Maximalwert (35,3 g).



Filterklasse CFC	Maximum [g]	3-ms-Maximum [g]	Intervall Start [ms]	Intervall Ende [ms]	Biomechanischer Grenzwert Becken ≤ 60 g
10	49,33	49,2	79,3	82,3	↘
60	65,76	63	78,4	81,4	↗
180	78,74	60	78,3	81,2	→
1000	105,97	35,2	74,6	78	↘

Abbildung 5-28: Anprallversuch 3 – Beckenbeschleunigung – 3-ms-Maximum

Um die Auswirkungen verschiedener Filterklassen abschätzen zu können, wurde eine Sensitivitätsanalyse der resultierenden Beckenbeschleunigung im Bereich um die 3-ms-Maximal-Werte durchgeführt. Bei Anwendung der Filterklassen CFC 60 und CFC 180 erreicht die 3-ms-Belastung am Becken das Niveau des biomechanischen Grenzwerts oder übersteigt diesen sogar leicht. Für CFC 10 ist der resultierende Beschleunigungsverlauf so weit geglättet, dass das 3-ms-Maximum den Grenzwert nicht überschreitet, jedoch höher ausfällt als bei der Filterklasse CFC 1000. Für die weitere Betrachtung wird der Standard der Instrumentierung für die Aufprallprüfung [43] verwendet, um die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des Schutzplankenanpralls zu gewährleisten.

Abbildung 5-29 zeigt Bilder der Videoaufzeichnung des Anprallversuchs 3 im Abstand von jeweils 35 Frames (Aufnahme mit 200 Hz = 200 fps, Zeitspanne zwischen zwei Abbildungen: 0,175 s).

Anhand der Bildsequenz können zwei Crashphasen identifiziert werden. Die Phase 1 ist geprägt durch den Schutzwandanprall, in der Energie durch Fahrzeugdeformation und durch das Ableiten des Prüffahrzeuges nach oben abgebaut wird. Infolge des Aufsteigens an der Schutzeinrichtung hebt zunächst der Vorderwagen und anschließend der Hinterwagen ab, was den Beginn der zweiten Phase (Flugphase) markiert. In dieser Phase sind alle vier Räder in der Luft. In der Phase 3 geht das Fahrzeug von der Flugphase über in die Auslaufphase.

Mit dem Verlassen des Systems tritt eine Rotation des Fahrzeuges um die Hochachse ein. Aufgrund der Fahrzeugdeformationen im linken Fahrzeugbereich (bspw. blockiertes linkes Vorderrad) dreht sich das Prüffahrzeug entgegen dem Uhrzeigersinn ein. Im Auslauf kommt es zu keinem weiteren Anprall mit der Schutzwand. Nachdem die im Anschluss an den Schutzwandanprall von außen initiierte Fahrzeugabbremsung nicht zur vollen Wirkung kam, wird das Fahrzeug am Ende des Prüfgeländes durch Absperrungen zum Stillstand gebracht.

Abbildung 5-30 zeigt Bilder der OnBoard-Videoaufzeichnung des Anprallversuchs 3 im Abstand von jeweils 21 Frames (Aufnahme mit 180 Hz = 180 fps, Zeitspanne zwischen zwei Abbildungen: 0,175 s).

In der Anprallphase werden der Fahrer- und Knieairbag gezündet und es kommt zum Anprall des Dummy-Kopfes mit der Seitenscheiben, wodurch diese zerbricht. Sichtbar ist auch, dass der Dummy-Kopf den Fahrerairbag verfehlt. In der Flugphase verlagert sich der Dummy nach oben und zurück in die Ausgangslage. Anschließend kommt es zum Aufprall des Fahrzeuges auf der Fahrbahn, wodurch der Dummy in den Sitz gepresst und gestaucht wird. Die resultierende Fahrzeugrotation im Auslauf spiegelt sich auch in der Dummy-Bewegung wider und der Dummy-Oberkörper bewegt sich in Richtung Mittelkonsole.

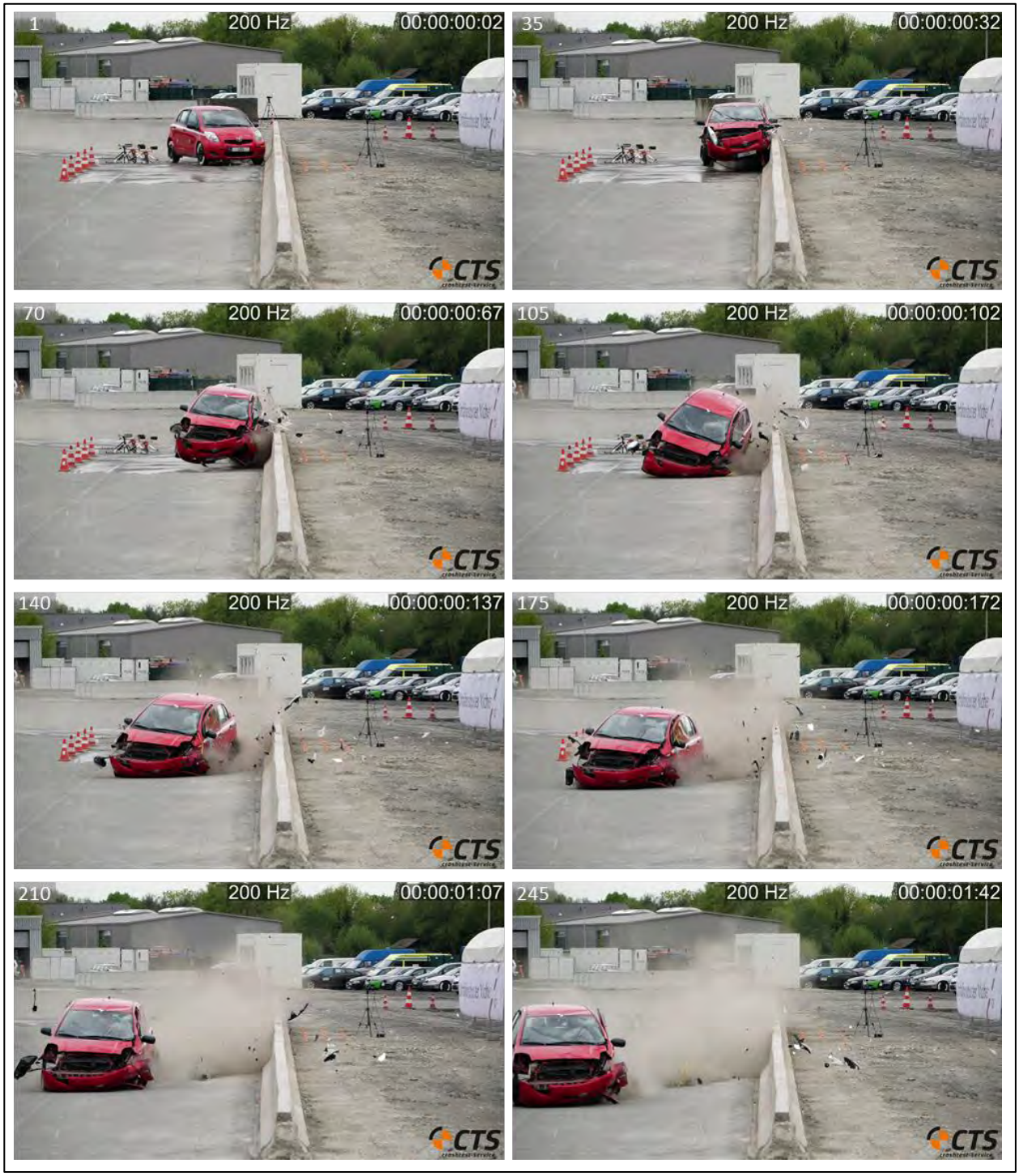


Abbildung 5-29: Anprallversuch 3 – Bildsequenz (0 ms bis 1225 ms)

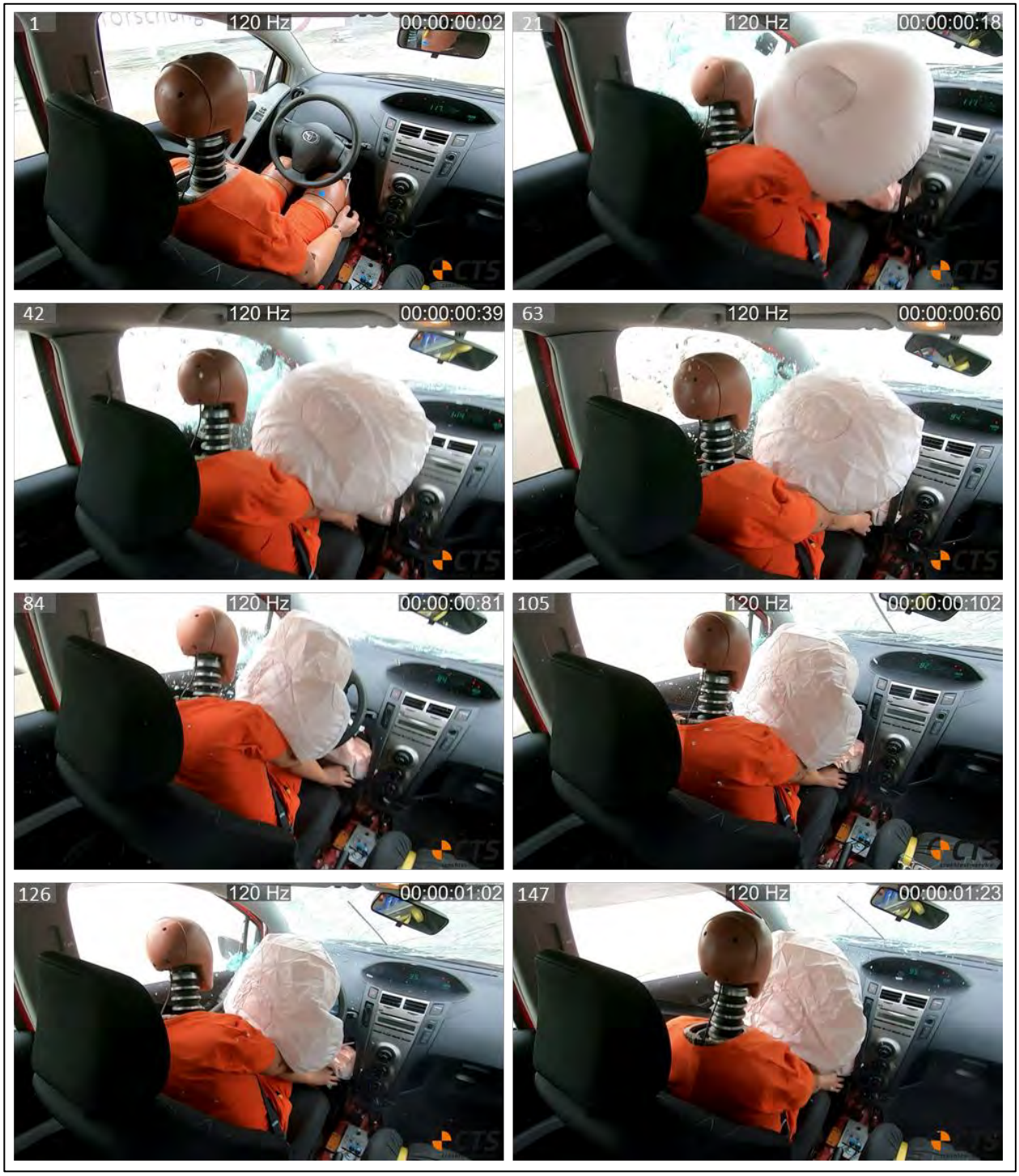


Abbildung 5-30: Anprallversuch 3 – Bildsequenz – OnBoard (0 ms bis 1225 ms)

6. Numerische Simulation von Anprallen an Schutzeinrichtungen

In vielen Bereichen der Natur- und Ingenieurwissenschaften werden numerische Simulationsmethoden zur Entwicklung von Bauteilen und Überprüfung von strukturmechanischen Zusammenhängen eingesetzt. Dies eröffnet die Möglichkeit, die Anzahl aufwändiger Realtests zu reduzieren und insbesondere den Einfluss der Variation einzelner oder mehrerer Parameter unter Beibehaltung der übrigen Randbedingungen zu untersuchen. Dabei kommt der Systemmodellierung und der Überprüfung der Modelle besondere Bedeutung zu, um zu prognosefähigen Modellen zu gelangen.

Auch im Bereich der Fahrzeugrückhaltesysteme werden diese Methoden vermehrt eingesetzt, um reale Anprallversuche zu ersetzen oder zu ergänzen. Wie in Abschnitt 2.1 erwähnt, gibt es dazu die Richtlinien für Computersimulationen von Anprallprüfungen an Fahrzeugrückhaltesystemen in der DIN CEN/TR 16303 [21], [22], [23], [24] beziehungsweise der DIN EN 16303 [25] als Zusammenfassung und Überarbeitung der vorherigen Teile. Darin werden zwei Modellierungskonzepte berücksichtigt:

- Finite Elemente Methode (FEM)
- Mehrkörpersystem (MKS, engl.: MBS – Multibody System)

FEM- und MKS-Simulation sind numerische Verfahren zur Lösung von Differentialgleichungen. Die FEM zerlegt dabei ein komplexes System in eine Vielzahl möglichst kleiner Elemente, um die Gesamtgleichung durch Berechnung des Equilibriums (Gleichgewichtszustand) zu lösen. Die MKS-Simulation dagegen bildet das reale System durch eine geringe Anzahl unverformbarer (in der elastischen MKS auch verformbarer) Körper ab und beschreibt deren Bewegungsfähigkeit zueinander durch idealisierte Gelenke und Zwangsbedingungen. Im vorliegenden Projekt werden die Versuche durch ein FE-Modell simuliert.

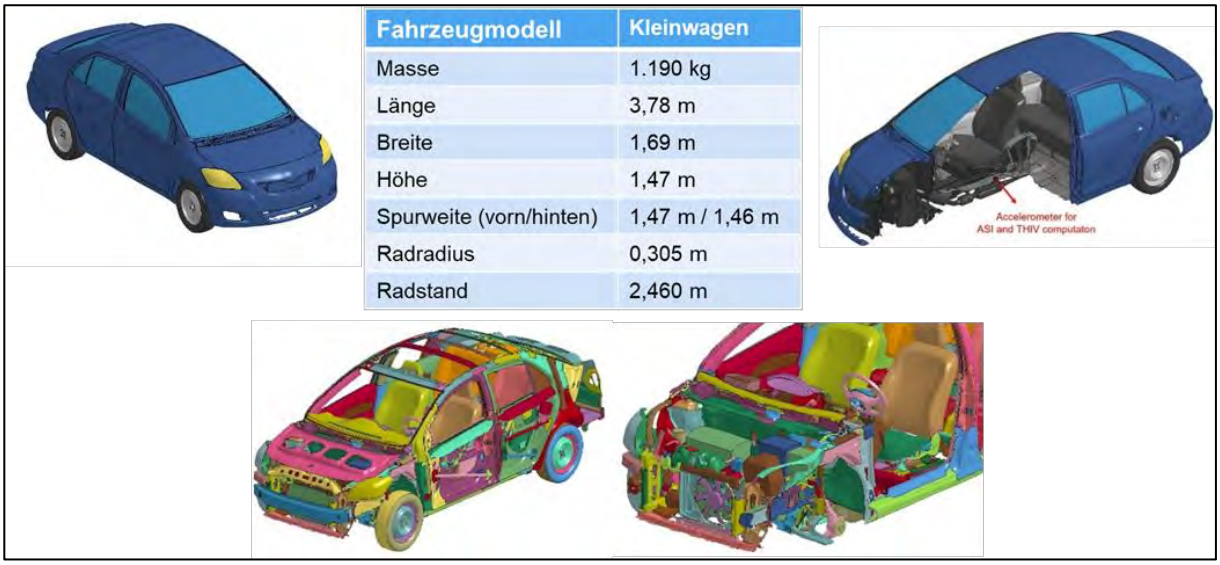
6.1. Verwendete numerische Modelle und Methoden

Die in den Simulationsläufen verwendeten numerischen Modelle werden aus bereits existierenden Komponenten zusammengesetzt. Im Rahmen der Projekte können keine völlig neuen Modelle entwickelt werden.

Die Fahrzeugmodelle stammen von der „George Washington University National Crash Analysis Center“, welches die frei verfügbaren Modelle für Frontalcrash-Lastfälle entwickelt und validiert hat. Um die Fahrzeugmodelle auch unter den Bedingungen eines Schutzplankenanpralls einsetzen zu können, findet ein direkter Abgleich der numerischen Simulation mit realen Anprallversuchen statt. Anhand der Messergebnisse aus den Anprallversuchen werden die numerischen Modelle angepasst und im Sinne der TR 16303 ([22], [24]) gegen reale Anpralltests an Schutzeinrichtungen validiert.

6.1.1. Modell: Fahrzeuge

Als Fahrzeugmodelle kommen in den Simulationen zwei bereits existierende numerische Modelle zum Einsatz. Vor dem Hintergrund der Analyse von Unfalldaten sollen sie die untere und die obere Grenze der ungefähren Bandbreite moderner Pkw repräsentieren, die im Unfallgeschehen und somit für die Auslegung von PSE zu erwarten sind. So findet sich im Katalog frei verfügbarer Simulationsmodelle ein Pkw „Kleinwagen“ eines japanischen Herstellers mit Bauzeitraum 2005-2011, welcher im Projekt die Gruppe der Kleinwagen (Massegruppe II) repräsentieren soll.

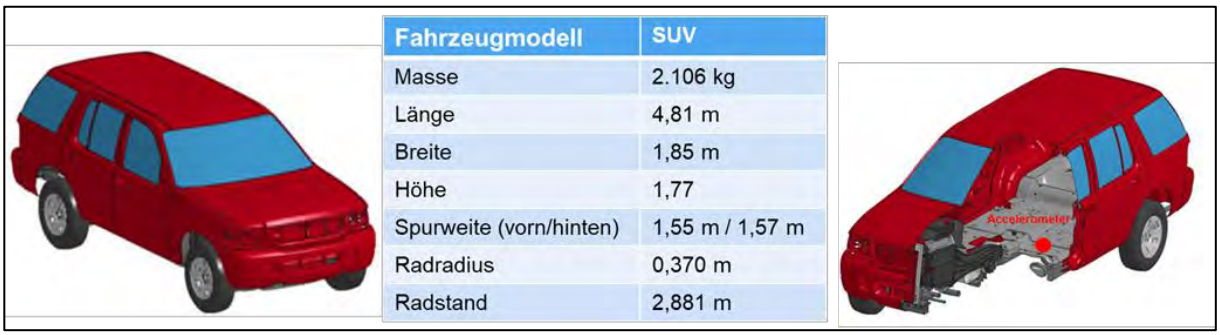


Fahrzeugmodell	Kleinwagen
Masse	1.190 kg
Länge	3,78 m
Breite	1,69 m
Höhe	1,47 m
Spurweite (vorn/hinten)	1,47 m / 1,46 m
Radradius	0,305 m
Radstand	2,460 m

Abbildung 6-1: Numerisches Fahrzeugmodell "Kleinwagen"

Das Modell (siehe Abbildung 6-1) bildet die Crashstrukturen mit einem hohen Detailgrad ab. Der Innenraum ist ebenfalls detailliert modelliert. Die Insassen-Rückhaltesysteme (Gurt, Airbag) sind im Simulationsmodell jedoch nicht enthalten.

Die Gruppe der großen Fahrzeuge wird mit Hilfe eines Sport Utility Vehicles, welches auch in Europa erhältlich ist, abgebildet. Ausgewählt wird hierfür ein Pkw „SUV“ eines amerikanischen Herstellers mit Bauzeitraum 2001-2010, welcher im Projekt die Gruppe der „schweren Fahrzeuge“ (Massegruppe IV) repräsentieren soll. Mit seiner Masse und seinen Abmessungen liegt dieser am oberen Rand der Fahrzeugsegments von Sport Utility Vehicles und Geländewagen auf dem europäischen Markt.



Fahrzeugmodell	SUV
Masse	2.106 kg
Länge	4,81 m
Breite	1,85 m
Höhe	1,77
Spurweite (vorn/hinten)	1,55 m / 1,57 m
Radradius	0,370 m
Radstand	2,881 m

Abbildung 6-2: Numerisches Fahrzeugmodell "Schweres Fahrzeug"

Das verfügbare Modell weist einen guten Detaillierungsgrad der Crashstrukturen auf. Eine Innenraumausstattung (Sitze, Instrumententafel, Rückhaltesysteme) ist hingegen nicht verfügbar.

6.1.2. Modell: Fahrzeuginnenraum

Um Aussagen über die Insassenbelastungen bei Schutzplankenanprallen treffen zu können, werden zusätzlich zur Simulation der Fahrzeugdeformation und -kinematik die einwirkenden Kräfte und Beschleunigungen auf das Dummy-Modell ermittelt. Zu diesem Zweck werden in separaten Simulationsläufen zunächst die auftretenden dynamischen Fahrzeugbelastungen, insbesondere die Beschleunigungen in allen drei Achsenrichtungen, bestimmt. Im zweiten Schritt werden diese fahrzeug- und kollisionsspezifischen Beschleunigungsverläufe einem Innenraum aufgeprägt, der sich an dem des Kleinwagens orientiert, um so letztlich die auf den Insassen wirkenden Belastungen zu bestimmen. Das hierfür verwendete Modell ist in Abbildung 6-3 dargestellt. Im Rahmen des Projektes werden nur der Fahrer und seine unmittelbare Umgebung untersucht und keine weiteren Sitzplätze beziehungsweise Insassen betrachtet. Es wird unterstellt, dass dieser Bereich des Innenraums keine Deformationen oder Intrusionen erfährt, die direkte Kräfte auf den Insassen ausüben.

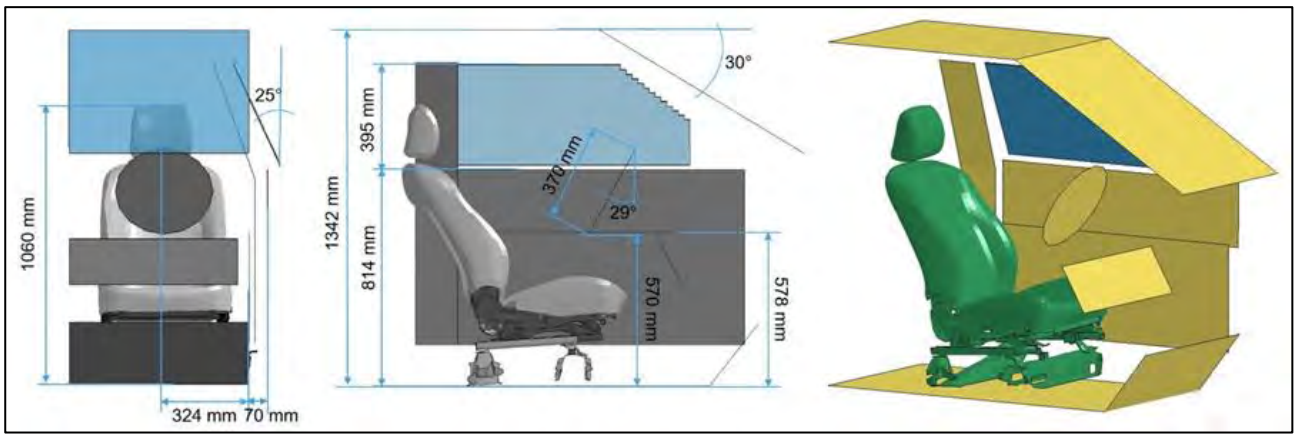


Abbildung 6-3: Modell des Innenraums für die Insassensimulation

Die Geometrie des Innenraums basiert auf den vereinfachten Cockpit-Abmessungen des Kleinwagens, wird aber – wie auch der Sitz und das Gurtsystem – auch unmittelbar auf das SUV-Modell übertragen. Tatsächlich zeigen vergleichende Messungen in den originalen Fahrzeugen, dass wesentliche Maße, die die Sitzposition und die Abstände des Fahrers zu Lenkrad, Bodenblech und Instrumententafel festlegen, trotz unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte einander sehr ähneln. Die Materialien und die Formgebung der Strukturen, mit denen der Insasse während der Kollision in Kontakt kommen kann, werden jedoch generalisiert modelliert und entsprechen nicht denen der konkreten Vorbilder. Folglich können Fahrzeugekomponeten, wie die Türverkleidung oder die Armateurentafel steifer oder weicher sein als in der Realität.

Für eine realistische Kinematik der Fahrzeuginsassen in der numerischen Simulation wird ein vereinfachtes Modell des Insassenrückhaltesystems verwendet (Abbildung 6-4). Hierzu werden die vorhandenen Fahrzeugsitze um ein generisches Dreipunkt-Gurtsystem ergänzt. Um das Verhalten des Gurtstraffers näherungsweise nachzubilden, wird der Gurtbandauszug bei Erreichen einer „Auszugsgeschwindigkeit“ von 3,6 m/s blockiert, wohingegen die Aktivierung des Gurtstraffers im realen Fahrzeug durch das Airbagsteuergerät erfolgt. Eine regelrechte Straffung des Gurtbandes kann der Straffer – wie auch im Crashversuch – wegen der vergleichsweise späten Zündung bei bereits vorverlagertem Dummy hier nicht leisten. Auf die Nachbildung der Airbagauslösung wird im Rahmen der numerischen Simulation verzichtet, weil auch in den Crashversuchen die Airbagzündung so spät – bzw. beim SUV überhaupt nicht – erfolgte, so dass es zu keiner nennenswerten Interaktion mit dem Fahrer kam.

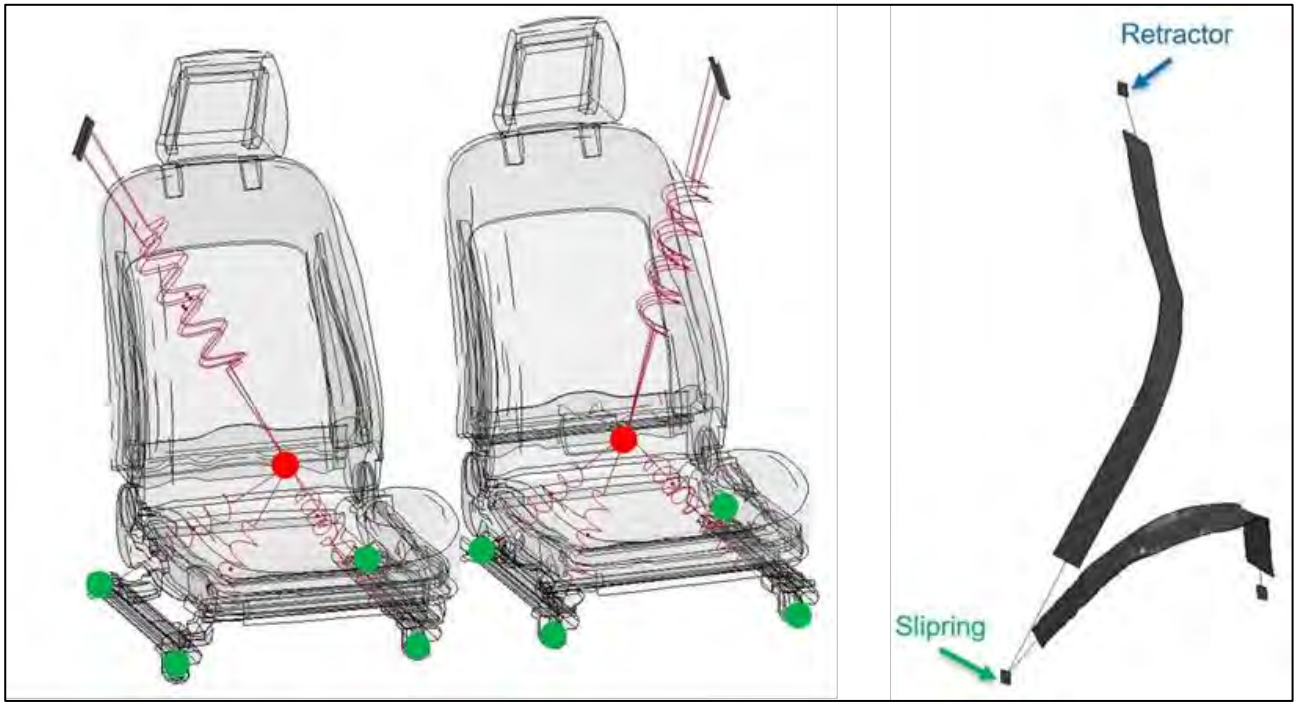
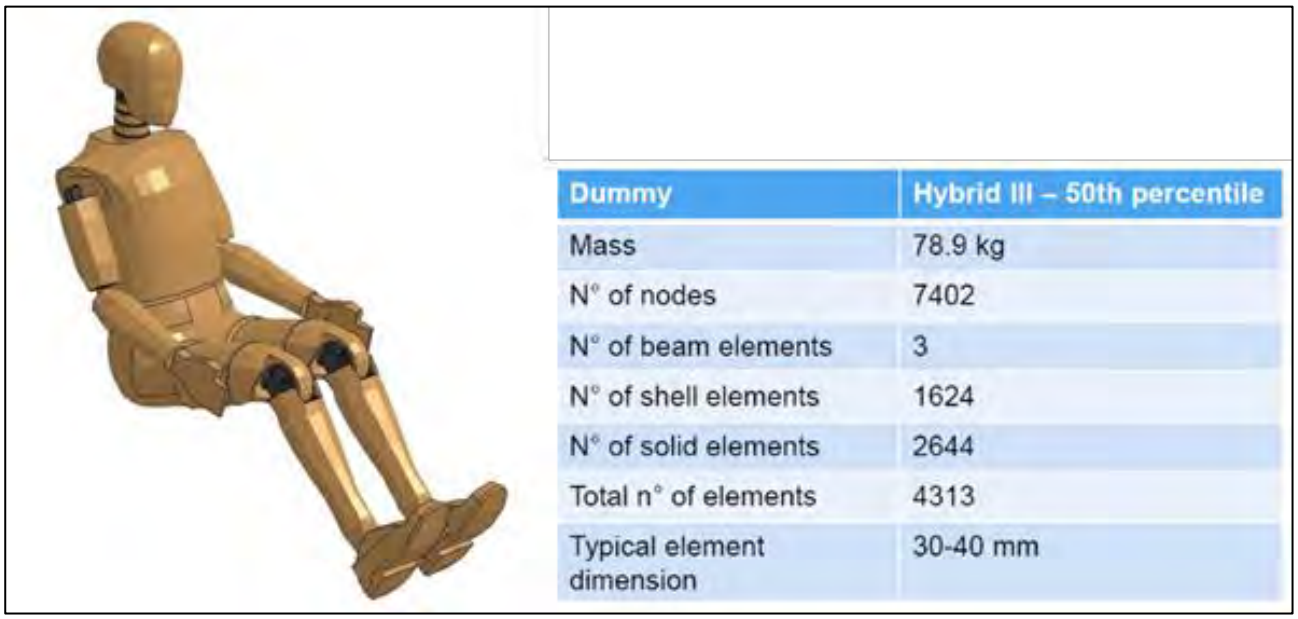


Abbildung 6-4: Modell der Sitze und des Gurtes für die numerische Simulation

Als Insasse wird das Modell eines Hybrid III Dummys (50th percentile male) verwendet. Diese anthropometrische Testpuppe ist derzeit noch der Standard-Dummy bei vielen Frontal-Crashtests und ein etabliertes Instrument, um die Belastungen für Insassen zu ermitteln und biomechanische Betrachtungen anzustellen. Das numerische Modell dieses Dummys stammt von der Firma Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Die Validierung des numerischen Modells gegenüber dem realen Crashtest-Dummy wurde durch den Anbieter durchgeführt [35].



Dummy	Hybrid III – 50th percentile
Mass	78.9 kg
N° of nodes	7402
N° of beam elements	3
N° of shell elements	1624
N° of solid elements	2644
Total n° of elements	4313
Typical element dimension	30-40 mm

Abbildung 6-5: Numerisches Dummy-Modell für die Simulation der Insassenbelastungen

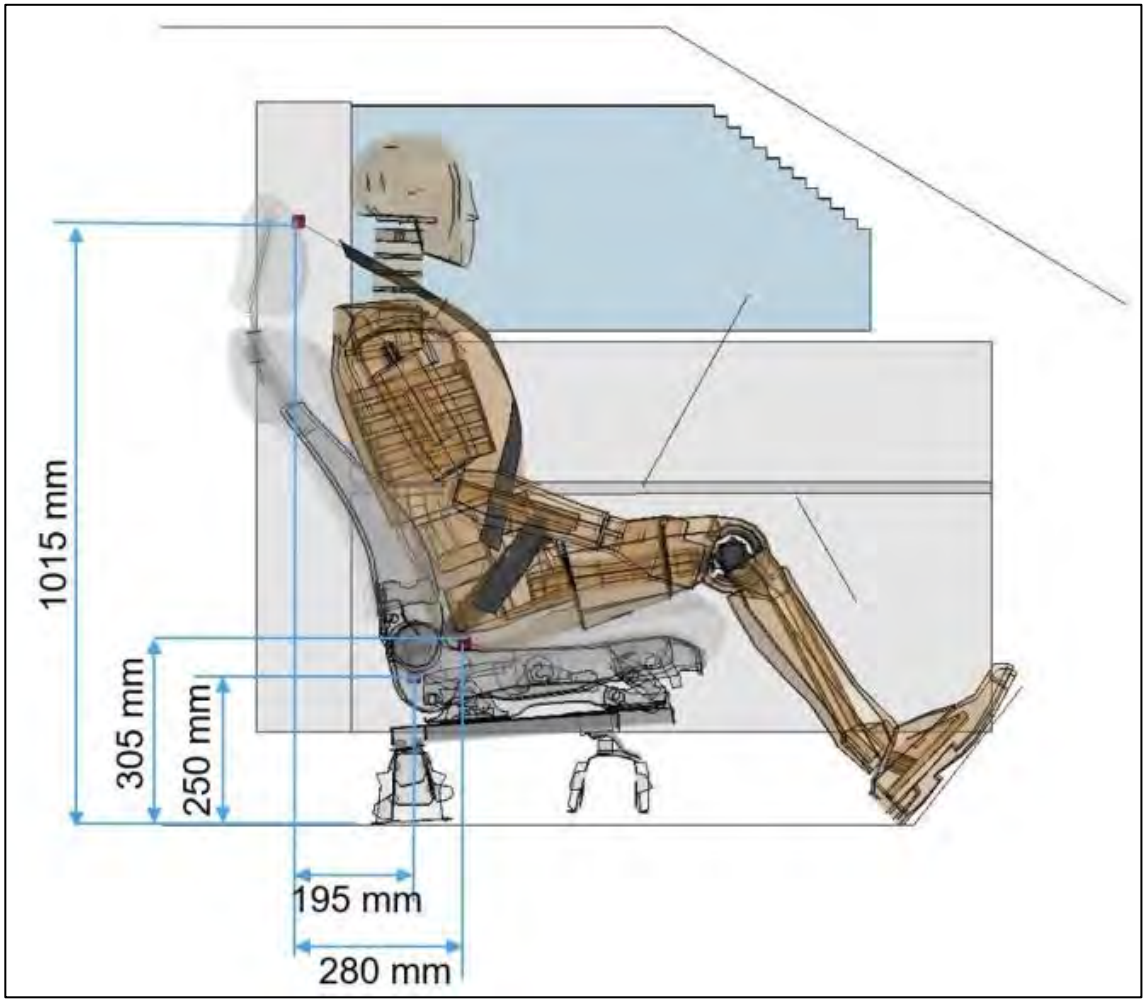


Abbildung 6-6: Generischer Innenraum, Sitz, Gurt und Insasse im zusammengesetzten Zustand

Das initiale Einsetzen des Dummy-Modells auf dem Sitz im generischen Innenraum erfolgt in aufrechter Sitzposition mit den in Abbildung 6-7 angegebenen Winkeln.

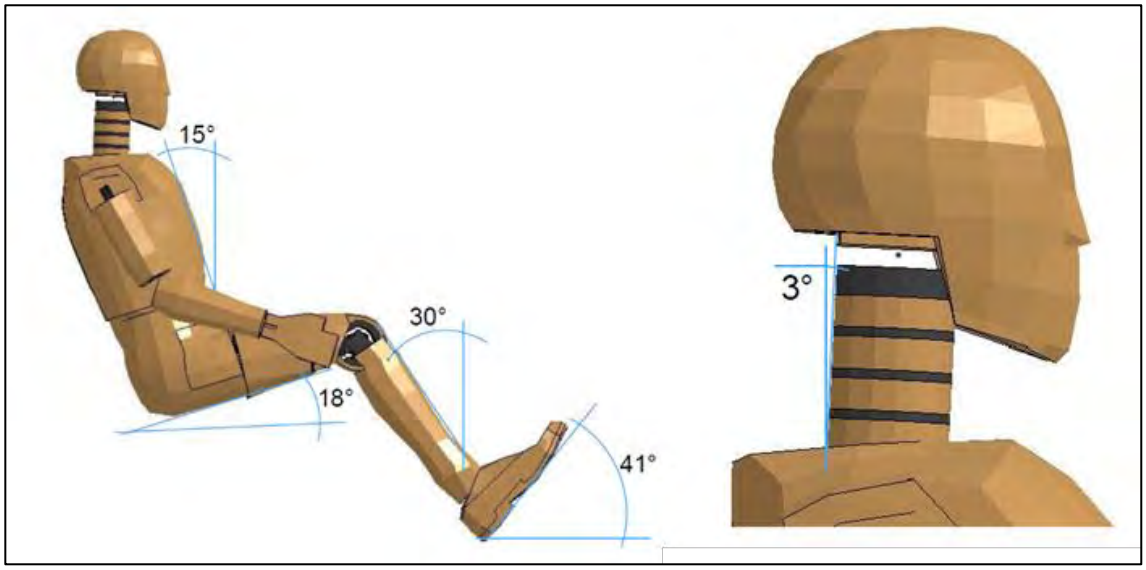


Abbildung 6-7: Aufrechte Sitzposition des Hybrid III Dummys

Die weitere Positionierung des Dummy-Modells erfolgt dann im direkten Vergleich mit der Position des realen Hybrid III Dummys im Innenraum der Versuchsfahrzeuge. Dazu werden charakteristische Maße, beispielsweise Abstände von Körperteilen zu Lenkrad, Türinnenverkleidung oder Instrumententafel, wie sie typischer Weise bei der Vorbereitung von Crashtests bestimmt werden, herangezogen. Ziel ist es, diese Maße in gute Übereinstimmung mit den Vorgaben aus dem Versuch zu bringen und so die Voraussetzung für eine möglichst genaue Wiedergabe der realen Verhältnisse zu schaffen.

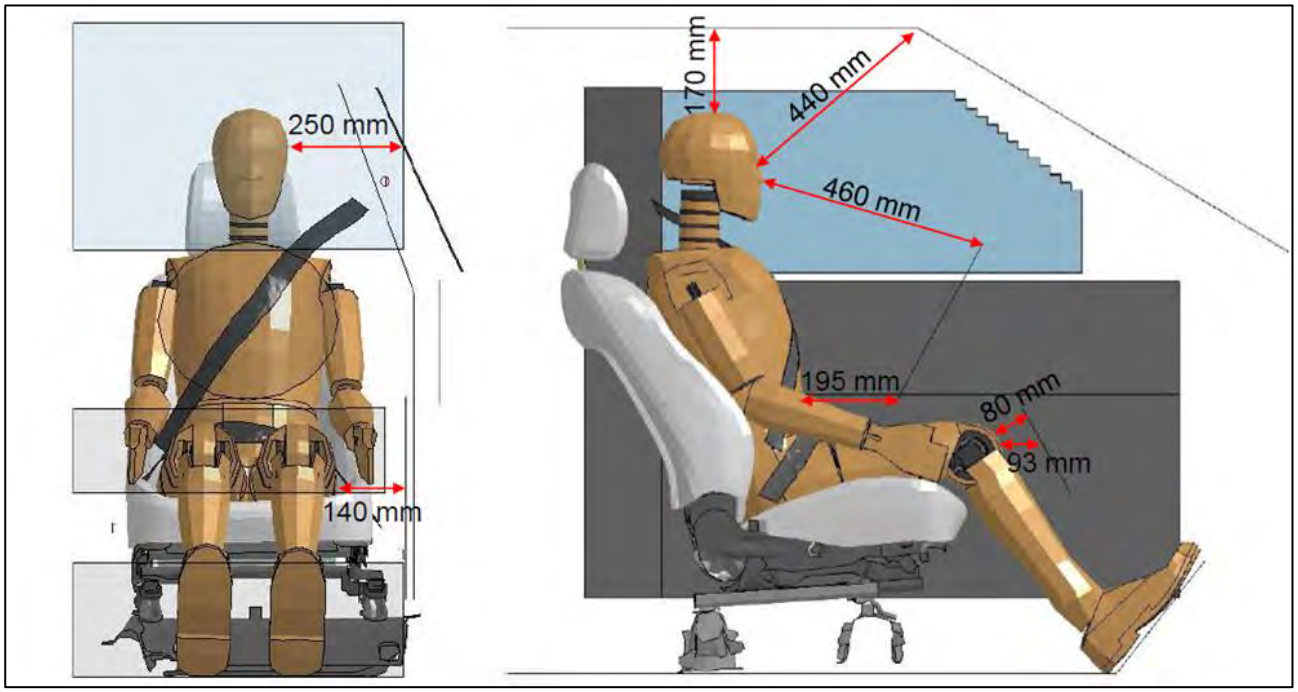


Abbildung 6-8: Position des HIII Dummys im generischen Fahrzeuginnenraum

Das Modell des fahrerseitigen Innenraums mit dem gurtgesicherten Dummy auf dem Fahrersitz wird dann in Abhängigkeit vom gewählten Fahrzeugmodell und der jeweiligen Anprallkonstellation einem charakteristischen äußeren Belastungsverlauf (translatorische und rotatorische Fahrzeugbeschleunigungen, gemessen etwa im Fahrzeugschwerpunkt) ausgesetzt, welcher das Ergebnis der vorangegangenen FEM-Simulation des Anpralls des Fahrzeugmodells gegen das Modell der Schutzeinrichtung ist. Die Simulation des Fahrzeugverhaltens und die des fahrerseitigen Innenraums erfolgen getrennt voneinander, wie aus der Übersicht aller Simulationen (s. Abschnitt 4.3, Tabelle 4-2) hervorgeht. Beim Großteil der Variationen von Anprallparametern werden die Fahrzeugsimulationen durch Insassensimulationen ergänzt. Wo in erster Linie der Einfluss von geänderten Anprallparametern auf das generelle Verhalten des Fahrzeugs von Interesse ist, beispielsweise bei Betrachtungen zur Überschlagstendenz, wird auf die anschließende Insassensimulation verzichtet.

Die Simulation der Insassenkinematik und Abschätzung der resultierenden biomechanischen Belastungen unter Einsatz eines Simulationsmodells eines modernen Fahrzeugmodells stellt eine neuartige Herangehensweise für Anprallversuche von Fahrzeugen gegen PSE dar. Die im Rahmen des Projektes entwickelte Methode zur Beurteilung biomechanischer Belastungen erhebt dabei nicht den Anspruch, die Belastungen auf den Fahrer-Dummy und erst recht nicht auf einen realen Insassen exakt vorherzusagen, sondern dient in erster Linie dazu, Tendenzen und mögliche Potentiale beziehungsweise Risiken bei verschiedenen Aufprallsituationen von Fahrzeugen gegen PSE aufzuzeigen.

6.1.3. Modelle: passive Schutzeinrichtungen

Schutzplanke

Im Rahmen der Untersuchung kann auf vorhandene Elemente in Deutschland verbreiteter Stahlschutzplanken zurückgegriffen werden. Für das vorliegende Simulationsmodell wird ein zugelassenes System verwendet, für welches eine hohe Verbaurate in den kommenden Jahren erwartet wird. Es handelt sich um ein einfaches Schutzplankensystem (ESP). Das hier verwendete Modell erfüllt die Anforderungen der TR 16303.

In Abbildung 6-9 sind die geometrischen Festlegungen für das Schutzplankenmodell dargestellt. Die Verbindungen der Modellteile (Stahlteile, Schrauben, Anbindung an den Boden) und die Materialeigenschaften werden hier aus den vorhandenen Modellen übernommen. So werden beispielsweise die Stahlelemente als S235- oder S235JR-Ausführung eingesetzt. Die Verschraubungen sind sowohl als M16 in der Festigkeitsklasse 4.6 als auch als M10 8.8 ausgeführt.

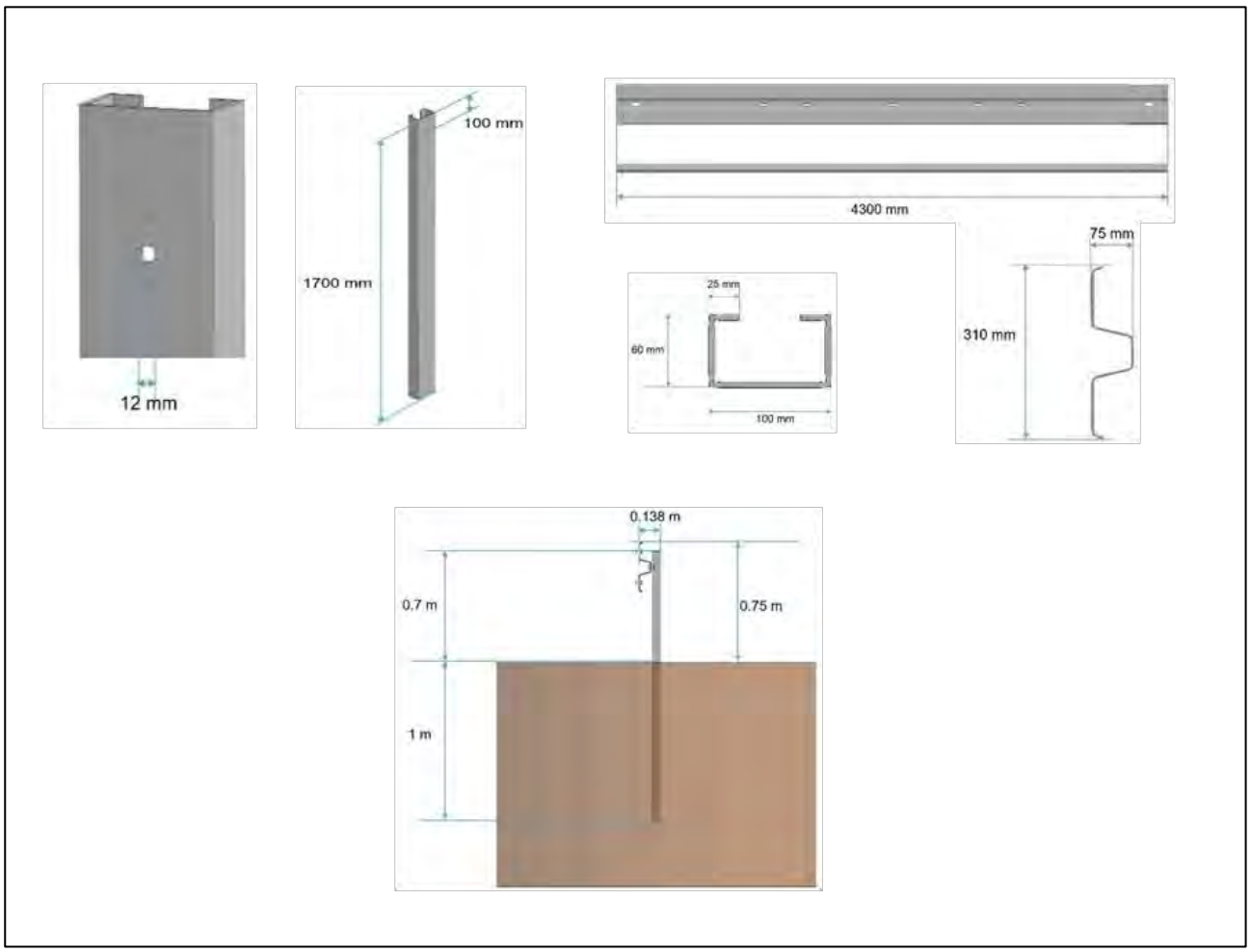


Abbildung 6-9: Abmessungen des numerischen Modells der Stahlschutzplanke

Neben den verwendeten Materialien ist die Verbindung der Schutzplanke mit dem Boden von großer Wichtigkeit. Im vorliegenden Modell wird eine Bodenklasse verwendet, die bei Realtests als „fester“ Boden eingestuft wird.

Um, wie in Abschnitt 4.3. beschrieben, verschiedene Aspekte der Fahrzeugrückhaltung zu beleuchten, werden im Rahmen des Projektes ausgewählte Eigenschaften der Stahlschutzplanke variiert. Dies geschieht durch Veränderung ausgewählter Einbaumerkmale. Materialeigenschaften oder konstruktive Parameter werden nicht verändert.

Für die Realisierung eines „niedrigen“ Schutzplankeneinbaus wird die Einbauhöhe von 0,75 m auf 0,60 m reduziert.

Um einen geringeren Wirkungsbereich, das heißt eine steifere Schutzplankenkonstruktion, zu erzielen, wird der Abstand zwischen den Pfosten verringert. In Abbildung 6-10 ist die in einigen Simulationen verwendete verstärkte Schutzplanke dargestellt,. Hier beträgt der Pfostenabstand 1,0 m im Gegensatz zu 2,0 m bei der Standard-Ausführung in den übrigen Simulationen.

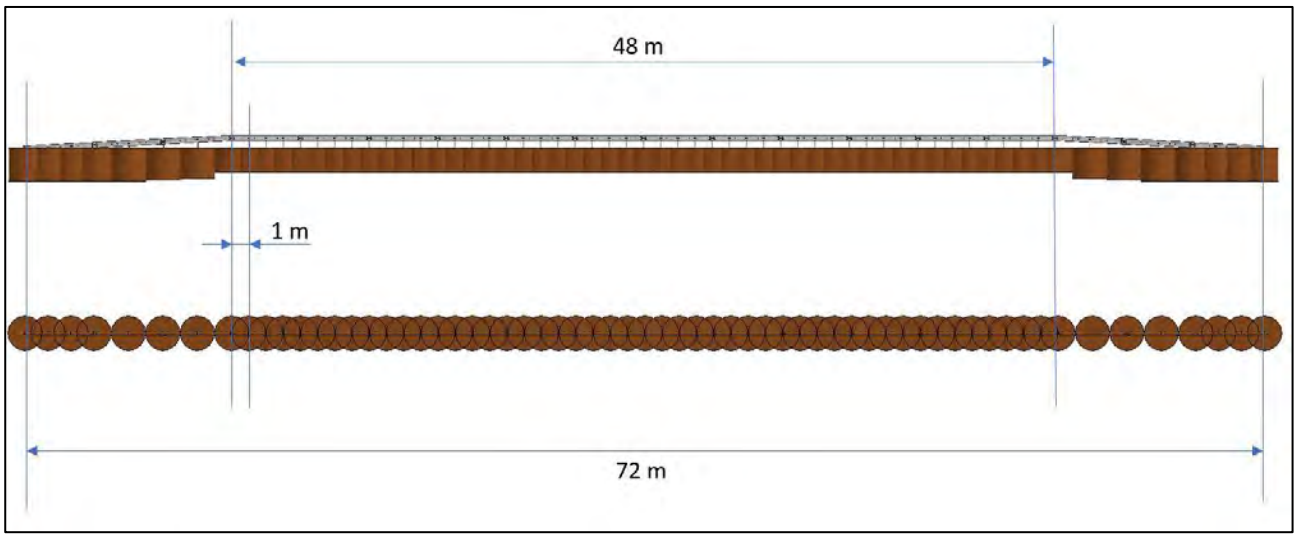


Abbildung 6-10: Numerisches Modell der eingebauten „verstärkten“ Stahlschutzplanke

Schutzwand

Für die numerische Simulationen werden zwei Modelle von Schutzwänden modelliert. Die Validierung des Simulationsmodell erfolgt anhand des Kleinwagenanpralls gegen das Schutzwandsystem „New Jersey 81“.

Im Realversuch wurde ein Profil getestet, das bei Neugestaltungen oder Neubauprojekten von Streckenabschnitten mit Schutzwänden kaum mehr Verwendung findet. Folglich wird die Simulation erweitert durch ein aktuelleres Schutzwandsystem, dass sich im Simulationsmodell durch ein vom „New Jersey 81“ abweichendes Querschnittsprofil unterscheidet.

In Abbildung 6-11 sind die geometrischen Abmaße der beiden Schutzwandprofile dargestellt. Wesentliche Unterschiede zwischen den Systemen sind die Profilhöhe, -breite und die Gestaltung der Sockel. Mit 90 cm Einbauhöhe ist das aktuellere System 9 cm höher als die getestete Schutzwand. Beide Systeme besitzen die Aufhaltestufe H2 – höheres Rückhaltevermögen.

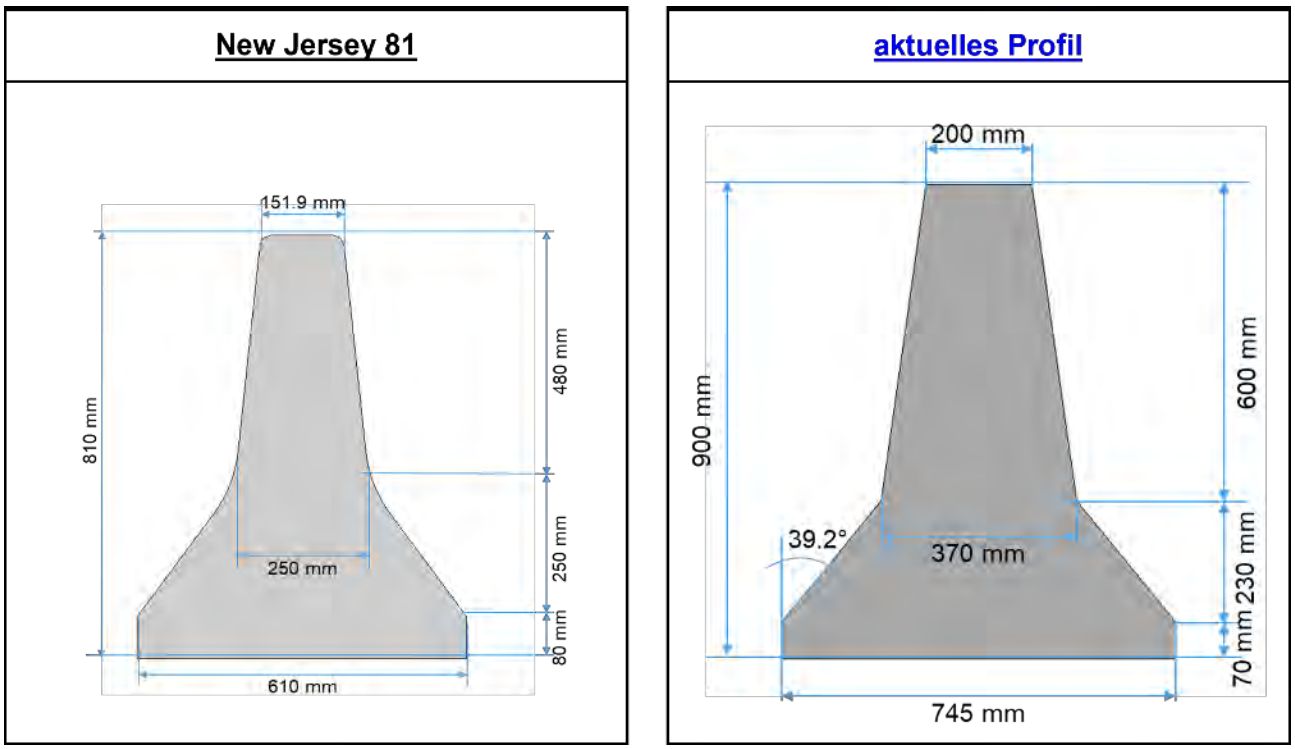


Abbildung 6-11: modellierte Schutzwandsysteme aus Beton (li.: New Jersey 81 | re.: aktuelles Profil)

Für beide Schutzwandsysteme werden in der Simulation dieselben Materialeigenschaften angenommen. Der Beton (C30/37, Dichte: 2.297 kg/m³) wird mit elastischen Eigenschaften (Elastizitätsmodul 32.840 MPa) modelliert. Das Fließen und Brechen des Materials wie auch die Bewehrungen innerhalb der Schutzwandsystemen werden in den Simulationsmodellen nicht implementiert. Der Aufbau der Schutzwände im Simulationsumfeld erstreckt sich über eine Gesamtlänge von 60 m, bestehend aus Anfangs- und Endkonstruktion (je 2,5 m) und einer 55 m langen Barriere.

Neben den verwendeten Materialien ist die Verbindung der Schutzwände mit dem Boden von großer Wichtigkeit. In den vorliegenden Simulationen werden die beiden Systeme als vollfundamentiert betrachtet, indem eine Verschiebung der Barrieren durch eine numerische Beschränkung verhindert wird.

6.2. Validierung

Die Gegenüberstellung der ermittelten Werte aus dem Realversuch und der Simulation für den Anprallversuch 1 „Kleinwagen vs. Schutzplanke“ bei 110 km/h und 20° zeigt den Grad der Erfüllung der in DIN EN 16303 [25] beschriebenen Toleranzbereiche (siehe Tabelle 6-1).

Auch aufgrund leicht unterschiedlicher Fahrzeugspezifikationen zwischen Simulation und Realversuch kommt es zu Abweichungen der berechneten und im Versuch gemessenen Werte. Neben der dynamischen Durchbiegung wird bei dieser Simulation der ASI-Toleranzbereich etwas verfehlt. Dennoch wird das Modell als geeignet angesehen, um damit weitere Betrachtungen anzustellen.

Tabelle 6-1: Vergleich von Simulation und Anprallversuch 1 – Kleinwagen vs. Schutzplanke

	Realversuch 1	Simulation 2	Innerhalb des Toleranzbereiches nach DIN EN 16303 [25]
Anprallwinkel in °	20	20	-
Anprallgeschwindigkeit in km/h	113,8	110	-
ASI	0,73	0,85	Nein
Zeitpunkt, max. ASI in s	0,237	0,212	Ja
THIV in km/h	22,6	23,4	Ja
Theoretische Flugzeit des Kopfes in s	0,132	0,129	Ja
Wirkungsbereich in m	1,0	0,86	Ja
Dynamische Durchbiegung in m	1,0	0,82	Ja

Die Simulation für den Anprallversuch 2 „SUV vs. Schutzplanke“ bei 110 km/h und 20° zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Realversuch und numerischer Simulation. Alle Toleranzbereiche nach DIN EN 16303 werden eingehalten (siehe Tabelle 6-2).

Tabelle 6-2: Vergleich von Simulation und Anprallversuch 2 – SUV vs. Schutzplanke

	Realversuch 2	Simulation 6	Innerhalb des Toleranzbereiches nach DIN EN 16303 [25]
Anprallwinkel in °	20	20	-
Anprallgeschwindigkeit in km/h	112,5	112,5	-
ASI	0,543	0,582	Ja
Zeitpunkt, max. ASI in s	0,274	0,264	Ja
THIV in km/h	19,4	18,5	Ja
Theoretische Flugzeit des Kopfes in s	0,178	0,178	Ja
Wirkungsbereich in m	1,6	1,43	Ja
Dynamische Durchbiegung in m	1,5	1,40	Ja

Die Gegenüberstellung der ermittelten Werte aus dem Realversuch und der Simulation für den Anprallversuch 3 „Kleinwagen vs. Schutzwand“ bei 110 km/h und 20° zeigt, dass die in DIN EN 16303 beschriebenen Toleranzbereiche eingehalten werden (siehe Tabelle 6-3).

Tabelle 6-3: Vergleich von Simulation und Anprallversuch 3 – Kleinwagen vs. Schutzwand

	Realversuch 3	Simulation 12	Innerhalb des Toleranzbereiches nach DIN EN 16303 [25]
Anprallwinkel in °	20	20	-
Anprallgeschwindigkeit in km/h	114,3	110	-
ASI	2,34	2,29	Ja
Zeitpunkt, max. ASI in s	0,0396	0,0542	Ja
THIV in km/h	32,97	35,5	Ja
Theoretische Flugzeit des Kopfes in s	0,080	0,086	Ja

6.3. Ergebnisse der Simulationen

Zu fast jeder Anprallkonstellation finden zwei numerische Simulationen statt (siehe Tabelle 4-2). In der ersten Simulation werden der Anprall des Fahrzeuges an die Schutzeinrichtung berechnet und die dabei auftretenden Kräfte und Beschleunigungen ermittelt. Im Anschluss erfolgt die Simulation der Insassenbewegung und -interaktion mit dem Fahrzeuginnenraum-Modell und Berechnung der resultierenden Belastungen. Die Eingangsparameter sind hier die Kräfte aus der Fahrzeuganprall-Simulation, welche dem Innenraum, also der unmittelbaren Umgebung des Insassen, aufgeprägt werden.

Im Rahmen des Projekts werden ausschließlich die aus der Simulation bestimmten Werte bei Erstanprall mit der Schutzwand objektiv bewertet. Die Fahrzeugbewegung und Belastungen im Innenraum nach der Erstkollision mit der Schutzeinrichtung werden lediglich qualitativ behandelt.

Die Ergebnisse sind berechnete Werte zur Bewertung des Anpralls (ASI, THIV) sowie Belastungswerte für drei Körperregionen aus der Innenraumsimulation. Sowohl die jeweiligen ASI-Werte als auch die Beschleunigungsbelastungen für Kopf, Brust und Becken liegen als zeitliche Verläufe vor. Aus diesen werden analog zum Vorgehen bei den realen Anprallversuchen die für die Beurteilung der biomechanischen Belastung maßgeblichen Maximalwerte bestimmt. Für den Kopf wird zudem aus der resultierenden Beschleunigung der HIC Wert (Head Injury Criterion) ermittelt.

Anhand der verfügbaren Animationen lassen sich kinematische Abläufe zusätzlich optisch mit den Versuchsvideos vergleichen (siehe Abbildung 6-12).

<u>Schutzplanke</u>

In Bezug auf den Schutzplankenanprall zeigt die numerische Simulation, dass in allen untersuchten Anprallkonstellationen die Schutzplanke funktionsfähig bleibt und es zu keinem Durchbruch kommt. Aufgrund der höheren Massen der Fahrzeuge im Vergleich zur dynamischen Anprallprüfung nach Norm erhöhen sich die Wirkungsbereiche der Schutzplanken zum Teil deutlich. Diese Vergrößerung des Wirkungsbereiches wird als ungünstig angesehen, da sich damit das Risiko des Durchschlagens des Fahrzeuges auf eventuelle dahinterliegende Hindernisse (Baum, Mauer, Mast) erhöht.

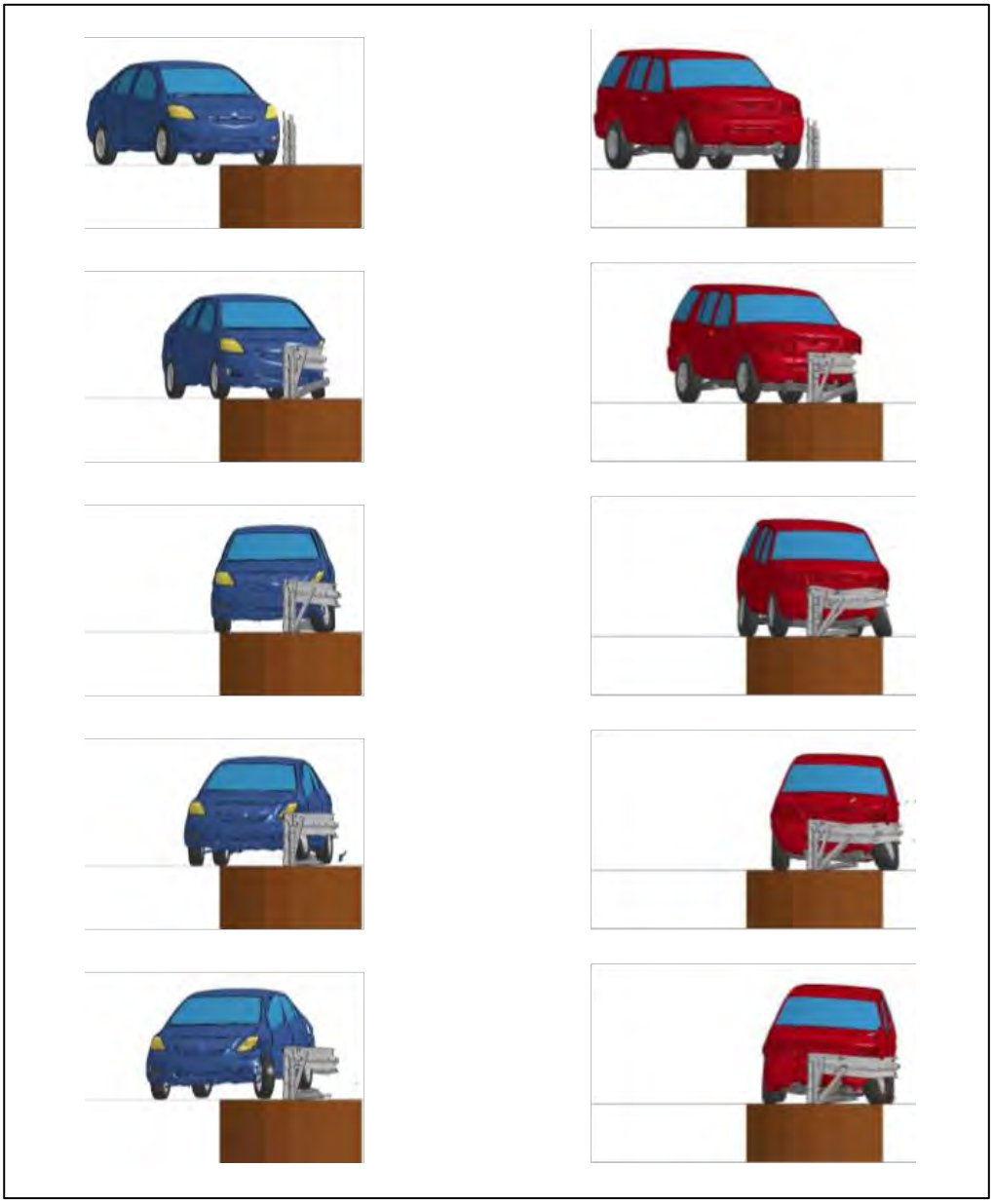


Abbildung 6-12: Numerische Simulation – zeitliche Abfolge – analog zu den Realversuchen 1 und 2 (li.: Simulationslauf Nr. 2; re.: Simulationslauf Nr. 6)

Die Verringerung der Anprallgeschwindigkeit von 110 km/h auf 80 km/h in den Simulationen mit dem Kleinwagen bei konstanten Anprallwinkeln von 20° hat einen um ein Drittel geringeren ASI-Wert zur Folge und die Anprallgeschwindigkeit des Kopfes (THIV) verringert sich um 17 %. Jedoch fallen die maximalen Belastungen auf Thorax und Becken höher aus.

Die Verringerung des Anprallwinkels von 20° auf 8° in den Simulationen mit dem Kleinwagen bei konstanter Anprallgeschwindigkeit von 80 km/h hat einen um ein Drittel geringeren ASI-Wert zur Folge und die Anprallgeschwindigkeit des Kopfes (THIV) verringert sich um mehr als 50 %. Die maximale Belastung von Kopf, Thorax und Becken fallen deutlich niedriger aus.

Nicht nur für den Kleinwagen, sondern auch in den Simulationen mit dem SUV zeigt sich bei niedrigeren Anprallwinkeln und Anprallgeschwindigkeiten eine Reduktion der Insassenbelastungen. Im Vergleich zwischen Kleinwagen und SUV, bei gleichen Eingangsparametern (Anprallwinkel / Anprallgeschwindigkeit), fallen die maximalen Belastungen für den SUV in nahezu allen Bereichen niedriger aus. Einzig die Beckenbelastung liegt im SUV höher.

Ein niedriger Einbau der Schutzplanke erhöht die Tendenz des Überfahrens und anschließenden Überschlags bei Fahrzeugen mit hohem Schwerpunkt, also insbesondere SUV. Weil aufgrund des – zumindest drohenden Überfahrens der Fahrzeuge mit Überschlag und langer Flugphase – längere Berechnungen der Insassenbewegungen und -belastungen nicht möglich sind, werden für diese Konstellationen nur der Anprall und die Kinematik der Fahrzeuge während der Interaktion mit der Schutzplanke simuliert. Ergebnisse in Form von Werten wie ASI und THIV liegen daher nicht vor. Das Überfahren einer Schutzplanke stellt aber an sich schon eine Gefahr für die Fahrzeuginsassen dar und wird als nachteilig beurteilt. Tatsächlich zeigt die Simulation des SUV-Anpralls deutlich ein beginnendes Überfahren der Schutzplanke. Beim Kleinwagen deutet die Kinematik zwar nicht auf ein Überfahren hin, dieser hebt aber während des Anpralls zeitweise von der Fahrbahn ab und lässt in der Folge ein instabiles Fahrverhalten befürchten (Abbildung 6-13).

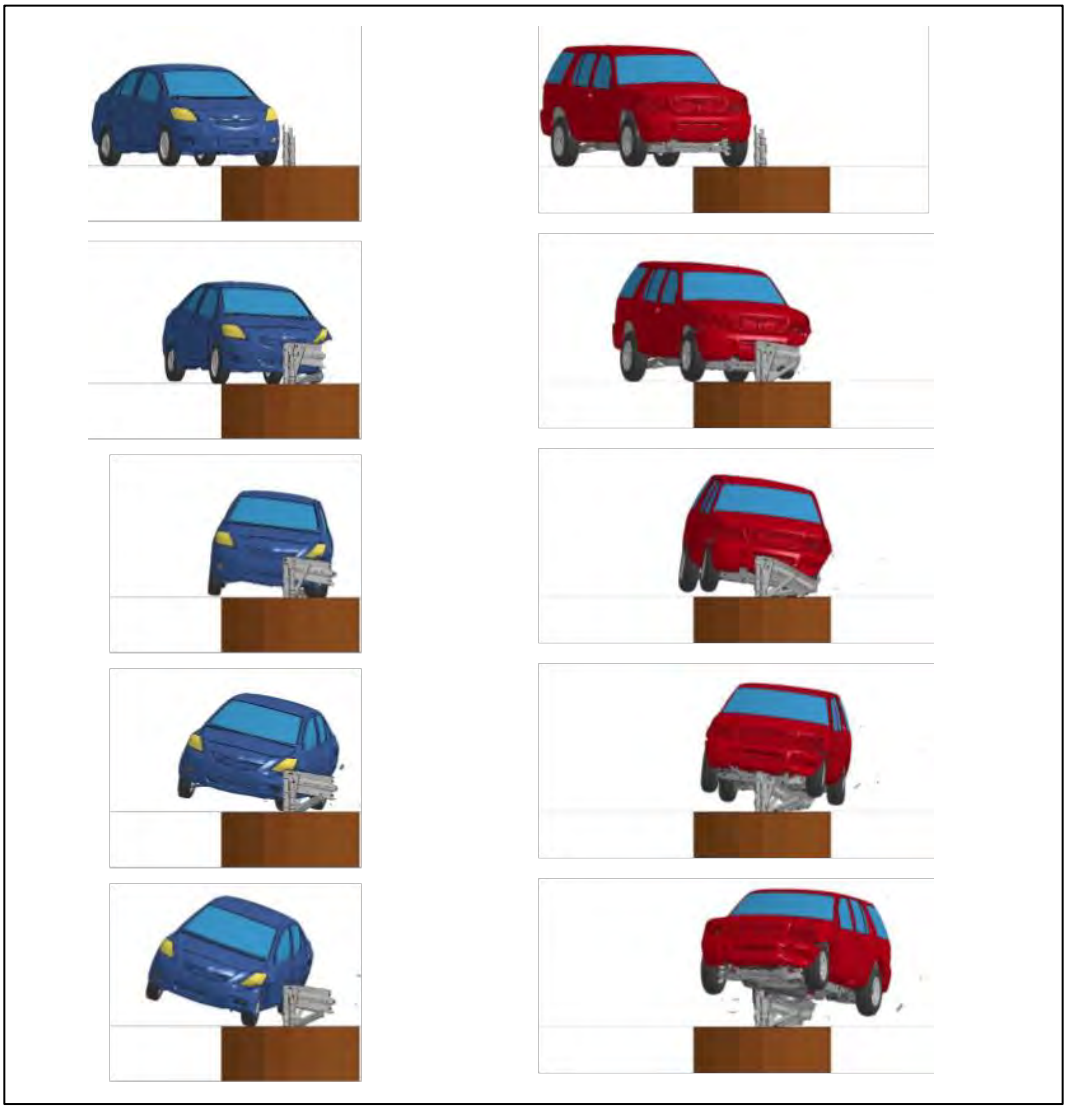


Abbildung 6-13: Numerische Simulation – zeitliche Abfolge (li.: Simulationslauf Nr. 8; re.: Simulationslauf Nr. 9)

Die Versteifung der Schutzplanke, realisiert durch die Halbierung des Pfostenabstandes von 2,0 m auf 1,0 m, hat für beide Fahrzeuge keine höhere Anprallheftigkeitsstufe zur Folge. Die dafür maßgeblichen Werte ASI und THIV liegen auch hier deutlich unter der Grenze der Anprallheftigkeitsstufe B.

Die nachfolgenden Diagramme zeigen beispielhafte Verläufe für resultierende Kopf-, Brust-, und Beckenbeschleunigungen des Fahrer-Dummys im Kleinwagen beim simulierten Schutzplankenanprall mit 110 km/h unter einem Winkel von 20° (Simulationslauf Nr. 2a).

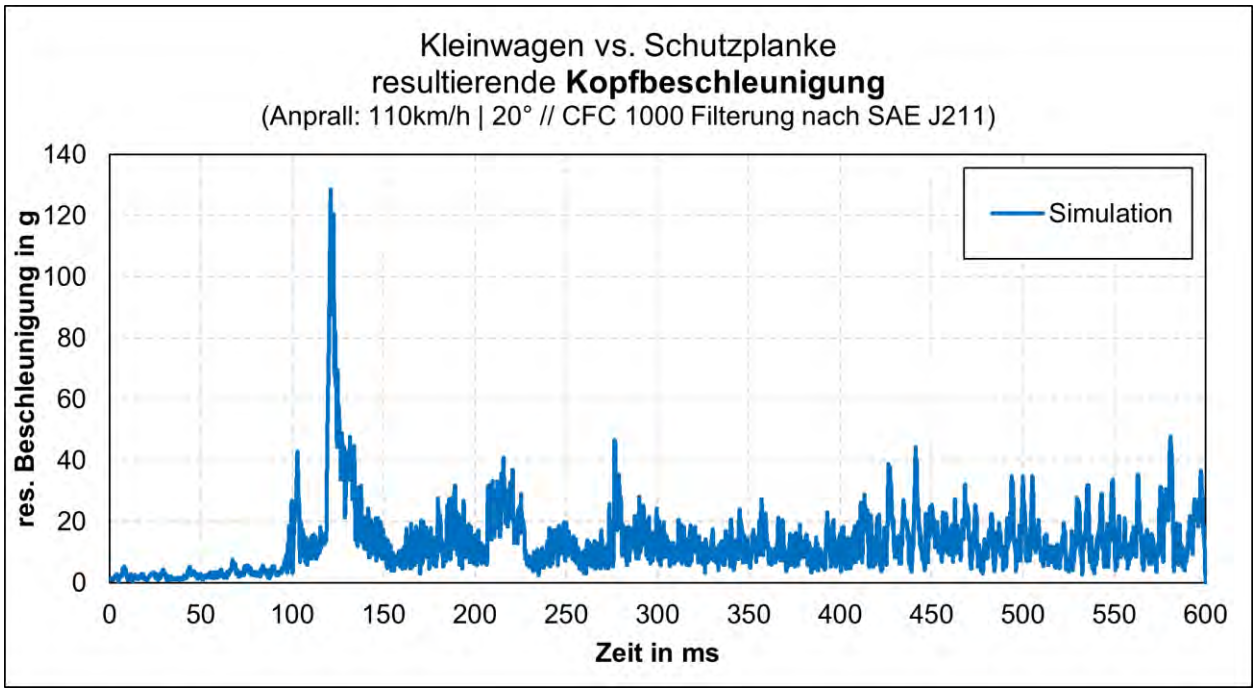


Abbildung 6-14: Verlauf der resultierenden Kopfbeschleunigung für den Simulationslauf Nr. 2a

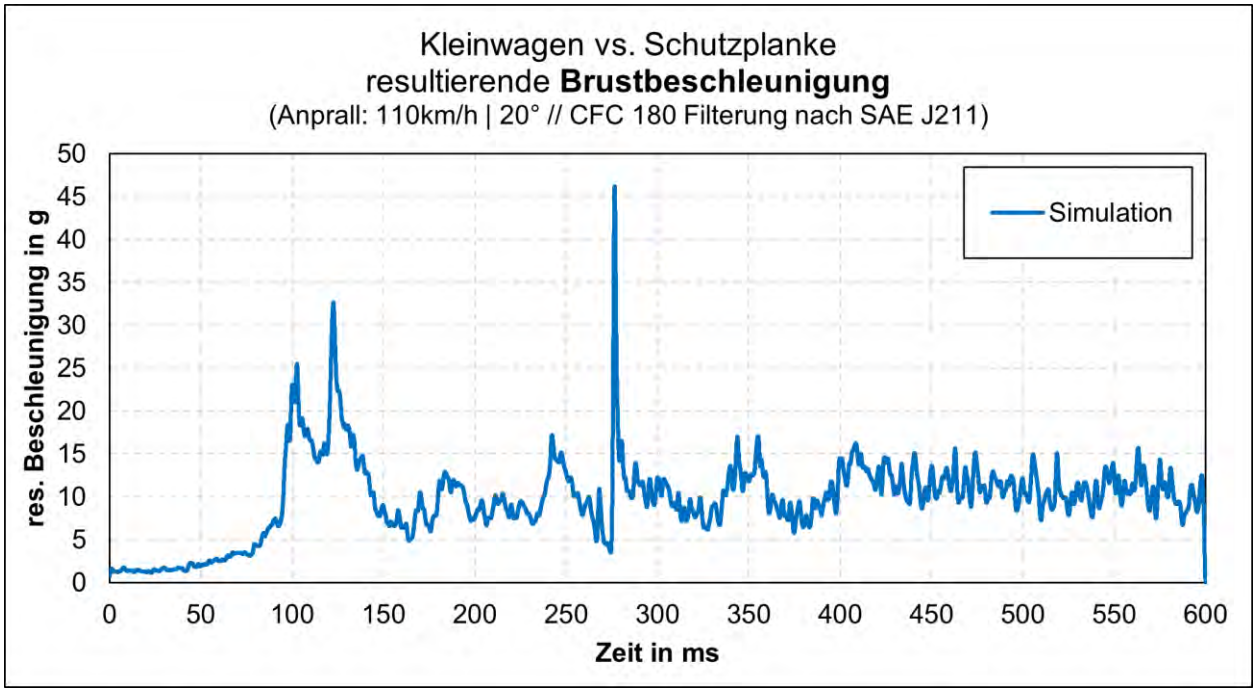


Abbildung 6-15: Verlauf der resultierenden Brustbeschleunigung für den Simulationslauf Nr. 2a

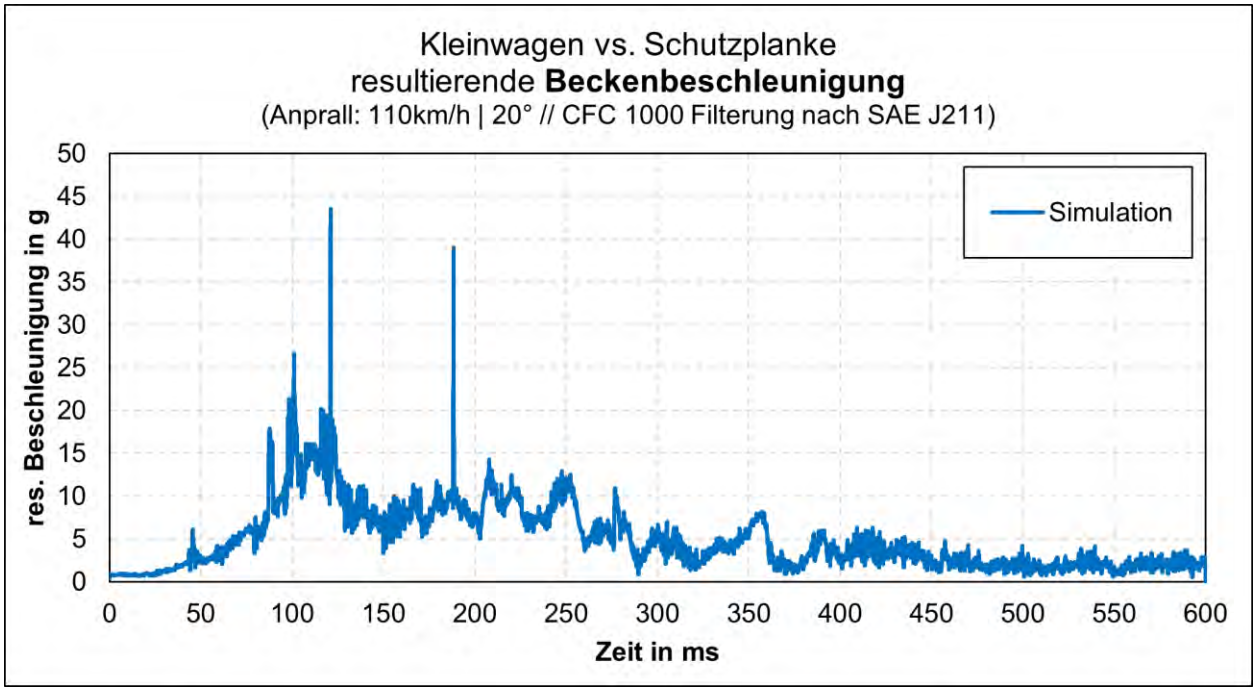


Abbildung 6-16: Verlauf der resultierenden Beckenbeschleunigung für den Simulationslauf Nr. 2a

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass in allen simulierten Anprallkonstellationen die biomechanischen Belastungen in den Körperregionen Kopf, Brust und Becken deutlich unter den jeweiligen Grenzwerten liegen. Auch eine Verstärkung der Schutzplanke zu Gunsten eines reduzierten Wirkungsbereiches lässt die Belastungen nicht über die biomechanischen Grenzwerte hinweg ansteigen.

Die Ergebnisse aller Simulationen sind in Tabelle 6-4 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 6-4: Ergebnisse aus den numerischen Simulationen

Nr.	Winkel / Geschwindigkeit [°] / [km/h]	Fahrzeug	PSE	ASI [-]	THIV [km/h]	Wirk.-bereich W_m [m]	*Normalisierter Wirk.-bereich* [m]	Max. Kopf-Beschl. (3 ms) [g]	HIC 15 [-]	Max. Brust-Beschl. (3 ms) [g]	Max. Becken-Beschl. (3 ms) [g]
1	20/80	Kleinwagen	Ecosafe 2.0	0,6	19,4	0,71	*n.b.*	55,8	187	20,1	18,4
2	20/110	Kleinwagen	Ecosafe 2.0	0,85	23,4	0,86	*1,00*	61,1	213	16,7	12,4
3	8/80	Kleinwagen	Ecosafe 2.0	0,37	13,4	0,24	*n.b.*	47,6	364	10,3	5,0
4	20/50	Kleinwagen	Ecosafe 2.0	0,46	15,7	0,33	*n.b.*	43,6	249	12,6	5,3
5	8/80	SUV	Ecosafe 2.0	0,24	12,6	0,37	*n.b.*	21,5	28	6,9	6,1
6	20/110	SUV	Ecosafe 2.0	0,58	18,5	1,43	*1,03*	20,1	21	13,8	16,0
7	8/130	Kleinwagen	Ecosafe 2.0	0,54	19,2	0,46	*n.b.*	45,4	137	15,9	19,0
8	20/110	Kleinwagen	Ecosafe 2.0, niedrig	0,74	25,3	0,82	*0,96*	*n.b.*	*n.b.*	*n.b.*	*n.b.*
9	20/110	SUV	Ecosafe 2.0, niedrig	x	x	x	*n.b.*	*n.b.*	*n.b.*	*n.b.*	*n.b.*
10	20/110	SUV	Ecosafe 2.0, steif	0,67	23,6	1,04	*0,76*	31,4	35,4	17,6	19,0
11	20/110	Kleinwagen	Ecosafe 2.0, steif	0,81	25,8	0,70	*0,81*	53,1	197	17,6	20,1

X – Kein Wert berechenbar – Abbruch der Simulation; n.b. – Wert nicht berechnet | ■ analog zum Realversuch

Eine Gegenüberstellung der mittels Simulation ermittelten Beschleunigungen und ihrer Kennwerte zeigt, dass in den verschiedenen Anprallkonstellationen der ASI- und THIV-Wert lediglich einen vergleichbaren Trend zeigen wie die 3-ms-Werte der Brust- und Beckenbeschleunigung. Für den Kopf zeigt sich kein erkennbarer Zusammenhang. Der ASI-Wert kann auf Grundlage dieser Ergebnisse allenfalls als ein grober Anhaltspunkt für die zu erwartende „globale“ Insassenbelastung gelten. Eine Abschätzung der zu erwartenden biomechanischen Belastungen – geschweige denn des Risikos für Verletzungen – in bestimmten Körperregionen ist damit nicht möglich. Es zeigt sich zudem, dass keinerlei Zusammenhang von THIV und ASI mit dem HIC besteht (siehe Abbildung 6-19).

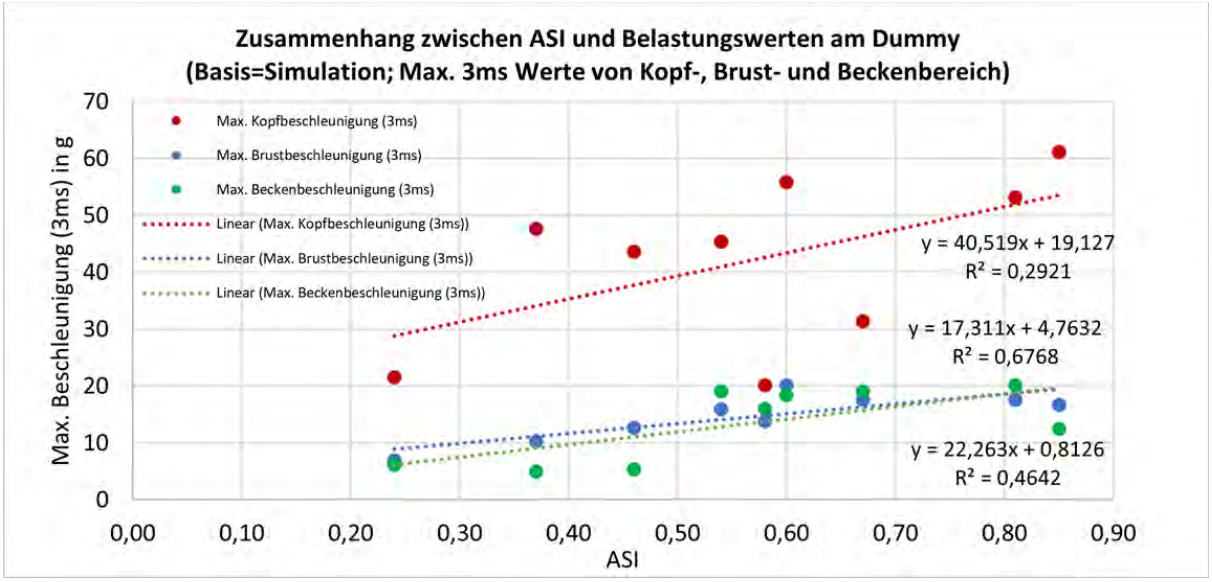


Abbildung 6-17: Zusammenhang zwischen ASI und Dummy-Beschleunigungsbelastungen

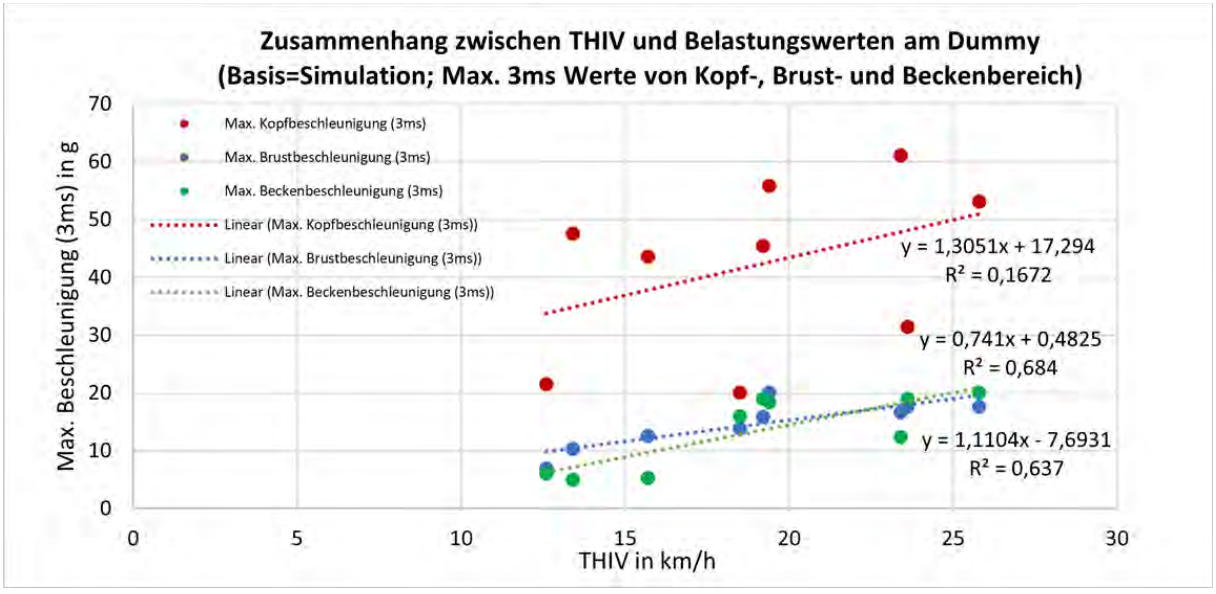


Abbildung 6-18: Zusammenhang zwischen THIV und Dummy-Beschleunigungsbelastungen

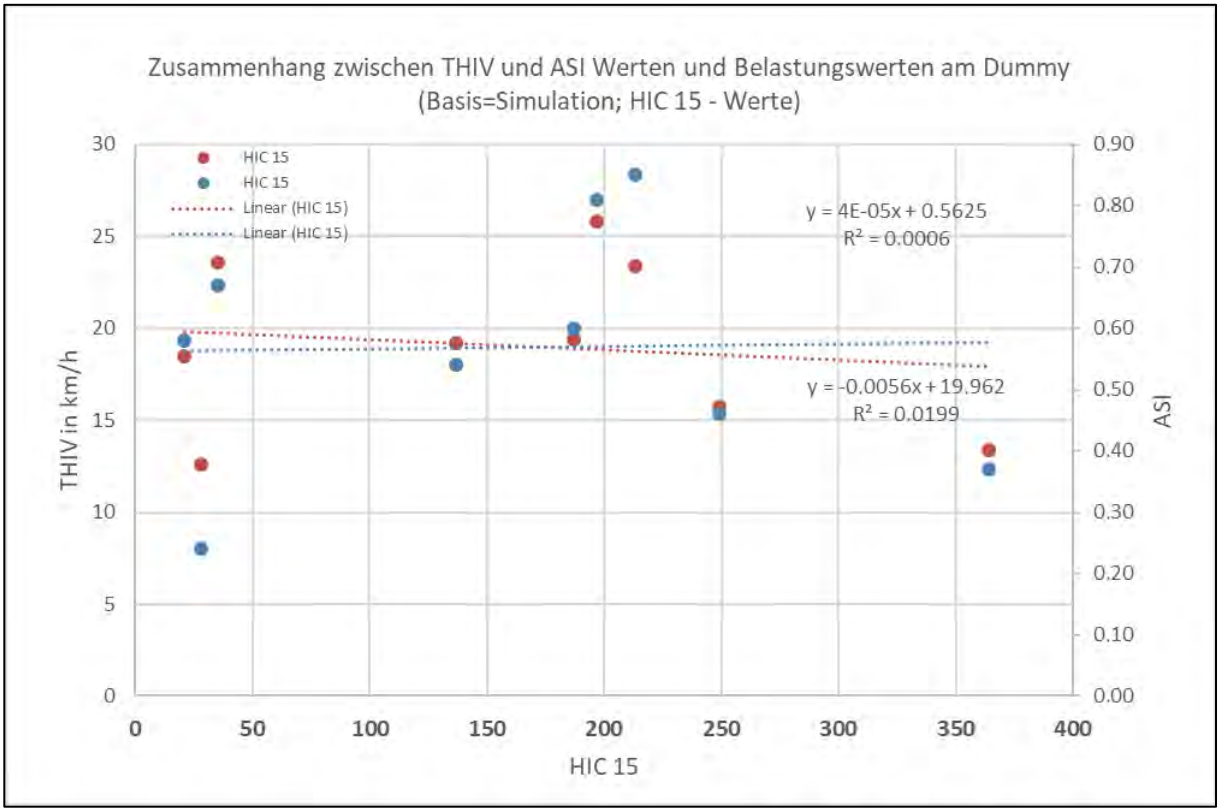


Abbildung 6-19: Zusammenhang zwischen HIC 15 und THIV und ASI

Folgende wesentliche Erkenntnisse aus den Simulationen zum Schutzplankenanprall können zusammengefasst werden:

- Der Wirkungsbereich vergrößert sich bei Anprall eines schweren Fahrzeuges an die Stahlschutzplanke.
- Bei einer niedrig eingebauten Schutzplanke kann es bei höheren Fahrzeugen (beispielsweise SUV) zum Überfahren der Schutzeinrichtung kommen.
- Durch die Verstärkung der Schutzplanke können die Wirkungsbereiche verkleinert werden und damit auch das Risiko, auf dahinter befindliche Hindernisse zu prallen.
- Die Kenngrößen ASI und THIV, die in Zertifizierungstests zur Beurteilung der Insassenbelastungen dienen sollen, zeigen in der Simulation lediglich für die Brust- und Beckenbeschleunigungen einen ähnlichen Trend.
- Es kann kein Zusammenhang zwischen HIC oder Kopfbeschleunigungen und THIV- und ASI-Werten festgestellt werden.
- In allen simulierten Konstellationen liegen die ermittelten biomechanischen Belastungswerte in den drei betrachteten Körperregionen deutlich unterhalb der jeweiligen Grenzwerte.

Schutzwand

Insgesamt finden im Rahmen der Untersuchung zum Schutzwandanprall fünf Simulationen statt (siehe Tabelle 4-2), wovon eine Simulation zur Validierung des Modelles dient. Für die weiteren Simulationen wird ein aktuelleres Schutzwandprofil (siehe Abschnitt 6.1.3) in das Modell implementiert und in einem Simulationslauf mit dem im Anprallversuch getesteten und simulierten Schutzwandprofil „New Jersey 81“ verglichen.

Neben dem Toleranzband nach DIN EN 16303 berücksichtigt die Fahrzeugsimulation zum Schutzwandanprall auch die Reibwertpaarungen für Barriere-Fahrzeugkarosserie (Beton-Metall) und Barriere-Reifen (Beton-Gummi). Folgende Reibwertkoeffizienten sind im Simulationsmodell implementiert:

- Barriere-Fahrzeugkarosserie 0,25 – 0,23
- Barriere-Reifen 0,35 – 0,33

Im Anschluss zur Fahrzeugsimulation werden die fahrzeug- und kollisionsspezifischen Beschleunigungsverläufe dem zuvor beschriebenen Innenraummodell aufgeprägt, um die auf den Fahrer wirkenden Belastungen zu bestimmen. Der Vergleich mit den Dummy-Messwerten aus dem Realversuch bestimmt die Güte der Innenraumsimulation (Tabelle 6-5). Unabhängig von den Messgrößen gibt es Unterschiede zwischen dem Realversuch und der Simulation. Am auffälligsten sind hierbei die 3-ms-Maximalwerte für Brust und Becken, welche in der Simulation nahezu doppelt so groß sind.

Tabelle 6-5: Vergleich von Realversuch und Simulation für die Dummy-Messwerte

Kleinwagen gegen „New Jersey 81“ Anprallkonstellation 20°/110 km/h	Realversuch	Simulation
Head Injury Criterion = HIC 15 [-]	490,58	510,6
3-ms-Maximum der Kopfbeschleunigung [g]	79,1	67,9
3-ms-Maximum der Brustbeschleunigung [g]	35,3	74,6
3-ms-Maximum der Beckenbeschleunigung [g]	35,2	58,0

Die Innenraumkomponenten wie beispielweise die Türverkleidung, die Armaturentafel oder die Fahrzeugscheiben werden für die Simulation nicht am Verhalten der Innenraumstrukturen des Kleinwagens im Crashtest validiert, weshalb es zu Unterschieden zwischen Realität und Simulation kommt. Allerdings weisen die Zeitpunkte der Maximalwerte als auch der anderen Ausschläge nur minimalen Versatz auf, weshalb das gewählte Innenraumsimulationsmodell im Allgemeinen als geeignet angesehen wird.

Die differenzierte Analyse der Beschleunigungsverläufe für die Brust und das Becken in Versuch und numerischer Simulation, unterschieden nach den jeweiligen Achsenrichtungen, bestätigt, dass diese in Längs- (x-) und Vertikal- (z-) Richtung in der Simulation gut wiedergegeben werden. Die Unterschiede in den Beschleunigungsspitzen zwischen Versuch und Simulation ergeben sich hauptsächlich aus den stark voneinander abweichenden Beschleunigungen in Quer- (y-) Richtung, was auf die fehlende Validierung des Deformationsverhaltens der Türinnenverkleidung zurückzuführen ist.

Unterschiede in den Spitzen der Kopfbeschleunigung sind in erster Linie durch den Seitenscheibenanprall begründet, bei dem es sowohl im Versuch als auch in der Simulation zum Glasbruch kommt. Dieser Effekt auf die Kopfbeschleunigung lässt sich mit dem vorliegenden Modell aber nur ungenau abbilden.

Die nachfolgenden Diagramme zeigen beispielhafte Verläufe für resultierende Kopf-, Brust-, und Beckenbeschleunigungen des Fahrer-Dummys im Kleinwagen beim simulierten Betonschutzwandanprall mit 110 km/h unter einem Winkel von 20° (Simulationslauf Nr. 12a).

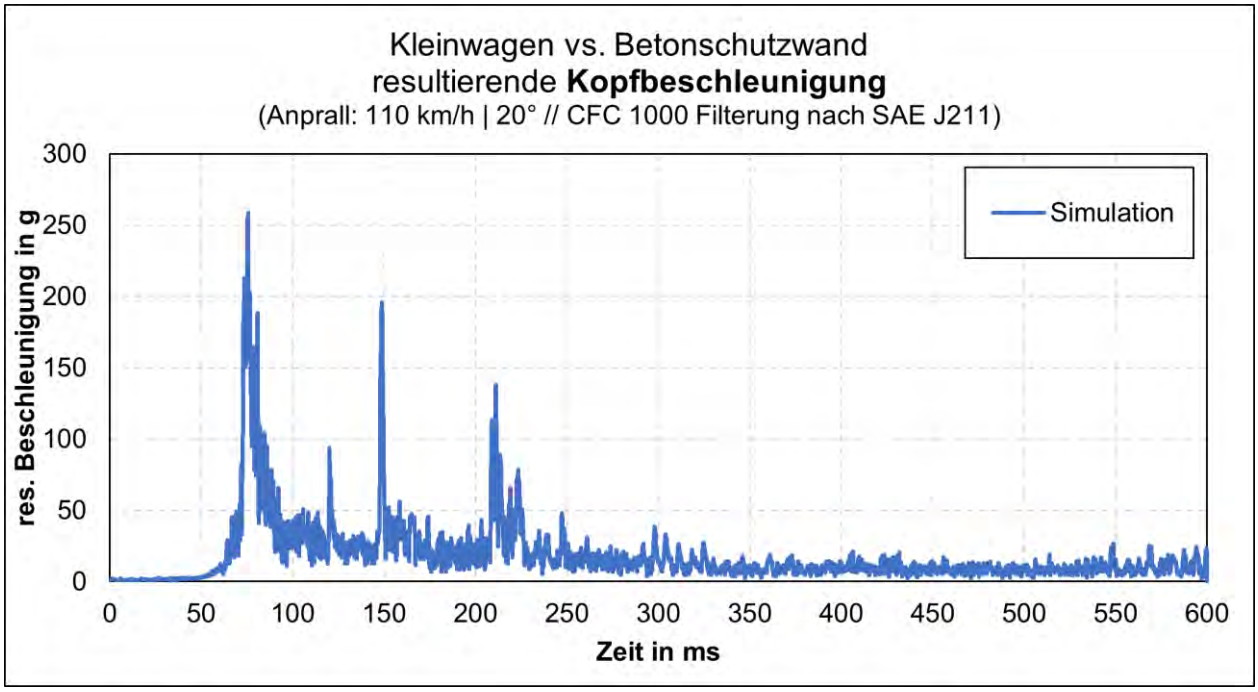


Abbildung 6-20: Verlauf der resultierenden Kopfbeschleunigung für den Simulationslauf Nr. 12a

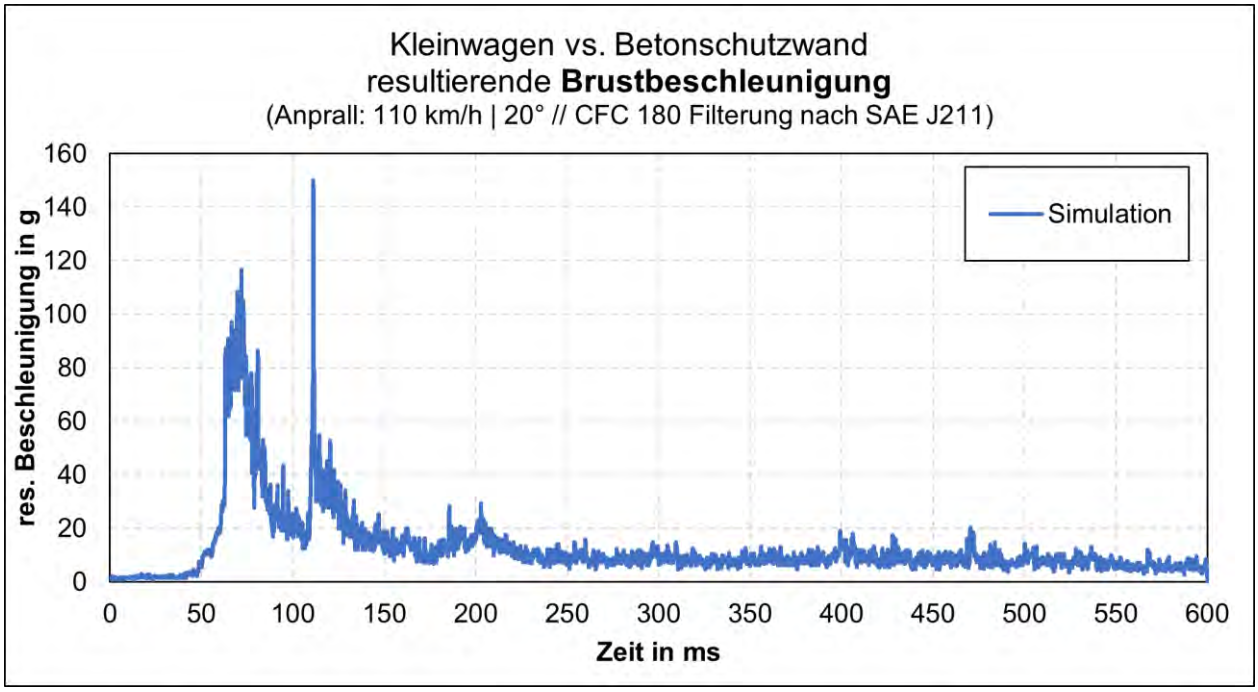


Abbildung 6-21: Verlauf der resultierenden Brustbeschleunigung für den Simulationslauf Nr. 12a

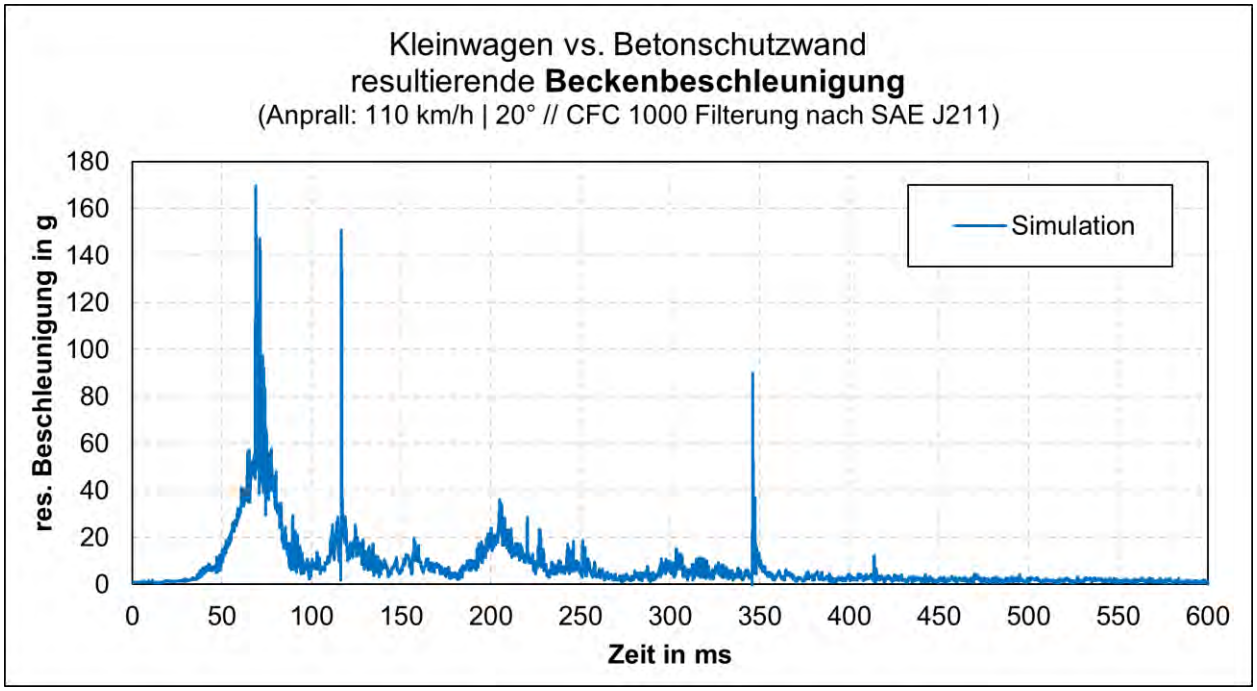


Abbildung 6-22: Verlauf der resultierenden Beckenbeschleunigung für den Simulationslauf Nr. 12a

Anhand der verfügbaren Animationen (bspw. Abbildung 6-23) lassen sich kinematische Abläufe zusätzlich optisch mit den Videos des Anprallversuches vergleichen (siehe Abbildung 5-29). In der numerischen Simulation des Realversuches 3 (20°/110 km/h) sind auch die drei Phasen des Crashtests (Anprallphase, Flugphase, Auslaufphase) erkennbar. Nach qualitativer Beurteilung steigt das Fahrzeug in der Simulation mehr auf und die Flugphase verlängert sich.

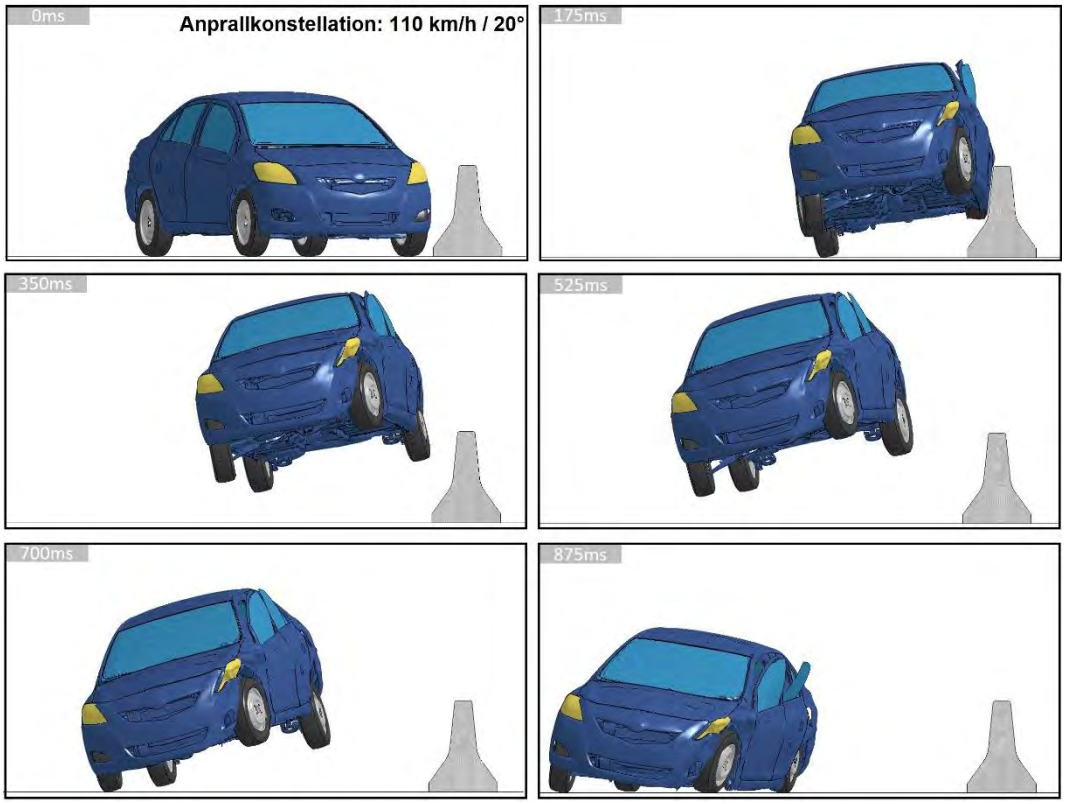


Abbildung 6-23: „Kleinwagen vs. New Jersey 81“ von 0 ms bis 875 ms nach dem Anprall (Simulationslauf Nr. 12)

Unabhängig von den Anprallkonstellationen wird für die simulierten Schutzwandanpralle keine Durchbiegung der Schutzwand festgestellt. Die Ergebnisse aller Simulationen sind in der Tabelle 6-6 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 6-6: Ergebnisse aus der numerischen Simulation zu Schutzwandanprallen

Nr.	Winkel / Geschwindigkeit	Fahrzeug	Schutzwand	ASI	THIV	Max. Kopf-Beschl. (3 ms)	HIC 15	Max. Brust-Beschl. (3 ms)	Max. Becken-Beschl. (3 ms)	Abprallgeschwindigkeit
	[°] / [km/h]			[-]	[km/h]	[g]	[-]	[g]	[g]	[km/h]
Realversuch 3	20 / 110	Kleinwagen	New Jersey 81	2,3	33	79	491	35	35	93
12 / 12a	20 / 110	Kleinwagen	New Jersey 81	2,3	36	68	511	75	58	95
13 / 13a	20 / 110	Kleinwagen	akt. Profil	2,3	35	75	508	73	55	95
14 / 14a	8 / 110	Kleinwagen	akt. Profil	0,7	15	36	79	20	9	104
15 / 15a	8 / 130	Kleinwagen	akt. Profil	0,9	17	45	134	17	13	122
16 / 16a	20 / 80	Kleinwagen	akt. Profil	1,4	25	57	323	29	26	66

Die Variation des Schutzwandprofils zeigt marginale Unterschiede in der Fahrzeug- (Abbildung 6-24) als auch in der Innenraumsimulation. Am ehesten ist ein Unterschied zwischen beiden Systemen im 3-ms-Maximum der Kopfbeschleunigung zu erkennen. Eine höhere Schutzwand verringert die Tendenz des Überfahrens bzw. des Durchbrechens durch Fahrzeuge mit hohem Schwerpunkt, bspw. von Güterkraftfahrzeugen oder SUVs.

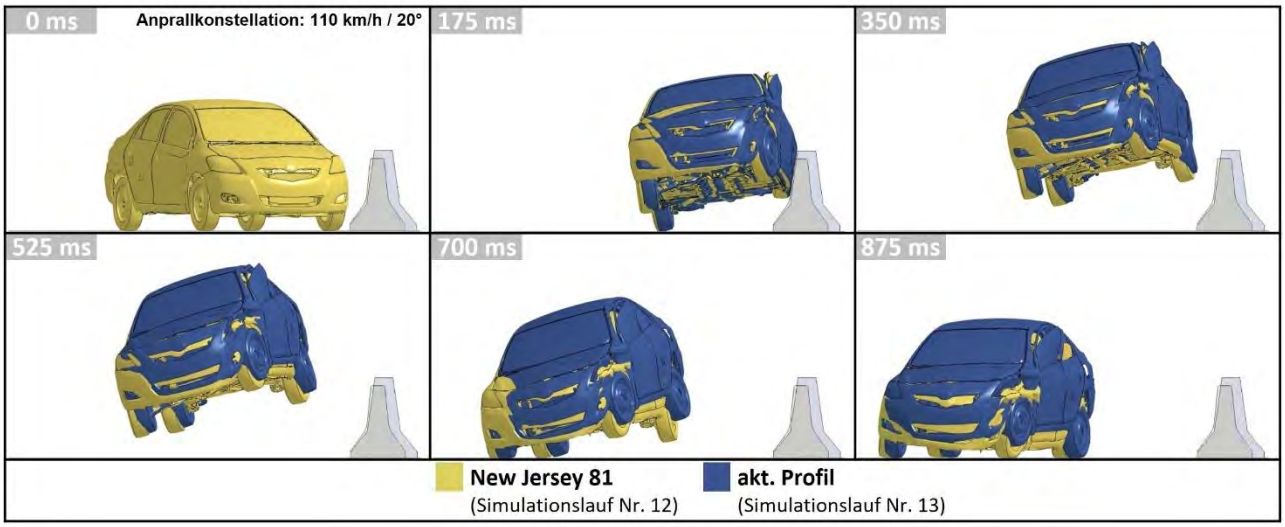


Abbildung 6-24: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Variation des Schutzwandprofils von 0 ms bis 875 ms nach dem Anprall (Simulationslauf Nr. 12 vs. Simulationslauf Nr. 13)

Die Verringerung des Anprallwinkels von 20° auf 8° hat einen um ein Drittel geringeren ASI-Wert zur Folge und die Anprallgeschwindigkeit des Kopfes (THIV) verringert sich um mehr als 50 %. Die maximale Belastung von Kopf, Thorax und Becken fallen deutlich niedriger aus.

Die Variation der Anprallwinkel lässt erkennen, dass beim Anprall mit niedrigerem Anprallwinkel – erst recht, wenn zudem noch eine höhere Anprallgeschwindigkeit vorliegt – ein erhöhtes Risiko für das Aufsteigen des Pkws an der Schutzwand und eine Schräglage beim Aufkommen auf der Fahrbahn besteht.

Bei niedrigerem Anprallwinkel wird weniger kinetische Energie in Form von Fahrzeugdeformation an der Schutzwand abgebaut. Dadurch reduzieren sich zwar die Insassenbelastungen, aber auch die Fahrzeugkinematik ändert sich beim Anprall und das Fahrzeug hat eine höhere Abprallgeschwindigkeit. Die Analyse der Simulationsaufzeichnungen zeigt (Abbildung 6-25), dass das Fahrzeug mit kleinerem Anprallwinkel eine stärkere Rollbewegung (Schräglage) in der Flugphase vollführt, wodurch die Tendenz zum Überschlag steigt, was wiederum Folgen für den Sekundäranprall auf der Fahrbahn haben kann.

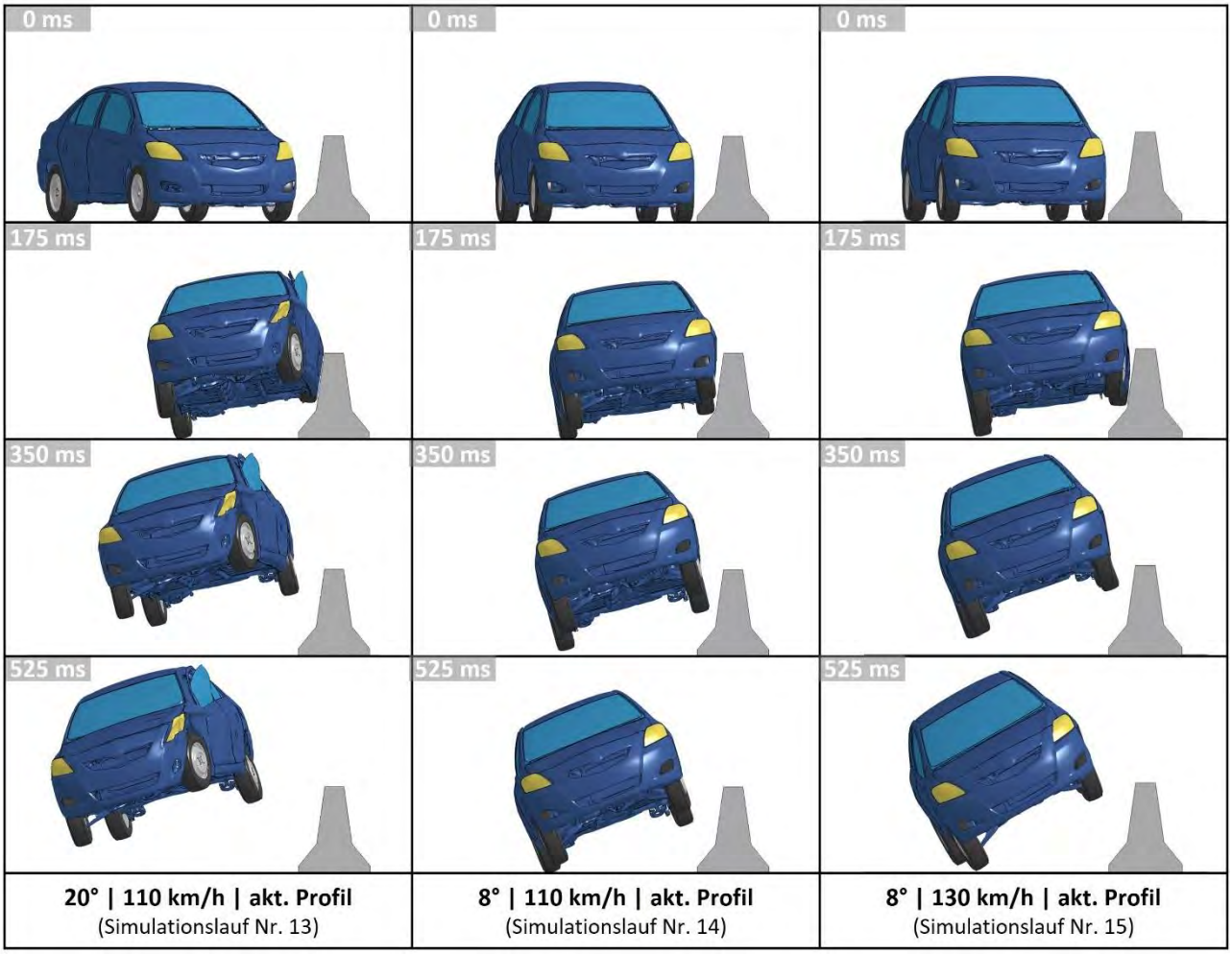


Abbildung 6-25: Vergleich der Fahrzeugkinematik für drei Anprallkonstellationen gegen die Schutzwand von 0 ms bis 525 ms nach dem Anprall

Schutzwandanpralle mit höherer Kollisionsgeschwindigkeit bei konstanten Anprallwinkeln bewirken höhere Belastungen auf den Insassen. Die Rollbewegung des Fahrzeuges in der Flugphase nimmt zu, wodurch die Tendenz zum Überschlag steigt.

Die Tabelle 6-7 fasst die Erkenntnisse aus den Variationen qualitativ zusammen.

Tabelle 6-7: Tendenz für Insassenbelastungen bei Variation von Schutzwandprofil, Anprallwinkel und -geschwindigkeit

Variation	Bedingung	ASI	THIV	Kopf	Becken	Thorax	Abprall-geschwindigkeit	Tendenz zum Überschlag
Veränderung des Schutzwandprofils	α + v_k konst. New Jersey 81 zu akt. Profil	→	→	↘	→	→	→	→
Verringerung des Anprallwinkels	α ↘ | v_k konst. akt. Profil	↘	↘	↘	↘	↘	↗	↗
Erhöhung der Kollisionsgeschwindigkeit	α konst. | v_k ↗ akt. Profil	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗

↗ schlechter/höher | → kein Unterschied | ↘ besser/niedriger

Folgende Erkenntnisse aus den Simulationen zum Schutzwandanprall können zusammengefasst werden:

- Im Vergleich zur Ausgangsgeschwindigkeit haben Fahrzeuge mit Schutzwandanprall nach Ende des Kontakts mit der Schutzeinrichtung noch eine hohe Abprallgeschwindigkeit.
- Die Anprallversuche mit altem und neuem Schutzwandprofil zeigen marginale Unterschiede in der Fahrzeugkinematik und den berechneten biomechanischen Belastungswerten.
- Beim Anprall mit niedrigerem Anprallwinkel besteht ein erhöhtes Risiko für das Aufsteigen an der Schutzwand und mehr Rollbewegung des Fahrzeuges (Schräglage) in der Flugphase, wodurch die Tendenz zum Überschlag steigt.
- Schutzwandanpralle mit höheren Kollisionsgeschwindigkeiten bei konstantem Anprallwinkel bewirken höhere biomechanische Belastungen auf den Insassen.
- In allen simulierten Konstellationen liegen die berechneten biomechanischen Belastungswerte für den Kopf innerhalb des Grenzwertes.
- Für die biomechanischen Belastungswerte von Becken und Brust kann es aufgrund der fehlenden Validierung von Innenraumkomponenten (bspw. Türverkleidung) zu deutlichen Abweichungen gegenüber den im Crashversuch ermittelten Werten kommen. Gerade in Szenarien mit „harter“ Anprallcharakteristik sollte daher neben der Geometrie auch das Deformationsverhalten dieser Innenraumstrukturen im Modell berücksichtigt werden.

6.4. Vergleich der Ergebnisse aus Realversuch und Simulation

Die Ergebnisse aus den Realversuchen und numerischen Simulationen zeigen eine gute Vergleichbarkeit. Neben den kinematisch sehr ähnlichen Bewegungsabläufen werden auch bei den Belastungswerten gute Übereinstimmungen erzielt.

Als zusammenfassende Erkenntnis kann formuliert werden, dass die im Projekt angewendeten Methoden und Modelle valide erscheinen, um Schutzplanken- und Schutzwandanpralle in unterschiedlichen Konstellationen zu simulieren. In den hier betrachteten Anprallkonstellationen lieferten in Realversuch und Simulation unter Verwendung von Dummys vergleichbare Ergebnisse, mit denen sich die Einhaltung biomechanischer Grenzwerte überprüfen ließ. Einschränkend muss erwähnt werden, dass die Simulation keine Modellierung der Airbags beinhaltete, deren Einfluss beim realen Anprall gegen die PSE-Systeme in der überprüften Konfiguration allerdings auch sehr gering war.

6.4.1. Anprall an Schutzplanke

Eine Übersicht der Ergebnisse der Schutzplankenanpralle und der Vorgaben des TB32 nach DIN EN 1317 aus der Veröffentlichung [46] ist in Tabelle 6-8 dargestellt.

Tabelle 6-8: Ergebnisse der Anprallversuche und Vergleich zur Simulation und DIN EN 1317

	Versuch 1	Simulation Nr. 2	Versuch 2	Simulation Nr. 6	Anforderungen TB32 [46] / Biomechanische Grenzwerte
Anprallwinkel α in °	20		20		20
Kollisionsgeschwindigkeit v_k in km/h	110		110		110
Fahrzeugmodell	Kleinwagen (1.100 kg)		SUV (2.100 kg)		Pkw (1.500 kg)
ASI [-]	0,73	**0,85**	0,54	**0,58**	**≤ 1,0 für A** ≤ 1,4 für B ≤ 1,9 für C
THIV in km/h	22,6	23,4	19,4	18,5	≤ 33
gemessener Wirkungsbereich W_m in m	0,98	0,86	1,57	1,43	≤ 0,6 für W1 ≤ 0,8 für W2 **≤ 1,0 für W3** ≤ 1,3 für W4 **≤ 1,7 für W5** ≤ 2,1 für W6 ≤ 2,5 für W7 ≤ 3,5 für W8
HIC 15 [-]	131	213	23	21	< 700 [36]
3-ms-Maximum der Kopfbeschleunigung in g	51,2	61,1	23,7	20,1	< 80 [36]
3-ms-Maximum der Brustbeschleunigung in g	20,8	16,7	9,3	13,8	< 60 [37]
3-ms-Maximum der Beckenbeschleunigung in g	11,7	12,4	8,3	16	< 60 [38]

Der Vergleich der Acceleration Severity Index-Werte aus den Simulationen mit denen aus den Versuchen zeigt eine leichte Abweichung beim Anprall des Kleinwagens (+16 %); diese liegen aber in beiden Fällen innerhalb der Anprallheftigkeitsstufe A. Der Abstand zur nächsthöheren Anprallheftigkeitsstufe beträgt 0,27 (27 %) in der Simulation und 0,15 (15 %) im Versuch. Beim SUV weicht der ASI in der Simulation um 0,04 (+7 %) ab und ist höher als im Versuch, jedoch mit deutlichem Abstand zur nächsthöheren Anprallheftigkeitsstufe. Der THIV zeigt in den Simulationen gegenüber den Versuchen ebenfalls nur sehr geringe Unterschiede von 0,8 km/h (+4 %) beim Kleinwagen und -0,9 km/h (-5 %) beim SUV. Sie liegen deutlich unterhalb der DIN-Anforderung von 33 km/h. Beim Vergleich der Wirkungsbereiche zwischen Realversuch und Simulation sind die Unterschiede hingegen deutlicher. Beim Kleinwagen liegt die Differenz im Vergleich zum Realversuch bei 0,12 m (+14 %) und beim SUV bei 0,14 m (+10 %). Dies hat im vorliegenden Fall für den Anprall mit beiden Fahrzeugen keine Auswirkung auf die Einordnung in die Wirkungsbereichsklasse. Die jeweiligen Unter- und Obergrenzen der verschiedenen Wirkungsbereichsklassen liegen gemäß DIN EN 1317 allerdings nur 0,2 m bis 0,4 m auseinander. Dadurch könnten die Abweichungen zwischen Versuch und Simulation bei ungünstiger Lage eine Veränderung der Einteilung bewirken.

Insgesamt zeigt die Simulation bezüglich der Kriterien nach DIN EN 1317 eine gute Übereinstimmung mit dem Realversuch.

Die ermittelten Werte der Insassenbelastungen liegen größtenteils deutlich unterhalb der biomechanischen Grenzwerte. Generell liegen die 3-ms-Maxima der Beschleunigungsverläufe aus Realversuch und Simulation sowohl hinsichtlich Betrag und als auch zeitlich (in Relation zum Erstkontakt mit der PSE) nah beieinander. Einzig die Abweichung des Wertes der Kopfbeschleunigung beim Anprall des Kleinwagens zeigt mit 51 g beim Realversuch gegenüber 61 g in der zugehörigen Simulation eine größere Differenz, liegen aber immer noch 36 % und 24 % unterhalb des biomechanischen Grenzwertes von 80 g. Bei Betrachtung der zeitlichen Verläufe der Beschleunigungssignale wird deutlich, dass die resultierende Beschleunigung durch den Anteil in Quer- (y-) Richtung dominiert wird, der vor allem aus dem Scheibenkontakt des Dummy-Kopfes resultiert. Dieser Scheibenkontakt fällt in der Simulation stärker aus als im Realversuch.

An keiner Stelle führen die Abweichungen zwischen den mittels Simulation und Versuch gewonnenen Ergebnissen in kritische Bereiche. Selbst die im unmittelbaren Vergleich erheblich erscheinenden Unterschiede zwischen den HIC15-Werten aus Versuch 1 (HIC = 131) und Simulation 2 (HIC = 213) sind akzeptabel angesichts des deutlichen Abstands zum HIC-Grenzwert von 700 und der allgemein empfindlichen Reaktion des HIC-Wertes auf Änderungen der Randbedingungen. Auch die vergleichende Analyse der Simulations- und Versuchsvideos lässt keine wesentlichen Unterschiede in den Bewegungsabläufen des Dummys erkennen, so dass auch für dieses Bewertungskriterium vergleichbare Ergebnisse konstatiert werden können. Die Methode der Simulation erscheint daher geeignet, Spitzenbelastungen auf die drei Hauptkörperregionen in der beschriebenen Form abzuschätzen.

6.4.2. Anprall an Schutzwand

Eine Übersicht der Ergebnisse des Schutzwandanpralls und der Vorgaben des TB32 in Anlehnung an DIN EN 1317 nach [46] ist in Tabelle 6-9 dargestellt.

Der Vergleich der Acceleration Severity Index-Werte aus der Simulation mit dem aus dem Versuch zeigt eine marginale Abweichung beim Anprall des Kleinwagens (-2 %). In beiden Fällen liegt der ASI oberhalb der Anprallheftigkeitsstufe C (>C). Anders als beim ASI liegt der THIV in der Simulation um +2,5 km/h (+8%) höher als im Realversuch und damit oberhalb der DIN-Anforderung von 33 km/h.

Aufgrund der Festlegung, nach welcher das Betonschutzwandsystem als vollfundamentiert betrachtet und die Verschiebung der Barrieren somit durch eine numerische Beschränkung verhindert wird, beträgt die normalisierte dynamische Durchbiegung im Realversuch und Simulation 0,0 m. Gleichzeitig ergibt sich der maximale Wirkungsbereich W2.

Der marginale Unterschied im HIC-Wert zwischen Versuch und Simulation fällt nicht ins Gewicht, da beide Werte einen akzeptablen Abstand zum HIC-Grenzwert von 700 haben. Die ermittelten Werte der übrigen Insassenbelastungen differieren zwischen Realversuch und numerischer Simulation erheblich, wenngleich die 3-ms-Maximalwerte für die Kopf- und die Beckenbeschleunigung noch innerhalb der biomechanischen Grenzwerte bleiben. In der Simulation fallen die 3-ms-Maximalwerte für Brust und Becken deutlich höher aus, als im Realversuch ermittelt. Für den in der Simulation errechneten 3-ms-Maximalwert der Brustbeschleunigung kommt es sogar zur Überschreitung des biomechanischen Grenzwertes.

Der vergleichsweise harte Anprall gegen die Schutzwand macht die Notwendigkeit deutlich, für solche Szenarien auch die einem starken Kontakt ausgesetzten Innenraumstrukturen hinsichtlich ihrer Verformungseigenschaften genauer zu modellieren.

Zusammenfassend scheint die gewählte Methode der Simulation auch unter den Bedingungen eines Schutzwandanpralls prinzipiell geeignet, um die wesentlichen kinematischen Abläufe und physischen Belastungen wiederzugeben und für Variation der Eingangsparameter Trendaussagen treffen zu können.

Tabelle 6-9: Ergebnisse des Schutzwandanpralles und Vergleich zur Simulation und DIN EN 1317

	Versuch 3	Simulation Nr. 12	Anforderungen TB32 [46] / Biomechanische Grenzwerte
Anprallwinkel α in °	20		20
Kollisionsgeschwindigkeit v_k in km/h	110		110
Fahrzeugmodell	Kleinwagen (1.100 kg)		Pkw (1.500 kg)
ASI [-]	2,34 (>C)	2,29 (>C)	≤ 1,0 für A ≤ 1,4 für B ≤ 1,9 für C
THIV in km/h	32,97	35,5	≤ 33
gemessener Wirkungsbereich W_m in m	0,7	0,7	≤ 0,6 für W1 **≤ 0,8 für W2** ≤ 1,0 für W3 ≤ 1,3 für W4 ≤ 1,7 für W5 ≤ 2,1 für W6 ≤ 2,5 für W7 ≤ 3,5 für W8
HIC 15 [-]	491	511	< 700 [36]
3-ms-Maximum der Kopfbeschleunigung in g	79,1	67,9	< 80 [36]
3-ms-Maximum der Brustbeschleunigung in g	35,3	74,6	< 60 [37]
3-ms-Maximum der Beckenbeschleunigung in g	35,2	58,0	< 60 [38]

7. Fazit und Ableitung von Empfehlungen

7.1. Abdeckung des Unfallgeschehens

Die Ergebnisse der Unfalldatenanalyse belegen, dass die Anprallprüfungen nach DIN EN 1317 die Konstellationen im Unfallgeschehen mit der größten Häufigkeit und mit der größten Insassengefährdung im Bereich hoher Kollisionsgeschwindigkeit und großer Kollisionswinkel gut repräsentieren. Aufgrund bekannter Unfallmechanismen kann angenommen werden, dass diese im Allgemeinen zu einer höheren Insassenbelastung führen als geringe Kollisionsgeschwindigkeiten und kleine Winkel. Es ist daher davon auszugehen, dass die vorgeschriebenen Anprallprüfungen das aktuelle Unfallgeschehen mit erhöhter Insassengefährdung hinsichtlich der Parameter Anprallgeschwindigkeit und Anprallwinkel gut abdecken.

Die Werte der Insassenbelastung erweisen sich für die überprüften Szenarien sowohl in Simulation als auch bei den realen Anprallversuchen mit modernen Fahrzeugen auch bei großem Energieeintrag als weitgehend unkritisch. PSE leisten damit einen positiven Beitrag zur Sicherheit an Straßen, insbesondere für Pkw und deren Insassen.

7.2. Einsatz von Simulationsmethoden

Die Ergebnisse der Simulationen haben gezeigt, dass es möglich ist, die Schutzwirkung von PSE und die beim Anprall entstehenden Insassenbelastungen mithilfe numerischer Simulation abzuschätzen. Die bislang in der Zertifizierung angewendeten Kenngrößen zur Abbildung der Insassenbelastung (THIV, ASI) zeigen allenfalls einen mäßig starken Zusammenhang mit einigen biomechanischen Belastungskriterien wie der Brustbeschleunigung (siehe 6.3). Ob und in welchem Maße die in Anprallprüfungen verwendeten Kenngrößen geeignet sind, Aussagen zu Insassenbelastungen zu treffen und wo dafür die Grenzen liegen, sollte zukünftig genauer untersucht werden.

Der Einsatz numerischer Simulation in Kombination mit realen Anprallversuchen an geeigneten Stützstellen für die Zulassung einer PSE würde es erlauben, ein breiteres Spektrum an Anprallszenarien abzuprüfen als aktuell in der DIN festgelegt, ohne dafür weitere kostenintensive Anprallversuche durchführen zu müssen. Der zusätzliche Einsatz simulativer Prüfungen nach dem Vorbild der Anprallprüfungen im Euro NCAP-Protokoll zum Fußgängerschutz [45] ist hierbei denkbar. So ließe sich Bedenken hinsichtlich einer Punktoptimierung eines Systems auf die DIN-Anprallprüfungen wirksam begegnen. Darüber hinaus wäre es damit möglich, flexibler auf Herausforderungen einer sich verändernden Fahrzeugflotte zu reagieren.

7.3. Fahrzeugspezifikation und Auswirkung auf die Insassenbelastung

Für die Fahrzeugspezifikation schreibt die aktuelle Norm für alle Anprallprüfungen als zentralen Parameter die Fahrzeugmasse innerhalb geringer Toleranzen vor (für Pkw 900 kg und 1.500 kg; 1.300 kg nur für PSE in Arbeitsbereichen). Insbesondere Fahrzeuge mit einer Fahrzeugmasse von etwa 900 kg werden mittlerweile kaum noch angeboten, was sich auch im Unfallgeschehen zeigt. Bei realen Anprallprüfungen zur Zulassung von PSE muss daher regelmäßig mit sehr alten Fahrzeugen getestet werden. Aus Kostengründen werden für Fahrzeuge mit einer vorgeschriebenen Fahrzeugmasse von 1.500 kg ebenfalls oft ältere Modelle eingesetzt. Damit repräsentieren die verwendeten Fahrzeuge häufig nicht die aktuelle Fahrzeugflotte mit ihren leistungsfähigen Insassenschutzsystemen. Die Analysen der Neuzulassungen haben darüber hinaus gezeigt, dass es eine

Entwicklung hin zu größeren und schwereren Pkw gibt, welche aktuell durch keine Anprallprüfung abgedeckt wird.

Mit den fortschrittlichen Insassenschutzsystemen, wie Gurte und Airbags, sowie ihrer widerstandsfähigeren Crashstruktur haben moderne Fahrzeuge zusätzliches Potential, die Insassenbelastung auch bei schwereren Anprallen auf ein erträgliches Maß zu reduzieren und das Verletzungsrisiko zu minimieren. Der Vergleich der Untersuchungsergebnisse der Simulation und der Anprallversuche für die geprüften Fahrzeuge beim Schutzplankenanprall mit den biomechanischen Grenzwerten für Kopf, Brust und Becken stützt diese Annahme. Die alleinige Messung der Beschleunigungen am Fahrzeugschwerpunkt und die Berechnung des Acceleration Severity Index (ASI) spiegelt den Effekt moderner Insassenschutzsysteme auf die resultierende Insassenbelastung nicht wider.

Allerdings war in den realen Anprallversuchen festzustellen, dass auch bei modernen Pkw vorhandene Schutzsysteme wie Kopf-Seitenairbags selbst beim Anprall gegen eine Schutzwand nicht immer auslösen, so dass es zu vermeidbaren Kontakten mit der Innenraumstruktur kommt. Auslösealgorithmen sollten daher zukünftig besser auf solche Anprallszenarien ausgelegt werden.

Die H-Aufhaltestufen für höheres und sehr hohes Rückhaltevermögen fordern die Abnahmeprüfung TB11 (Pkw, m = 900 kg) und – für H4b – TB81 (Sattelzug, m = 38.000 kg), aber nicht TB32 (Pkw, m = 1.500 kg). Dadurch finden die aktuelle Fahrzeugflotte und die oben beschriebenen Aspekte kaum Berücksichtigung. Die neuere Entwicklung und Anforderungen an L-Aufhaltestufen, welche eine zusätzliche TB32 Abnahmeprüfung beinhalten, ist daher ein sinnvoller Weg, um dem besser begegnen zu können.

7.4. Fahrzeugspezifikation und Auswirkung auf den geprüften Wirkungsbereich

Pkw oberhalb des 90. Perzentils der im Unfallgeschehen beobachteten Fahrzeugmassen (Massegruppe IV) sind nicht in den Anprallprüfungen nach DIN EN 1317 repräsentiert. Diese Gruppe zeigt im ausgewerteten Unfallmaterial zwar keine erhöhten Insassengefährdung, führt allerdings aufgrund des größeren Energieeintrages in die PSE zu größeren Wirkungsbereichen als der TB32 Anprallversuch mit 1.500 kg. Die Betrachtung der Entwicklung der durchschnittlichen Pkw-Leermasse von Neuwagen lässt darüber hinaus erwarten, dass sich das zukünftige Unfallgeschehen weiter in diese Richtung verschieben wird.

Dadurch entstehen größere Deformationen und damit Wirkungsbereiche als in den vorgeschriebenen Anprallprüfungen getestet. Der Vergleich des beim Anprallversuch mit dem SUV (m = 2.100 kg) ermittelten Wirkungsbereichs von 1,57 m mit den Zulassungswerten für eine Fahrzeugmasse von 1.500 kg (Abbildung 7-1) zeigt eine Überschreitung um fast 60 cm.

Aufhaltestufe	N2
Anprallheftigkeitsstufe	A
Wirkungsbereichsklasse	W3
Normalisierter Wirkungsbereich W_N	1,0 m
Normalisierte dynamische Durchbiegung D_N	0,9 m
Klasse der Fahrzeugeindringung	-
Normalisierte Fahrzeugeindringung VI_N	-
Mindestlänge	48 m
Beständigkeit Schneeräumung	Klasse 3
Zusätzliche Prüfanforderung	geprüft auf einem 1-Meter breiten Bankett mit steil abfallender Böschung (1:1,5) hinter dem Bankett

Abbildung 7-1: Leistungsvermögen einer ESP [39]

Dies ist kritisch zu beurteilen, wenn in bestimmten Einsatzsituationen dadurch kein ausreichender Abstand zu Objekten im Seitenraum mehr gewährleistet werden kann und ein „Durchschlagen“ gegen starre Strukturen wie Bäume oder Widerlager zu befürchten ist. Außerdem wäre die reduzierte Wahrscheinlichkeit des Durchschlagens abzuwägen gegen tendenziell höhere Fahrzeugverzögerungen – und damit auch prinzipiell höhere Insassenbelastungen – bei minder schweren Kollisionen gegen eine solche steifere Schutzplanke. Ein derartiger Trend lässt sich im Unfallgeschehen bislang noch nicht nachweisen. Das liegt unter anderem daran, dass der im Unfallgeschehen betroffene Teil der Fahrzeugflotte derzeit noch durch kleinere und leichte Modelle als bei den Neuzulassungen geprägt ist.

Insgesamt zeigt sich, dass die für die Anprallprüfungen einzusetzenden Fahrzeuge in der DIN nur wenig spezifiziert sind und sich teilweise an veralteten Modellen orientieren. Aktuell können Hersteller von PSE für die Zulassung ihrer Systeme völlig unterschiedliche Fahrzeuge verwenden; die Modellauswahl kann auf Grundlage individueller Kriterien und Vorlieben erfolgen. Darunter leiden die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Testergebnisse.

Die Versuche und Simulationen haben gezeigt, dass neuere Fahrzeuge ein hohes Sicherheitsniveau für den Schutz ihrer Insassen aufweisen und höhere Anprallkräfte und –beschleunigungen verkraften als die in Abnahmetests verwendeten Fahrzeugmodelle. Gerade bei größeren Fahrzeugen liegen die Werte der Insassenbelastung auf einem sehr niedrigen Niveau. Dies eröffnet Möglichkeiten, steifere Schutzplanken an Standorten einzusetzen, wo eine geringe Durchbiegung der Schutzeinrichtung wünschenswert wäre, um das „Durchschlagen“ gegen ein Objekt (bspw. Masten, Bäume) unmittelbar hinter der Schutzplanke zu verhindern.

Durch die Einführung von Prüfungen mit größeren Fahrzeugen, wie sie bereits in anderen Prüfvorschriften enthalten sind (zum Beispiel in der amerikanischen MASH mit 2270 ± 50 kg [40]), könnte der Entwicklung der Fahrzeugflotte im Unfallgeschehen besser Rechnung getragen und einer möglichen Unterbewertung des Wirkungsbereichs begegnet werden.

7.5. Pkw mit Schutzwandanprall

Die Untersuchung von Unfällen gegen Schutzwände mit seitlich abgeschrägtem Profil hat Hinweise geliefert, dass beim Anprall insbesondere von kleinen und leichten Fahrzeugen (bspw. Kleinwagen, Mittel-/Kompaktklassefahrzeug) mit kleinem Anprallwinkel und höherer Anprallgeschwindigkeit ein erhöhtes Risiko besteht, dass der Pkw an der Schutzwand aufsteigt und in Schräglage wieder auf der Fahrbahn aufkommt, mit einer erhöhten Überschlagsgefahr in der Folge.

Aus den allgemeinen GIDAS Unfalldaten geht hervor, dass Unfälle mit Überschlag ein erhöhtes Verletzungsrisiko aufweisen, auch für Anpralle gegen Schutzwände. Die Unfallanalysen zeigen ebenfalls, wenngleich aufgrund geringer Verbauraten auf kleinen Unfallzahlen basierend, die Tendenz, dass Kollisionen gegen Betonschutzwände häufiger von einem Fahrzeugüberschlag begleitet sind als Anpralle gegen Schutzplankensysteme.

Entsprechend der DIN EN 1317 darf eine PSE in der Anprallprüfung eine bestimmte Anprallheftigkeit als Maß für die Insassenbelastung nicht überschreiten. Als Indexwerte werden ASI (Index für die Höhe der Fahrzeugbeschleunigung) und THIV (Theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfes) gemessen und berechnet. Das Konzept des THIV geht davon aus, „dass sich das Fahrzeug während des Anpralls nur in der horizontalen Ebene bewegt“ [1]. Im Falle eines Überschlags ist die PSE „mithilfe einer Sichtprüfung oder photographischen Aufzeichnungen zurückzuweisen“. Eine Anprallbelastung in vertikaler Richtung wird demzufolge nicht berücksichtigt, solange es nicht zum Überschlag kommt. Der ASI wird als Funktion der Zeit entsprechend Formel 2.1 berechnet. Dabei wird die vertikale Beschleunigung zwar einbezogen, allerdings aufgrund der Messdauer und der

Beschleunigungsmaxima in horizontaler Richtung in der Regel nur beim Primäranprall und nicht beim Wiederauftreffen auf dem Boden.

Es liegt die Vermutung nahe, dass die Gefährdung der Insassen bei PSE-Systemen, bei denen es anprallbedingt zu einer Flugphase und einem erhöhten Überschlagsrisiko oder zumindest einem harten Auftreffen auf die Fahrbahn kommt, in der Bewertung entsprechend der DIN EN 1317 nicht ausreichend berücksichtigt wird.

7.6. Vergleich zwischen Schutzplanken- und Schutzwandanprall

Ein direkter Vergleich der untersuchten Schutzplanke und Schutzwand hinsichtlich der Sicherheit von Pkw-Insassen kann nicht vorgenommen werden, da bei den Versuchen und Simulationen Systeme mit unterschiedlichen Aufhaltestufen (Schutzplanke: EcoSafe 2.0 mit normalen Rückhaltevermögen [N2]; Schutzwand: New Jersey 81 und aktuelles Profil mit höherem Rückhaltevermögen [H2]) zum Einsatz kamen.

Bei gleichen Anprallbedingungen hat der Anprall gegen die getestete Schutzwand (New Jersey 81) eine stärkere Fahrzeugdeformation, höhere ASI- und THIV-Werte, höhere biomechanische Belastungen und eine höhere Restgeschwindigkeit (Abprallgeschwindigkeit) am Ende des Kontakts mit der PSE zur Folge als der Anprall gegen die getestete Schutzplanke (EcoSafe 2.0). Wie sich diese Werte beim Anprall gegen einen Schutzplanke mit vergleichbar hoher Aufhaltestufe wie eine Schutzwand (z.B. Superrail) darstellen würden, lässt sich im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts in Ermangelung entsprechender Versuche und Simulationsmodelle nicht beantworten.

Für die getesteten PSE-Systeme bewirkt die Deformation der Schutzplanke eine stärkere Reduktion der kinetischen Fahrzeugenergie, wodurch die Abprallgeschwindigkeit deutlich niedriger ausfällt als beim Anprall gegen die Schutzwand. Dessen ungeachtet empfiehlt sich für beide Anprallszenarien ein automatisches Abbremsen des Fahrzeuges nach PSE-Anprall durch ein fahrzeugseitiges Sicherheitssystem (bspw. Multikollisionsbremse), um die Wahrscheinlichkeit und Schwere von Folgekollisionen, auch mit anderen Verkehrsteilnehmern, zu reduzieren.

7.7. Sonderfälle

Sonderfälle sind mit einem Anteil von 9,2 % im Unfallmaterial stärker vertreten als anfänglich vermutet. Bedingt durch die hohen Verbauraten sind sie fast ausschließlich für Schutzplanken dokumentiert. Sonderfälle gehen häufig mit höheren Verletzungsschweren einher (insbesondere das Auffahren auf eine PSE durch Pkw, das Durchbrechen von Lkw und das Unterfahren durch Krafträder), werden aber aktuell nicht durch die Anprallversuche nach DIN EN 1317 adressiert. Einzelfalluntersuchungen zeigen, dass die vorgeschriebene Einbauhöhe von PSE nicht durchgängig eingehalten wird oder sich im Laufe der Zeit durch verschiedene Einflüsse effektiv verringert. Die Entwicklung hin zu größeren Fahrzeugen bei den Neuzulassungen lässt eine wachsende Relevanz dieses Problems im zukünftigen Unfallgeschehen befürchten. Mithilfe von Simulationen und realen Anprallversuchen könnten diese Fragestellungen über die bisher geprüften Anforderungen hinaus untersucht werden. Durch Einhaltung der geforderten Einbauhöhe, gegebenenfalls Verstärkungen für höhere Durchbruchsicherheit und ergänzende Infrastrukturmaßnahmen, beispielsweise einen Unterfahrschutz zur Verringerung des Verletzungsrisikos von Motorradfahrern, kann die Gefährdung von Fahrzeugnutzern beim Anprall an Schutzplanken weiter reduziert werden.

7.8. Weitere Gesichtspunkte zu PSE-Anprallen

Darüber hinaus sind im Zusammenhang mit PSE-Kollisionen aus Sicht der Unfallforschung weitere Aspekte eine Betrachtung wert, die jedoch im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht berücksichtigt werden können. Dazu gehören:

- Sonderfall „Durchbrechen von Lkw“

  Diese Sonderfälle gehen mit besonders schweren Unfallfolgen einher (26 % mit MAIS3+ eines Unfallbeteiligten). Sie haben unter allen Lkw-PSE-Anprallen in der GIDAS Datenbank einen Anteil von 20 %.

- Sonderfall „Unterfahren von Krafträdern“

  14 % der Kraftrad-PSE-Anpralle gehen mit einem „Unterfahren“ und sehr schweren Verletzungen einher.

Literaturverzeichnis

[1] DIN EN 1317-1:2011-01, „Rückhaltesysteme an Straßen – Teil 1: Terminologie und allgemeine Kriterien für Prüfverfahren“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2011.

[2] DIN EN 1317-2:2011-01, „Rückhaltesysteme an Straßen – Teil 2: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Schutzeinrichtungen und Fahrzeugbrüstungen“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2011.

[3] DIN EN 1317-3:2011-01, „Rückhaltesysteme an Straßen – Teil 3: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Anpralldämpfer“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2011.

[4] DIN EN 1317-4:2012-07, „Rückhaltesysteme an Straßen – Teil 4: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Anfangs-, End- und Übergangskonstruktionen von Schutzeinrichtungen“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2012.

[5] DIN EN 1317-5:2012-06, „Rückhaltesysteme an Straßen – Teil 5: Anforderungen an die Produkte, Konformitätsverfahren und -bescheinigung für Fahrzeugrückhaltesysteme“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2012.

[6] DIN EN 1317-6:2012-06, „Rückhaltesysteme an Straßen – Teil 6: Fußgängerrückhaltesysteme - Brückengeländer (Entwurf, Technische Regel)“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2012.

[7] DIN EN 1317-7:2012-07, „Rückhaltesysteme an Straßen – Teil 7: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Anfangs- und Endkonstruktionen von Schutzeinrichtungen“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2012.

[8] DIN CEN/TS 1317-8:2012-08, „Rückhaltesysteme an Straßen - Teil 8: Rückhaltesysteme für Motorräder, die die Anprallheftigkeit an Schutzplanken für Motorradfahrer reduzieren“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2012.

[9] RPS, „Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme“, FGSV Verlag, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Verkehrsmanagement", Köln, 2009.

[10] BASt - EE-FRS, „Einsatzempfehlungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme“, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, 2017.

[11] ZTV FRS, „Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Fahrzeug-Rückhaltesysteme“, FGSV Verlag, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2013/Fassung 2017.

[12] ZTV-PS, „Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für passive Schutzeinrichtungen“, FGSV Verlag, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 1998.

[13] BASt - TK-FRS, „Technische Kriterien für den Einsatz von Fahrzeugrückhaltesystemen in Deutschland“, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, 2019.

[14] BASt - TÜL-FRS, „Technische Übersichtsliste für Fahrzeug-Rückhaltesysteme in Deutschland“, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, 2020.

[15] TL-SP 99, „Technische Lieferbedingungen für Stahlschutzplanken“, FGSV Verlag, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 1999.

[16] TLP ÜK 2017, „Technische Liefer- und Prüfbedingungen für Übergangskonstruktionen zur Verbindung von Schutzeinrichtungen“, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, 2017.

[17] TL-SPU 93, „Technische Lieferbedingungen für Schutzplankenpfostenummantelungen“, FGSV Verlag, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 1993.

[18] TL BSWF 96, „Technische Lieferbedingungen für Betonschutzwand-Fertigteile“, FGSV Verlag, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 1996

[19] RAL-RG 620, „Kompatible Stahlschutzplankensysteme - Gütesicherung“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008.

[20] M RepS, „Merkblatt für Reparaturen von Stahlschutzplanken im Bestand“, FGSV Verlag, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2017.

[21] DIN CEN/TR 16303-1, „Rückhaltesysteme an Straßen – Richtlinien für Computersimulationen von Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesysteme – Teil 1: Allgemeine Informationen und Dokumentation; Deutsche Fassung CEN/TR 16303-1:2012“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.

[22] DIN CEN/TR 16303-2, „Rückhaltesysteme an Straßen – Richtlinien für Computersimulationen von Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesysteme – Teil 2: Fahrzeugmodellierung und Überprüfung; Deutsche Fassung CEN/TR 16303-1:2012,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.

[23] DIN CEN/TR 16303-3, „Rückhaltesysteme an Straßen – Richtlinien für Computersimulationen von Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesysteme – Teil 3: Modellierung des Prüfgegenstands und Überprüfung; Deutsche Fassung CEN/TR 16303-3:2012“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.

[24] DIN CEN/TR 16303-4, „Rückhaltesysteme an Straßen – Richtlinien für Computersimulationen von Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesysteme – Teil 4: Validierungsverfahren; Deutsche Fassung CEN/TR 16303-4:2012“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.

[25] DIN EN 16303, „Rückhaltesysteme an Straßen – Validierungs- und Nachweisverfahren für die Nutzung von Computersimulationen bei Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesysteme“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.

[26] Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.), „ARS 15/17:2017-08-23: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 15/2017“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2017.

[27] I. Jungfeld, „Fahrzeugrückhaltesysteme - CE-Kennzeichnung und Einsatzfreigabe“, *Symposium „CE-Kennzeichnung in der Straßenausstattung“,* 2011.

[28] R. Maier, R. Berger, M. Schimpf und C. Lippold, „Entwicklung von Handlungsempfehlungen zur Anwendung der RPS 2009 (FE 03.0463/2010/CGB)“, Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Dresden, 2013.

[29] L. Meisel und J. Kübler, „Neue Regelungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme - Bedeutung von Übergangskonstruktionen“, Bergisch Gladbach, 2018.

[30] Statistisches Bundesamt (Destatis), „Fachserie 8 Reihe 7, Verkehr, Verkehrsunfälle, 2016“, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2017.

[31] E. Tomasch, W. Sinz, H. Hoschopf, M. Gobald, H. Steffan, B. Nadler, F. Nadler, B. Strnad und F. Schneider, „Required length of guardrails before hazards“, *Accident Analysis and Prevention,* Nr. 43 (2011) 2112– 2120, 2011.

[32] ISO 26262, „Road vehicles — Functional safety“, Geneva, Switzerland, 2011.

[33] ’Brien, „Measurement and Assessment of Passenger Vehicle Compatibility in Front and Side Collisions“, RMIT University, Faculty of Engineering, Melbourne, 2010.

[34] A. Malczyk, T. Gehlert und G. Müller, „SUV und ihre Fahrer in Deutschland – Big, Bad and Dangerous?“; 8. VDI-Tagung „Fahrzeugsicherheit – Fokus Elektromobilität“, VDI Verlag, Berlin, 2011.

[35] P. Mohan, C.-K. Park, D. Marzougui und C.-D. Kan, „LSTC/NCAC Dummy Model Development“, 2010.

[36] Euro NCAP, „Adult Occupant Protection Protocol (v 8.0.3)”, 2018.

[37] NHTSA, „Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems – II", 1999.

[38] F. Kramer, „Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen, 4. Auflage“, Vieweg Verlag, Braunschweig, 2013.

[39] Studiengesellschaft Stahlschutzplanken e.V., „Einbauanleitung Schutzeinrichtung Eco-Safe 2.0“, Gütegemeinschaft-Stahlschutzplanken, Siegen, 2019.

[40] AASHTO, „Manual for Assessing Safety Hardware (MASH)“, Washington, D.C., USA, 2016.

[41] B. Schreck-von-Below, „Straßenbepflanzung und Verkehrssicherheit - Ermittlung unfallbeeinflussender Merkmale auf Basis empirischer Modelle unter besonderer Berücksichtigung der Bepflanzung im Seitenraum an Landstraßen“, Bundesanstalt für Straßenwesen: Heft V 349 (ISBN 978-3-95606-617-7), Bergisch Gladbach, Oktober 2021.

[42] „Abbreviated Injury Scale (AIS) 2005 – Update 2008“, Association for the Advancement of Automotive Medicine, Barrington, IL, USA, 2011.

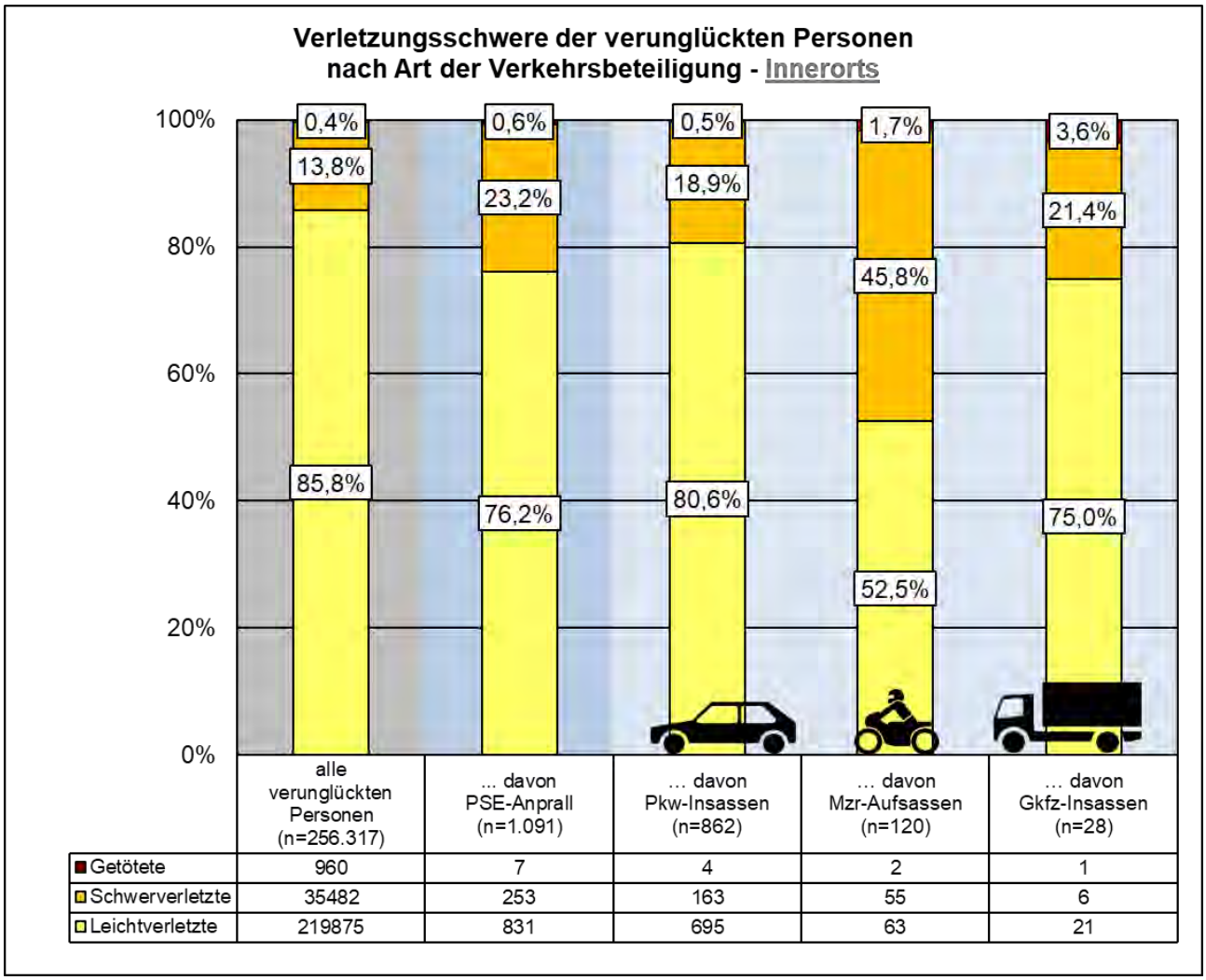
[43] SAE international, „SAE J211: Instrumentation for Impact Test, Part 1, Electronic Instrumentation“, Warrendale, PA, USA, 1995.

[44] SAE international, „SAE J224 (Revision March 1980): COLLISION DEFORMATION CLASSIFICATION (CDC)“, Warrendale, PA, USA, 1980.

[45] Euro NCAP, „Assessment Protocol - Vulnerable Road User Protection (v.10.0.5)”, 2021.

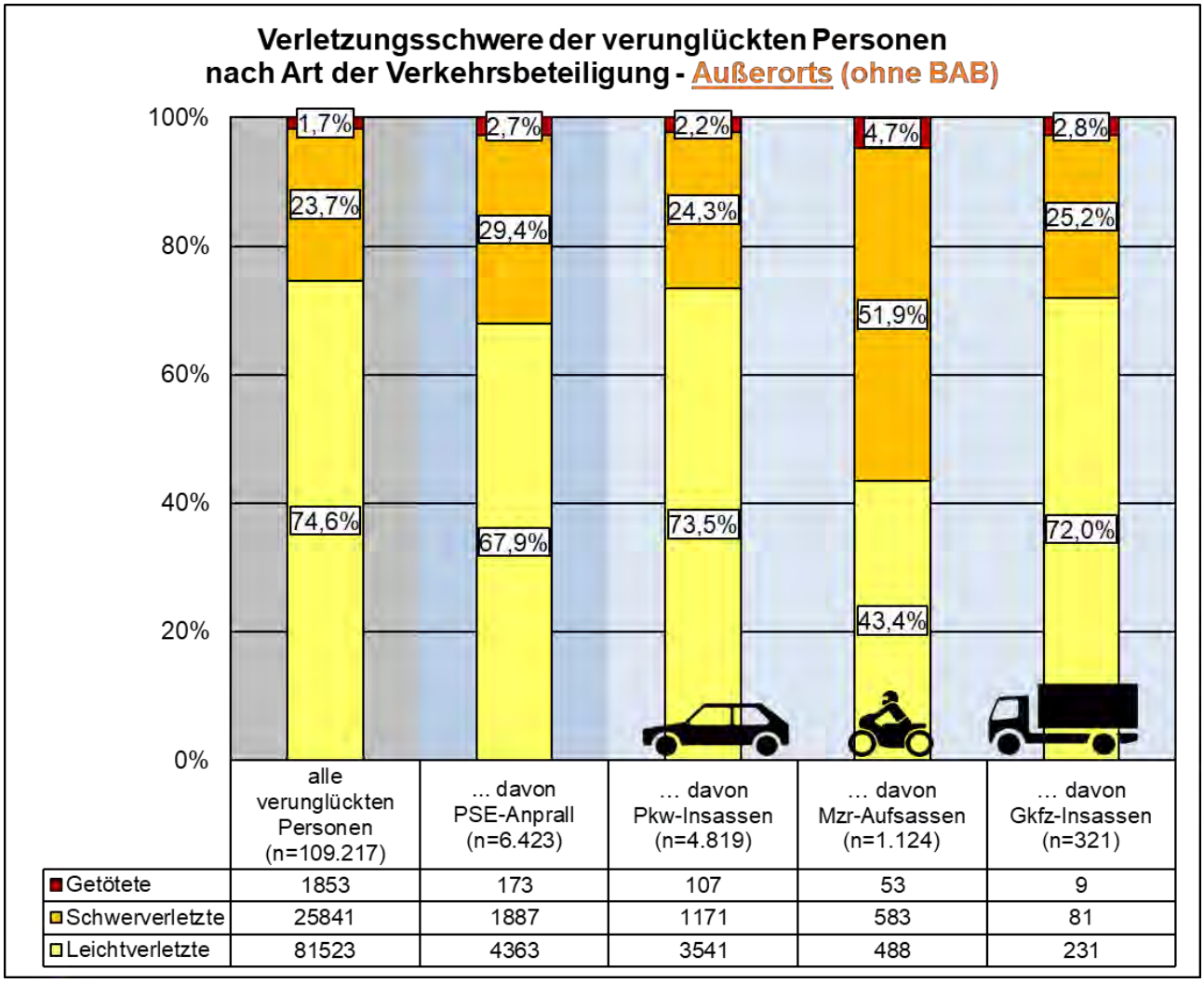
[46] L. Meisel et al., „Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen und Entwicklung von Nachrüstlösungen“, Bundesanstalt für Straßenwesen, Forschungsprojekt: F1100.640800, Bergisch Gladbach, 05/2020, ISBN 978-3-95606-507-1.

Anhang A – Verletzungsschwere nach Art der Verkehrsbeteiligung



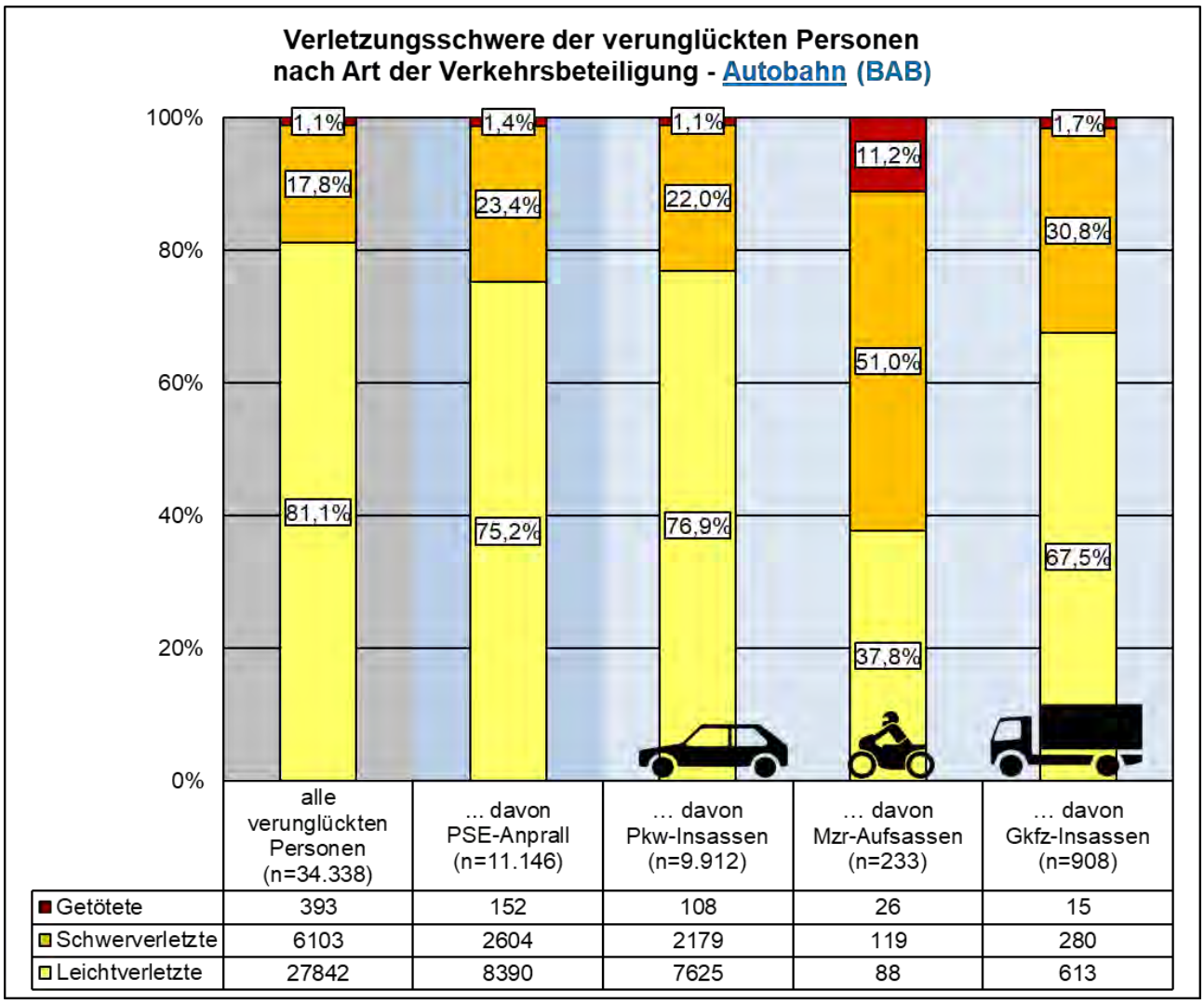
	alle verunglückten Personen (n=256.317)	... davon PSE-Anprall (n=1.091)	... davon Pkw-Insassen (n=862)	... davon Mzr-Aufsassen (n=120)	... davon Gkfz-Insassen (n=28)
Getötete	960	7	4	2	1
Schwerverletzte	35482	253	163	55	6
Leichtverletzte	219875	831	695	63	21

Anhang A-1: Verletzungsschwere nach Art der Verkehrsbeteiligung – Innerorts, 2016



	alle verunglückten Personen (n=109.217)	... davon PSE-Anprall (n=6.423)	... davon Pkw-Insassen (n=4.819)	... davon Mzr-Aufsassen (n=1.124)	... davon Gkfz-Insassen (n=321)
Getötete	1853	173	107	53	9
Schwerverletzte	25841	1887	1171	583	81
Leichtverletzte	81523	4363	3541	488	231

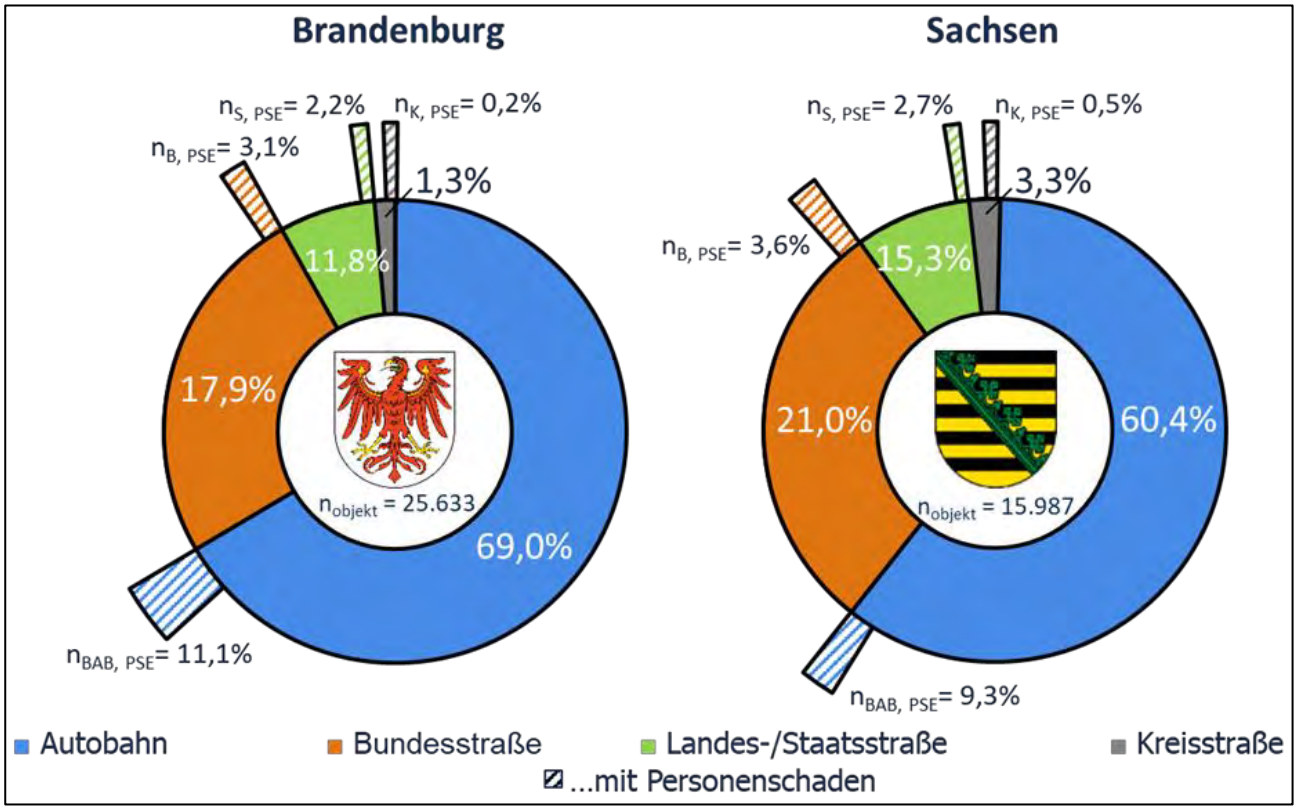
Anhang A-2: Verletzungsschwere nach Art der Verkehrsbeteiligung – Außerorts (ohne BAB), 2016



	alle verunglückten Personen (n=34.338)	... davon PSE-Anprall (n=11.146)	... davon Pkw-Insassen (n=9.912)	... davon Mzr-Aufsassen (n=233)	... davon Gkfz-Insassen (n=908)
Getötete	393	152	108	26	15
Schwerverletzte	6103	2604	2179	119	280
Leichtverletzte	27842	8390	7625	88	613

Anhang A-3: Verletzungsschwere nach Art der Verkehrsbeteiligung – Autobahn, 2016

Anhang B – Unfälle PSE-Anprall nach Straßenklasse



Anhang A- 4: Unfälle mit Objektkollision und PSE-Anprall mit Personenschaden nach Straßenklasse

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.

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

Tel. 030/2020-5000
Fax 030/2020-6000
berlin@gdv.org, unfallforschung@gdv.de

www.gdv.de, www.udv.de