GDV
Unfallforschung
der Versicherer

UNFALLFORSCHUNG KOMPAKT NR. 119

Schutzplanken und Schutzwände neben der Fahrbahn

Defizite und Potenziale



GDV
Unfallforschung
der Versicherer

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.
Unfallforschung der Versicherer (UDV)
Wilhelmstraße 43 / 43 G, 10117 Berlin
Postfach 08 02 64, 10002 Berlin
Tel. 030 2020-5821, Fax 030 2020-6633
www.udv.de, www.gdv.de, unfallforschung@gdv.de

Redaktionsschluss
15.08.2022

Redaktion
Dr.-Ing. Axel Malczyk

Realisation
zwoplus, Berlin

Bildnachweis
Titel: getty images/XXL Photo
Die Nutzungsrechte der übrigen in dieser Broschüre abgebildeten Fotos liegen bei der Unfallforschung der Versicherer

Alle Ausgaben
auf UDV.de

Disclaimer
Die Inhalte wurden mit der erforderlichen Sorgfalt erstellt. Gleichwohl besteht keine Gewährleistung auf Vollständigkeit, Richtigkeit, Aktualität oder Angemessenheit der darin enthaltenen Angaben oder Einschätzungen.

© GDV 2022

Inhalt

1. Einleitung ... 04
2. Kriterien und Anforderungen für die Zulassung von PSE ... 05
3. Arten von PSE ... 07
4. Forschungsfragen ... 08
5. Methoden und Ergebnisse ... 09
5.1 Analyse von Unfällen gegen PSE ... 09
5.2 Makroskopische Analyse von Unfällen gegen PSE ... 09
5.3 Mikroskopische Analyse von Unfällen gegen PSE ... 10
5.3.1 Anprallwinkel, -geschwindigkeiten und Pkw-Arten ... 10
5.3.2 Arten von Schutzeinrichtungen ... 12
5.3.3 Systemspezifische Schwächen von Schutzeinrichtungen ... 13
5.4 Identifikation kritischer Anprallkonstellationen ... 13
5.5 Untersuchungen zu Insassenbelastungen beim Anprall an Schutzeinrichtungen ... 14
5.6 Crashversuche gegen Schutzeinrichtungen ... 14
5.7 Rechnerische Simulation ... 15
5.7.1 Variation von Anprallgeschwindigkeit und -winkel beim Schutzplankenanprall ... 16
5.7.2 Schutzplankenanprall bei niedrigerer Einbauhöhe ... 16
5.7.3 Schutzplankenanprall bei steiferer Schutzplanke ... 16
5.7.4 Variation des Wandprofils beim Schutzwandanprall ... 16
5.7.5 Variation des Anprallwinkels beim Schutzwandanprall ... 17
5.7.6 Aussagekraft von ASI und THIV für biomechanische Belastungen ... 17
6. Fazit und Schlussfolgerungen ... 18
Anhang ... 20
Literatur ... 24

1. Einleitung

Schutzplanken und Betonschutzwände – landläufig auch als Leitplanken und Gleitwände bekannt – stellen als Elemente der Straßeninfrastruktur Schutzeinrichtungen neben der Fahrbahn dar, die ein Abkommen des Fahrzeugs wirkungsvoll verhindern sollen. Im technischen Jargon zählen sie zu den sogenannten „passiven Schutzeinrichtungen" (PSE) beziehungsweise „Fahrzeug-Rückhaltesystemen" neben der Straße. Sie sind nicht zu verwechseln mit passiven Sicherheitssystemen wie Sicherheitsgurt und Airbag, die dem unmittelbaren Insassenschutz im Auto dienen. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) führt dazu aus: „Zu den Fahrzeug-Rückhaltesystemen gehören Schutzeinrichtungen, Anpralldämpfer, Anfangs- und Endkonstruktionen und Übergangkonstruktionen zur Verbindung von Schutzeinrichtungen. Fahrzeug-Rückhaltesysteme sind Bauprodukte und unterliegen damit auf der europäischen Ebene der Bauprodukteverordnung. Die europäische Norm DIN EN 1317 Rückhaltesysteme an Straßen beschreibt die Prüfungen und die Anforderungen an die Fahrzeug-Rückhaltesysteme, ordnet den Systemen anhand der Prüfergebnisse verschiedene Leistungsklassen zu und regelt das Zertifizierungsverfahren." [1]

Neben der bloßen Vermeidung des Abkommens von der Fahrbahn und gegebenenfalls dem Schutz dahinter befindlicher Einrichtungen, z.B. Bahnstrecken oder Brückenpfeiler, sollten solche Einrichtungen aber auch zur Sicherheit der Insassen im anprallenden Fahrzeug beitragen. Dazu ist es unerlässlich, dass der Anprall an die Schutzeinrichtung weder zu unerwünschten Fahrzeugbewegungen noch zu massiven Intrusionen in den Fahrzeuginnenraum oder übermäßigen biomechanischen Belastungen für die Insassen führt. Dabei unterscheiden sich Schutzplankenkonstruktionen aus Stahl und Schutzwände aus Beton grundlegend. Betonschutzwände sind naturgemäß weitgehend unnachgiebig, sofern fest am Boden verankert, und bei geringem Platzbedarf darauf ausgelegt, zu verhindern, dass ein Fahrzeug diese durchbricht. Schutzplanken sind hingegen in einer Vielzahl von Ausführungen verfügbar, die unterschiedlich aufwändig gestaltet und unter Anprallbelastung nachgiebig sind. Grundsätzlich lässt eine nachgiebige Schutzeinrichtung – sofern sie mit der Karosseriestruktur des Fahrzeugs gut interagiert – eine geringere Belastung auf das Fahrzeug und somit auch auf seine Insassen erwarten. Oftmals schränken in der Praxis aber die baulichen Gegebenheiten die Möglichkeit für große Verschiebungen der Schutzeinrichtung ein, sodass ein Kompromiss zwischen diesen widerstrebenden Zielen gefunden werden muss. Dazu kommt in der Praxis auch eine Vielzahl anderer Aspekte, wie Erstellungskosten und Wartungsfreundlichkeit sowie Vorgaben hinsichtlich der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und der zu schützenden Infrastruktur am betreffenden Streckenabschnitt, die mit darüber entscheiden, welches System in die Auswahl kommt. Im vorliegenden Projekt sollte jedoch ausschließlich der Gesichtspunkt der Sicherheit von Insassen in Pkw beim Anprall gegen solche Schutzeinrichtungen betrachtet werden.

Für die Zulassung einer Schutzeinrichtung sind auch dynamische Anpralltests zu erbringen; die Ergebnisbeurteilung erfolgt anhand verschiedener Kennwerte und Kriterien, die sich allerdings unmittelbar auf das Fahrzeug beziehen und anders als in Aufprallversuchen für die Zulassung eines neuen Pkw-Modells keine Crashtest-Dummys und entsprechende Messungen beinhalten. Die Spezifikationen für die Anprallprüfungen und ihre Ergebnisbewertung sind größtenteils mehrere Jahrzehnte alt. Zum Teil gilt dies auch für die in den Tests verwendeten Pkw, wohingegen sich die Fahrzeugflotte auf den Straßen zwischenzeitlich deutlich gewandelt hat. Es ist somit an der Zeit, die Spezifikationen der Anprallprüfungen und die Anforderungen an Schutzeinrichtungen neben der Fahrbahn auf ihre Aktualität hin zu überprüfen und bei Bedarf Verbesserungsvorschläge, basierend auf Erkenntnissen der Unfallforschung, zu formulieren. Dies war die wesentliche Zielstellung des Forschungsprojekts, welches die Unfallforschung der Versicherer gemeinsam mit ihren Projektpartnern seit 2017 bearbeitete. Dazu wurden Unfallanalysen betrieben, Crashversuche durchgeführt und numerische Simulationsmodelle erstellt, die im Folgenden zusammenfassend beschrieben werden.

© GDV 2022

2. Kriterien und Anforderungen für die Zulassung von PSE

Die wichtigsten Regelwerke stellen die europäische Norm DIN EN 1317 „Rückhaltesysteme an Straßen“ [2] und die „Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeugrückhaltesysteme“ (RPS) [3] dar. Letztere legt insbesondere die Einsatzkriterien fest, nach denen entsprechende Systeme an Straßen abhängig von der dort herrschenden Gefährdung zu errichten sind, und welche Leistung (z.B. welches Aufhaltevermögen) von diesen verlangt wird. Die EN 1317 hingegen definiert verschiedene Systemtypen, beschreibt ihre Leistungsklassen und spezifiziert die zur Zertifizierung erforderlichen Prüfverfahren einschließlich der Anprallprüfungen.



Eine besondere Betrachtung verdienen die Leistungsklassen, welche sich insbesondere nach drei Kriterien richten [4]:

- Aufhaltestufe
- Anprallheftigkeitsstufe
- Wirkungsbereichsklasse

Die Aufhaltestufe einer Schutzeinrichtung („Fahrzeugrückhaltesystem“) gibt an, wie viel Energie durch ein anprallendes Fahrzeug das System aufhalten kann. Die Aufhaltestufen reichen – mit weiteren Unterteilungen – von „T“ für geringes Aufhaltevermögen (für temporäre Schutzeinrichtungen an Arbeitsstellen usw.) über „N“ (normales Rückhaltevermögen) bis zu „H“ und „L“ für höheres und sehr hohes Rückhaltevermögen. Entsprechend der Aufhaltestufen sind dann unterschiedlich anspruchsvolle Abnahmeprüfungen, bezeichnet mit „TB“, vorgesehen.

Die Anprallheftigkeitsstufe an einer Schutzeinrichtung wird mittels der Kennwerte

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

bestimmt und in drei Stufen – A, B und C – eingeteilt.

Für die Berechnung des ASI werden in der Anprallprüfung die Verzögerungen des Fahrzeugs in allen drei Achsenrichtungen nahe seinem Schwerpunkt gemessen und mittels einer Wichtungsformel zu einer Resultierenden verrechnet, aus deren zeitlichem Verlauf dann der Maximalwert bestimmt wird. Dieses

Maximum stellt den ASI dar und soll vereinfachend die anprallbedingten Belastungen repräsentieren, die auf das Fahrzeug und indirekt auch auf seine Insassen wirken. Damit lässt sich aber nur eine sehr allgemeine Aussage treffen, wie „schwer" der Anprall für Fahrzeug und Insassen war. Lokale Deformationen an der Karosserie werden damit nicht abgebildet, und dass sich damit biomechanische Belastungen auf verschiedene Körperregionen einer Person, die Aufschluss über das Verletzungsrisiko geben könnten, prognostizieren lassen, ist noch weniger zu erwarten.

Der THIV steht für die „Theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfes". Beim Anprall an die Schutzeinrichtung wird idealisierend eine geradlinige Bewegung des „frei fliegenden" Insassenkopfes in der horizontalen Ebene angenommen bis zum Auftreffen auf eine fiktive Fläche, die einen Teil des – ebenfalls idealisierten – Fahrzeuginnenraums repräsentieren soll. Der THIV ist der Wert der Relativgeschwindigkeit zwischen „Kopf" und fiktiver Fläche zum Zeitpunkt des Auftreffens und kann als Indikator dafür angesehen werden, wie abrupt das Fahrzeug durch den Anprall an die Schutzeinrichtung verzögert wird.

Der Wirkungsbereich ist ein Maß dafür, wie weit sich die Schutzeinrichtung bei der Anprallprüfung durch ein Fahrzeug seitlich maximal verformt oder verschiebt, und wird in Klassen von W1 (≤ 0,6 m) bis W8 (≤ 3,5 m) eingeteilt. Dies ist unter anderem bei der Bemessung des Abstands der Schutzeinrichtung von einer dahinter liegenden zu schützenden Struktur von Bedeutung, wenn diese nicht beschädigt werden darf.

Die anzuwendenden Anprallprüfungen sind in Abhängigkeit von den geforderten Aufhaltestufen im Wesentlichen durch die Anprallgeschwindigkeit, den Anprallwinkel, die Fahrzeugart und die Masse des Testfahrzeugs charakterisiert. Als Fahrzeugart kommen in der Regel Pkw mit Gesamtmassen von 900 kg, 1.300 kg oder 1.500 kg zur Anwendung, je nach Art der Prüfung. Die Verwendung von Crashtest-Dummys ist nicht gefordert. Wo ein höheres oder sehr hohes Aufhaltevermögen der Schutzeinrichtung erforderlich ist, sind zur Zertifizierung zusätzlich auch Anprallversuche mit Lkw und Sattelzügen mit Massen bis zu 38.000 kg vorgesehen.

Am häufigsten werden bei der Zertifizierung die Abnahmeprüfungen

- TB 11 (100 km/h Anprallgeschwindigkeit, 20° Anprallwinkel, Pkw mit 900 kg Gesamtmasse)
- TB 31 (80 km/h Anprallgeschwindigkeit, 20° Anprallwinkel, Pkw mit 1.500 kg Gesamtmasse)
- TB 32 (110 km/h Anprallgeschwindigkeit, 20° Anprallwinkel, Pkw mit 1.500 kg Gesamtmasse)

gefordert, teilweise auch ergänzend für Schutzeinrichtungen mit höherem oder hohem Rückhaltevermögen (Stufe „H" und „L"), um den Nachweis zu erbringen, dass diese nicht nur schwere Fahrzeuge aufhalten können, sondern auch kleinere Pkw beim Anprall nicht zu stark belasten.

Neben der Einhaltung von ASI- und THIV-Grenzwerten dürfen bei Anprallprüfungen aber auch keine Auffälligkeiten auftreten wie das Durchbrechen oder Überwinden der Schutzeinrichtung oder ein Überschlag des Testfahrzeugs. Diese den Schutz der Insassen beim Pkw-Anprall adressierenden Aspekte stellen aber nur einige innerhalb des komplexen Anforderungsspektrums an die Systeme dar, die nicht zuletzt auch Kosten und Aufwand für Installation, Wartung und Reparatur umfassen.

© GDV 2022

3. Arten von PSE

Grundsätzlich ist hinsichtlich der Bauart zwischen Stahlschutzplanken und Betonschutzwänden zu unterscheiden (Abb. 1). Letztere werden aus Betonfertigteilen oder aus Ortbeton mithilfe einer Schalung hergestellt. Sie haben eine hohe Durchbruchsicherheit bei gleichzeitig minimalem Platzbedarf und einem geringen Wartungs- und Reparaturaufwand (z.B. keine Reparatur bei leichten Anprallereignissen). Derzeit sind am häufigsten die Profilformen „Step-Profil“ und „New Jersey-Profil“ verbaut, bei Neubau-Projekten finden auch leicht abgewandelte Profile Verwendung. Besonders häufig werden Betonschutzwände an Autobahnen errichtet und dort größtenteils auf dem Mittelstreifen zwischen den Richtungsfahrbahnen und vor Einrichtungen wie Brückenpfeilern und Schilderbrücken dicht neben der Fahrbahn.

Stahlschutzplanken finden sich hingegen sowohl im Innerorts- und Außerortsbereich als auch an Autobahnen. Je nach Aufhaltestufe sind sie in einer Vielzahl von Formen und Ausführungen erhältlich. „Klassische“ Schutzplanken bestehen aus miteinander verbundenen Stahlprofilelementen („Holme“), die in festgelegten Abständen über eingerammte Pfosten im Boden verankert sind. Die Pfosten sind bei der „einfachen Schutzplanke“ (ESP) an der Rückseite der Profilelemente direkt mit diesen verschraubt oder, wie im Falle der „einfachen Distanzschutzplanke“ (EDSP), mittels eines Abstandhalters etwas zurückversetzt verbunden. Beim Anprall eines Fahrzeugs sollen die Schutzplanken gezielt nachgeben, indem sich die Verbindung einzelner Pfosten löst und die Profile wie eine Sehne seitlich ausgelenkt werden. Anders als bei Betonschutzwänden wird damit ein Teil der Bewegungsenergie des anprallenden Fahrzeugs auch in Deformation der Schutzeinrichtung umgewandelt, allerdings erfordert dies seitlichen Raum zur Auslenkung des Systems. Um diese Nachgiebigkeit zu verringern und die Durchbruchsicherheit zu vergrößern, können die Pfosten in dichteren Abständen gesetzt oder stärkere Profile, wie Kastenprofile, verwendet werden, oftmals in Kombination mit „klassischen“ Profilen.

Sowohl für Betonschutzwände als auch für Stahlschutzplanken gibt es außerdem angeschrägte, sogenannte Anfangs- und Endkonstruktionen am Beginn und Ende der Schutzeinrichtung. Übergangskonstruktionen kommen zum Einsatz, wo Stahlschutzplanken unmittelbar an Betonschutzwände anschließen und umgekehrt; diese wurden im Rahmen des Forschungsprojekts aber nicht betrachtet.



Abbildung 1 · Schutzplanke aus Stahl (li.) und Schutzwand aus Beton (re.)

4. Forschungsfragen

Im realen Unfallgeschehen kommt es vereinzelt zu Ereignissen, bei denen Personenwagen eine Schutzeinrichtung beim Anprall überwinden, sich im Anschluss auf der Fahrbahn überschlagen oder Insassen aus anderen Gründen schwere Verletzungen erleiden. Das wirft die Frage auf, ob diese Systeme bereits bestmögliche Leistung bieten und ob die Anprallprüfungen sowohl das Unfallgeschehen als auch die aktuelle Flotte von Personenwagen hinreichend berücksichtigen. Aufgrund der Tatsache, dass für die Zertifizierung der Systeme keine Crashtest-Dummys und keine Messung der auf diese einwirkenden Kräfte und Beschleunigungen gefordert sind, liegen kaum Erkenntnisse darüber vor, welche biomechanischen Belastungen ein Insasse beim Anprall gegen eine Schutzeinrichtung zu erwarten hätte. Stattdessen wird, wie oben beschrieben, anhand einiger Messgrößen die Anprallschwere am Fahrzeug selbst ermittelt und die Einhaltung entsprechend festgelegter Grenzwerte überprüft.

Auffällig ist auch, dass die bei Zertifizierungstests verwendeten Fahrzeugmodelle innerhalb weiter Grenzen durch den Hersteller der Schutzeinrichtung selbst gewählt werden können. In der Praxis erfolgt die Anprallprüfung oftmals mit Fahrzeugmodellen aus den 90er Jahren, die in mehrfacher Hinsicht kaum noch als repräsentativ für die aktuelle Fahrzeugpopulation gelten können. Insbesondere sind die durchschnittlichen Leergewichte der Fahrzeuge in den vergangenen 20 bis 30 Jahren deutlich angestiegen und Modelle mit 900 kg Gesamtmasse sind aus aktueller Produktion kaum noch erhältlich. Außerdem verzeichnen neue Fahrzeugkonzepte wie SUVs mit einem tendenziell höheren Schwerpunkt starke Zuwächse. Andererseits bieten moderne Pkw mittlerweile dank standardmäßig verstärkter Karosseriestrukturen und Ausstattung mit Airbags und Gurtstraffern ein Sicherheitsniveau, welches beim Anprall an eine Schutzeinrichtung auch einen erheblichen fahrzeugseitigen Beitrag zum Insassenschutz erwarten lässt. Gerade deshalb scheint es geboten, zur Bewertung auch Messungen am Insassen beziehungsweise an anthropomorphen Testpuppen (Dummys) selbst vorzunehmen. Darüber hinaus besteht bei der naturgemäß begrenzten Zahl verschiedener Aufpralltests theoretisch die Möglichkeit, dass bei deutlichen Abweichungen von diesen Randbedingungen, beispielsweise einer niedrigeren Bauhöhe einer Schutzplanke oder einem höheren Fahrzeugschwerpunkt, unerwartete oder unerwünschte Effekte auftreten. Ein breiteres Spektrum zu untersuchender Anprallsituationen wäre daher prinzipiell wünschenswert.

Vor diesem Hintergrund stellten sich für das Forschungsprojekt folgende Fragen:

- Spiegeln die Prüfspezifikationen die Anforderungen an solche Systeme im realen Unfallgeschehen wider?
- Ist insbesondere die Verwendung von Pkw mit geringer Masse und Modellen aus den 80er und 90er Jahren noch zeitgemäß? Können und sollten mit einer modernen Fahrzeugflotte die Anforderungen an Schutzeinrichtungen angepasst werden?
- Sind ASI und THIV als wesentliche Abnahmekriterien bei Anprallprüfungen geeignet, um die Belastungen auf Fahrzeuginsassen beim Anprall an eine Schutzeinrichtung zu charakterisieren?
- Lassen die aktuellen Prüfanforderungen befürchten, dass bei der Entwicklung von Schutzeinrichtungen eine „Punkt-Optimierung“ auf die geforderten Spezifikationen hin erfolgt? Wie verhalten sich zertifizierte Schutzeinrichtungen, wenn der Anprall eines Pkw mit abweichenden Parametern, z.B. hinsichtlich Anprallwinkel und Geometrie der Schutzeinrichtung, oder mit modernen Fahrzeugmodellen erfolgt?
- Gibt es angesichts der grundlegend unterschiedlichen Konzeption von Stahlschutzplanken und Betonschutzwänden systemspezifische Stärken und Schwächen hinsichtlich des Insassenschutzes?
- Lassen sich Prüfmethoden, Bewertungskriterien und Anforderungen angesichts gestiegener Anforderungen an die Realitätsnähe und das breitere Spektrum von Anprallsituationen weiterentwickeln, beispielsweise mithilfe numerischer Simulation, ohne den Aufwand für physische Fahrzeug-Crashtests übermäßig zu erhöhen?

© GDV 2022

5. Methoden und Ergebnisse

5.1 Analyse von Unfällen gegen PSE

Für die Unfalldatenanalyse wurden, je nach erforderlicher Detailtiefe und Verfügbarkeit, Daten des Statistischen Bundesamtes und der Unfalldatenbanken GIDAS (German In-Depth Accident Study) und UDB (Unfalldatenbank der Versicherer) genutzt.

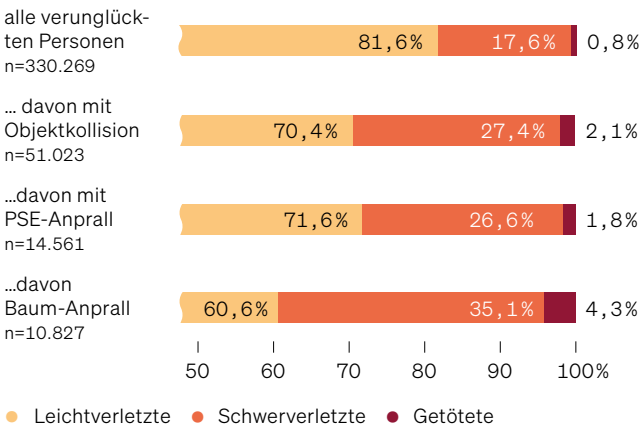
5.2 Makroskopische Analyse von Unfällen gegen PSE

Aus der amtlichen Statistik, die auf Daten der Verkehrsunfallanzeigen der Polizei beruht und insbesondere Unfälle mit Personenschaden erfasst, lässt sich ermitteln, wie häufig sich im Unfallgeschehen Kollisionen mit Anprall gegen Hindernisse neben der Fahrbahn und insbesondere gegen eine Schutzeinrichtung ereignen. Unter den mehr als 260.000 Personenschadenunfällen des Jahres 2020 fand bei etwa jedem siebten (14,2 Prozent) eine Kollision mit einem Objekt neben der Fahrbahn statt (Abb. 2).

Von diesen wiederum war etwa jeder Vierte (25,6 Prozent) ein Anprall gegen eine Schutzeinrichtung (in der polizeilichen Erfassung werden Anpralle gegen Stahlschutzplanken und gegen Betonschutzwände nicht differenziert, sondern gemeinsam mit dem Stichwort „Schutzplanke“ kodiert). Beim Vergleich zwischen Unfällen mit Anprall gegen eine Schutzeinrichtung (PSE) und solchen mit Anprall gegen einen Baum – ein besonders gefährliches Kollisionsobjekt – zeigt sich, dass der Anteil getöteter und schwerverletzter Personen (bezogen auf die Gesamtheit aller Verunglückten der jeweiligen Kategorie) bei PSE-Anprall erheblich geringer ausfällt (Abb. 3).

PSE verringern das Verletzungsrisiko gegenüber Baum-Anprall

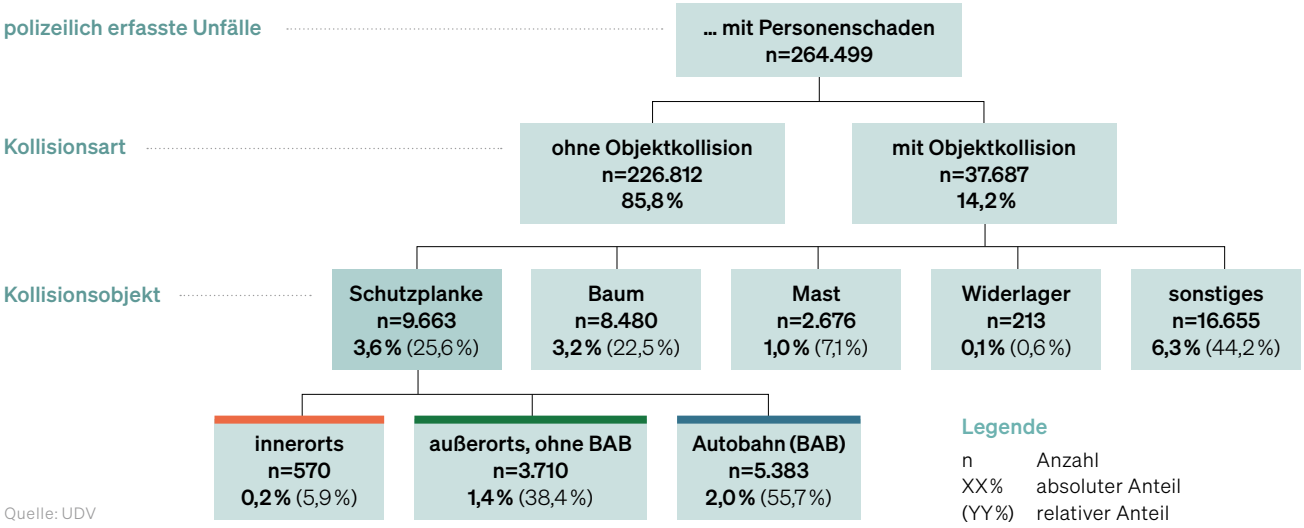
Abbildung 3 · Verletzungsschweren in Verkehrsunfällen mit Anprall gegen Objekte im Seitenraum, 2020



Quelle: UDV

Amtliche Verkehrsunfallstatistik 2020

Abbildung 2 · Anzahl Verkehrsunfälle mit Personenschaden und Kollision mit Objekten neben der Fahrbahn

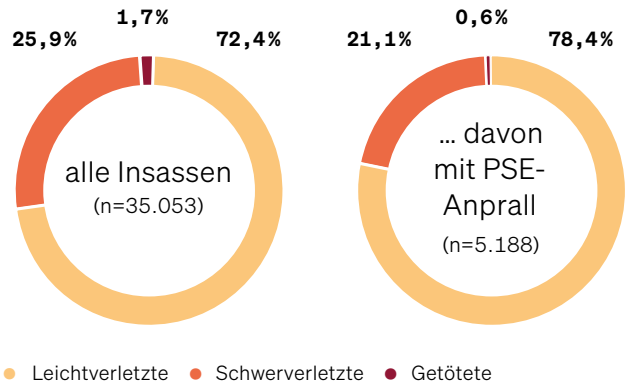


Quelle: UDV

Weil die den Abb. 2 und Abb. 3 zugrunde liegenden Unfalldaten auch Unfälle mit mehreren Beteiligten umfassen und offen bleibt, wie viele und welche der Beteiligten eine Kollision mit einer Schutzeinrichtung hatten, ist eine Beschränkung auf Alleinunfälle aussagekräftiger. Eine Sonderauswertung der amtlichen Statistik für 2016 bestätigt eine Verringerung insbesondere beim Anteil der getöteten Pkw-Insassen bei Alleinunfällen mit Anprall gegen eine Schutzeinrichtung (0,6 Prozent) gegenüber der Gesamtheit aller Pkw-Alleinunfälle (1,7 Prozent) (Abb. 4).

Geringeres Risiko tödlicher Verletzungen bei Pkw-Alleinunfall gegen PSE

Abbildung 4 · Verletzungsschwere von verunglückten Pkw-Insassen bei Alleinunfall, 2016



Quelle: UDV

5.3 Mikroskopische Analyse von Unfällen gegen PSE

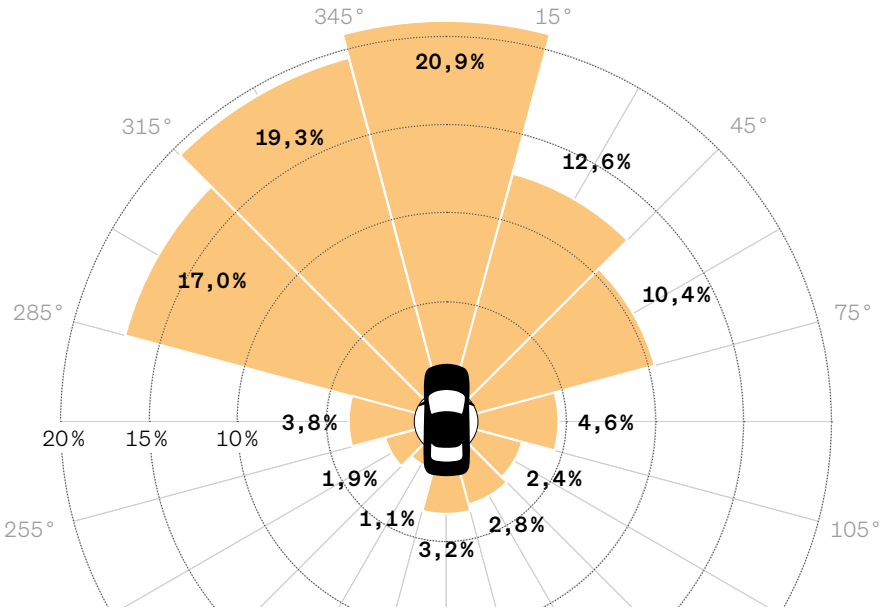
5.3.1 Anprallwinkel, -geschwindigkeiten und Pkw-Arten

Ein Großteil der Analyse des Unfallgeschehens erfolgte daher auf Grundlage der Unfalldatenbank GIDAS. Dafür standen 1.027 Kollisionsereignisse eines Pkw mit einer Schutzeinrichtung seit 2005 zur Verfügung. Erwartungsgemäß ist für Pkw, die mit einer Schutzeinrichtung kollidieren, die Richtung der einwirkenden Stoßkraft (Stoßvektor) direkt von vorn oder von schräg vorn. Der Anteil von schräg vorn links gegenüber schräg vorn rechts überwiegt deutlich, was in der Mehrzahl auf ein Abkommen von der Fahrbahn nach links schließen lässt (Abb. 5). Korrespondierend mit den hauptsächlichen, fahrerseitig betonten Anprallstellen am Fahrzeug blieben Fahrer seltener unverletzt als Beifahrer und Mitfahrer auf den hinteren Sitzplätzen und erlitten häufiger schwere Verletzungen (MAIS 3+, nach anatomischem Verletzungsschwere-Score AIS [5]).

Entsprechend verteilen sich die Anstöße am Fahrzeug in fast der Hälfte der Fälle (44,4 Prozent) auf die Front und zu einem Viertel (25,2 Prozent) auf die linke Fahrzeugseite. Die Winkel, unter denen Pkw mit Schutzeinrichtungen kollidieren, liegen in fast der Hälfte der Anstöße unter 10° (Abb. 6) und ziehen selten schwere Verletzungen nach sich, weil das Fahrzeug an der

Anprall gegen Schutzeinrichtung meist frontal oder schräg links

Abbildung 5 · Verteilung der Richtungen der wirkenden Stoßimpulse



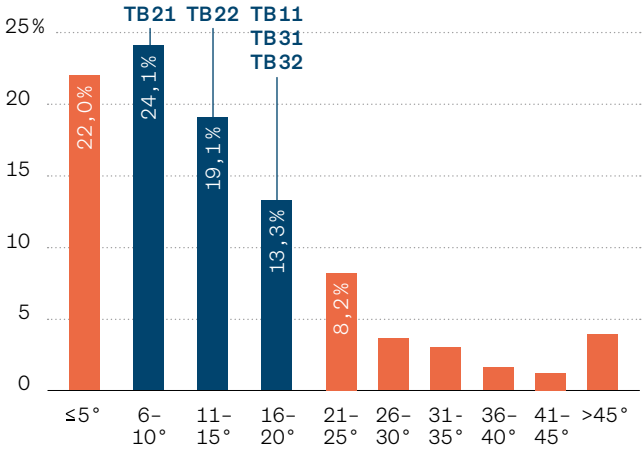
n=997

Quelle: UDV

© GDV 2022

Anprallwinkel zwischen 10° und 20° durch Anprallprüfungen gut abgedeckt

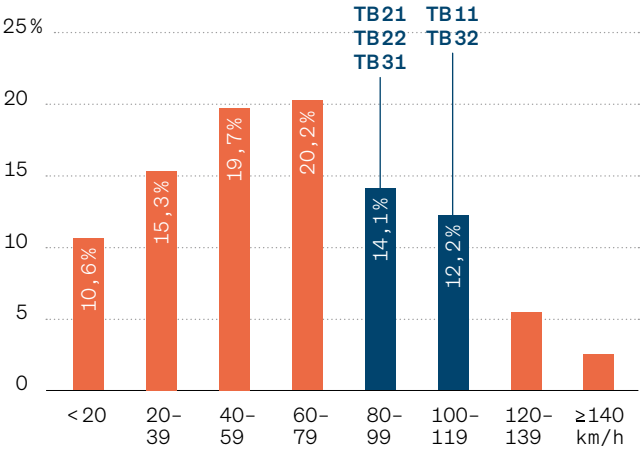
Abbildung 6 · Verteilung der Kollisionswinkel



Quelle: UDV n=759

Geschwindigkeiten bis etwa 120 km/h durch Anprallprüfungen abgedeckt

Abbildung 7 · Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeiten



Quelle: UDV n=933

Schutzeinrichtung abgleitet und keine großen Verzögerungen oder Deformationen erleidet.

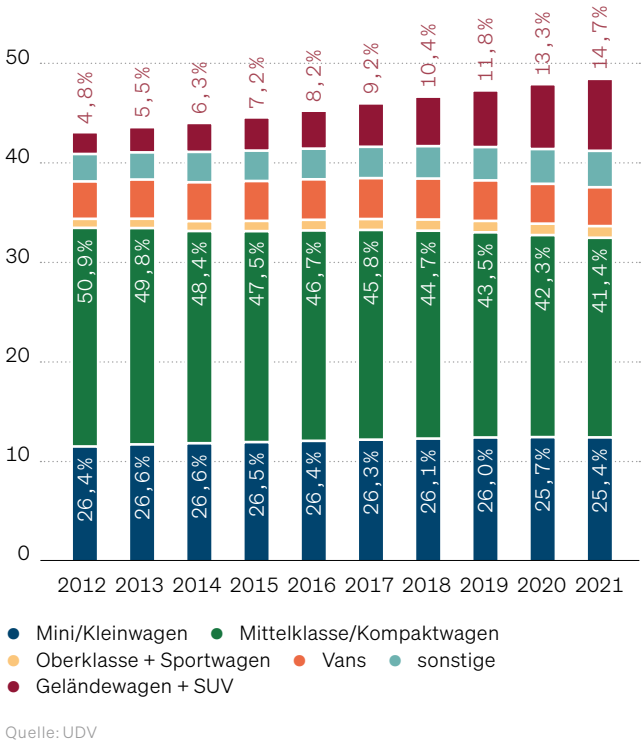
Allerdings ist lediglich in der Anprallprüfung TB 21, die nur für temporäre Schutzeinrichtungen im Bereich von Arbeitsstellen gilt, ein Anprallwinkel von 10° spezifiziert. Anprallwinkel zwischen 11° und 20° machen ein Drittel aller Kollisionen mit Schutzeinrichtungen aus, welche durch eine Reihe von Anprallprüfungen (TB 11, TB 31 und TB 32), die für normale, höhere und hohe Aufhaltestufen vorgesehen sind, abgedeckt werden. Lediglich jeder siebte Anprall gegen eine Schutzeinrichtung erfolgt im Unfallgeschehen unter einem Winkel von mehr als 25°.

Die Anprallgeschwindigkeiten gegen Schutzeinrichtungen liegen zu etwa zwei Dritteln unterhalb 80 km/h (Abb. 7). In gut einem Viertel der Unfallereignisse erfolgt der Anprall mit Geschwindigkeiten zwischen 80 km/h und 120 km/h, welche unter anderem durch die Anprallprüfungen TB 11, TB 31 und TB 32 weitgehend abgedeckt werden. Nur knapp 8 Prozent der Kollisionen haben noch höhere Anprallgeschwindigkeiten. Es kann also konstatiert werden, dass die aktuellen Prüfungen hinsichtlich der Anprallwinkel und -geschwindigkeiten die oberen Anforderungsbereiche für einen Großteil des Pkw-Unfallgeschehens gut repräsentieren.

In Bezug auf die im Unfallgeschehen involvierten Pkw-Arten ist festzustellen, dass im GIDAS-Datenmaterial Fahrzeuge aus dem Segment der Mittel- und Kompaktklasse (54,3 Prozent) und der Mini- und Kleinwagenklasse (27,6 Prozent) den Hauptteil ausmachen. Geländewagen und SUV sind darin mit lediglich 4,1 Prozent Anteil vertreten. Im aktuellen Bestand von Pkw in Deutschland beträgt der Anteil dieser Fahrzeugklasse hingegen knapp 15 Prozent und hat sich innerhalb von zehn Jahren verdreifacht (Abb. 8).

Deutliche Zunahme des SUV-Anteils in der Fahrzeugflotte

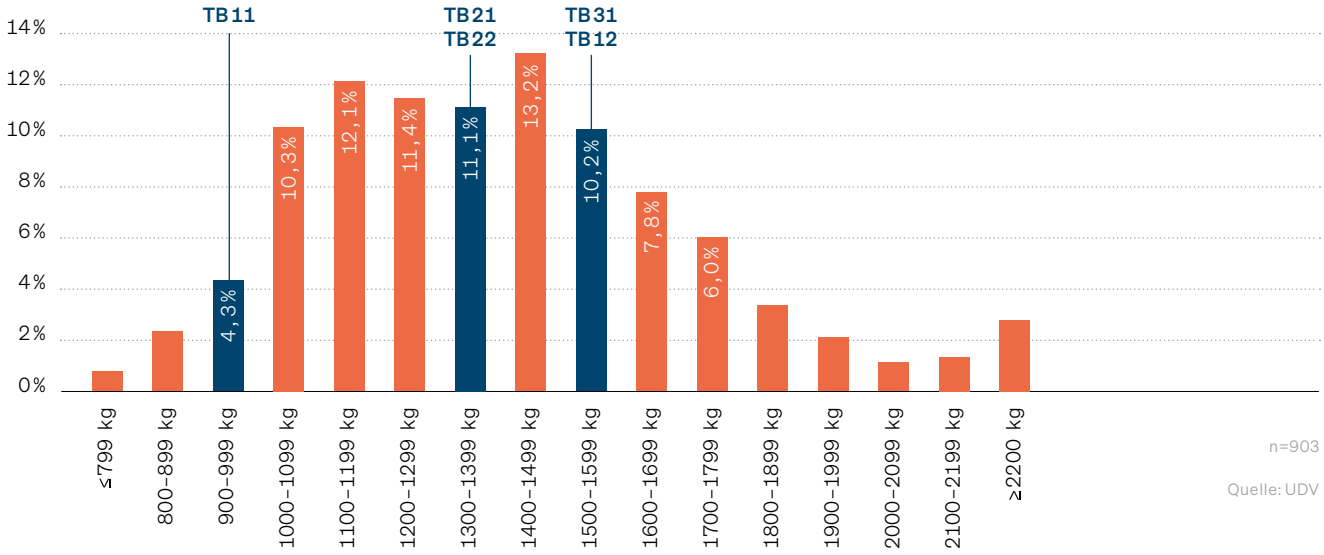
Abbildung 8 · Entwicklung des Pkw-Bestandes in Deutschland nach Segment, in Mio., 2012–2021



Quelle: UDV

Ein Viertel der Pkw in realen Unfällen schwerer als in Anprallprüfungen

Abbildung 9 · Gesamtmasse („Crashmasse“) der Pkw bei PSE-Anprallen



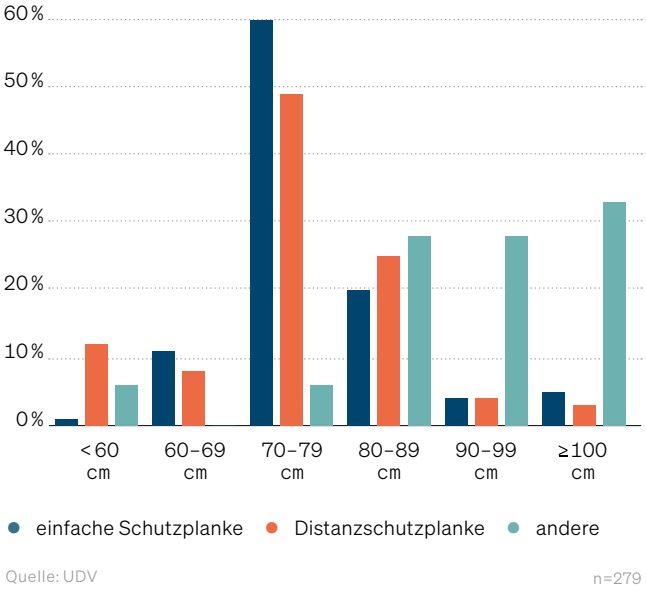
Die vermeintliche Unterrepräsentierung von Geländewagen und SUV in GIDAS ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Daten bis ins Unfalljahr 2005 zurückreichen, als diese Fahrzeuge noch vergleichsweise selten waren. Innerhalb von zehn Jahren stieg aber auch die durchschnittliche Leermasse neu zugelassener Fahrzeuge von 1.446 kg im Jahr 2010 auf 1.613 kg in 2020. Die Gesamtmasse der im GIDAS-Unfallgeschehen mit Schutzeinrichtungen kollidierten Fahrzeuge lag zu etwa zwei Dritteln zwischen 1.000 kg und unter 1.600 kg (Abb. 9). Diese Bereiche werden in den Anprallprüfungen durch die Masse der zu verwendenden Pkw mit 1.300 kg (TB 21 und TB 22) und 1.500 kg (TB 31 und TB 32) recht gut adressiert. Pkw mit einer Gesamtmasse unter 1.000 kg sind hingegen mit lediglich etwa 7 Prozent im Unfallgeschehen mit Schutzeinrichtungen selten anzutreffen. Das übrige Viertel von Pkw liegt mit Gesamtmassen ab 1.600 kg deutlich über den für die Anprallprüfungen spezifizierten Pkw-Massen. Der Anteil dürfte beim Trend hin zu schweren Fahrzeugen bei Neuzulassungen aber in Zukunft steigen.

5.3.2 Arten von Schutzeinrichtungen

Im GIDAS-Datenmaterial erfolgten Kollisionen gegen Schutzeinrichtungen in 90 Prozent der Fälle gegen Stahlschutzplanken, etwas über die Hälfte davon gegen einfache Schutzplanken (ESP). Da GIDAS nur Unfälle in den Regionen Hannover und Dresden erhebt, sind diese Anteile nicht als repräsentativ aufzufassen, sondern können regional unterschiedlich ausfallen. Die Analyse der Einbauhöhen im Untersuchungsgebiet zeigt, dass die Einbauhöhe von Schutzplanken variiert (Abb. 10). Etwa die Hälfte der von Anprallen betroffenen Schutzplanken wies eine Einbauhöhe von 70 bis 79 cm über Fahrbahnniveau auf, ein Drittel war höher. Die übrigen unterschritten allerdings die vorgeschriebene Einbauhöhe von 70 cm.

Mindesthöhe von Schutzplanken wird zum Teil unterschritten

Abbildung 10 · Verteilung der Einbauhöhen von PSE-Systemen (Fahrbahn bis PSE-Oberkante)



© GDV 2022

5.3.3 Systemspezifische Schwächen von Schutzeinrichtungen

Zur Untersuchung des Unfallgeschehens mit Schutzwandanprall standen in GIDAS lediglich 43 Pkw-Kollisionen zur Verfügung und wurden deshalb durch 21 weitere Unfälle aus der Unfalldatenbank der Versicherer (UDB) ergänzt. Der Anteil von Schutzwänden mit New Jersey-Profil überwog dabei gegenüber dem Step-Profil. Im Fallmaterial zeigt sich dabei infolge des Aufsteigens des anprallenden Fahrzeugs an den seitlich abgeschrägten Wandprofilen eine größere Häufigkeit von Überschlägen in der nachkollisionären Phase als in Anprallereignissen gegen Schutzplanken (Abb. 11). Insgesamt war in zehn der 64 Anprallereignisse ein anschließender Überschlag zu verzeichnen, die durch Pkw mit Massen zwischen 1.100 kg und 1.700 kg, Kollisionsgeschwindigkeiten über 80 km/h und sehr kleine Anprallwinkel gekennzeichnet waren.

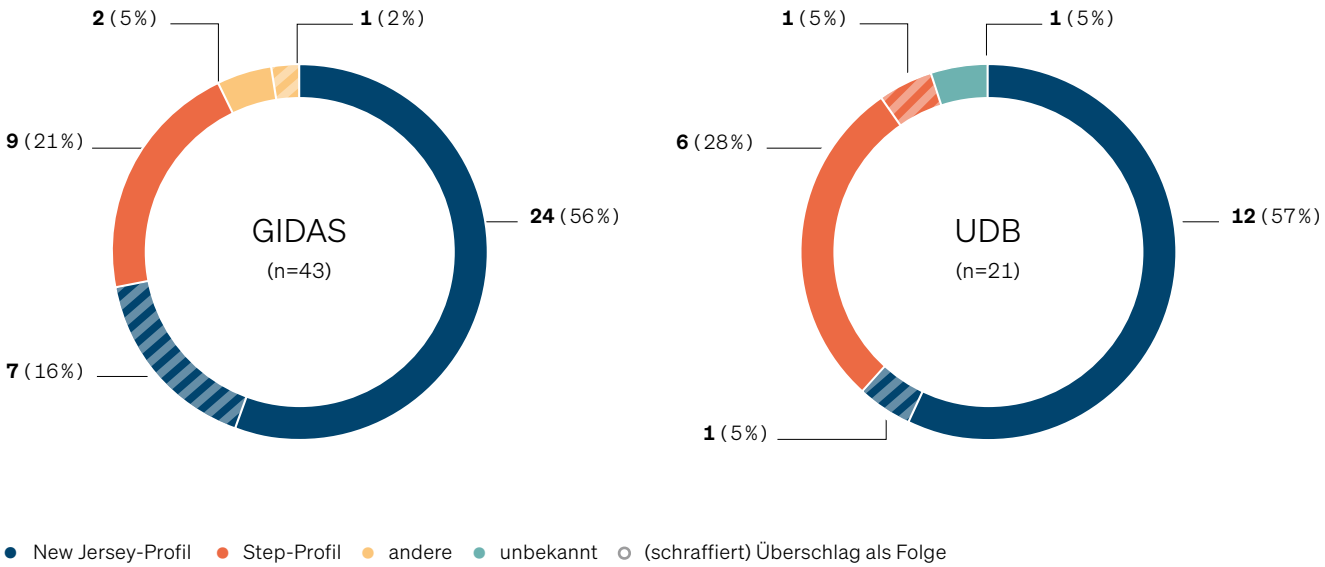
Auf der anderen Seite zeigten sich in etwa 9 Prozent der Anprallereignisse an Schutzplanken im GIDAS-Fallmaterial Situationen, in denen diese keine oder nur geringfügige Schutzwirkung entwickelten. Dazu gehörten zur Hälfte Fälle, in denen das Fahrzeug auf die Schutzplanke auffuhr, weil der Anprall im Bereich einer beginnenden, schräg ansteigenden Schutzplanke erfolgte. Im Anschluss kam es dabei häufig zu einem Überschlag. In einem Viertel der Fälle wurde die Schutzplanke im regulären Bereich hingegen entweder unterfahren, wobei oft mehrere Pfosten abgerissen wurden, oder überfahren, also die Schutzplanke in ihrer vollen Höhe überwunden.

5.4 Identifikation kritischer Anprallkonstellationen

Wie die Analyse des Unfallgeschehens zeigt, führen beim Anprall an eine Schutzeinrichtung gewisse Charakteristika oder deren Zusammenwirken offenbar zu einem erhöhten Verletzungsrisiko für die Fahrzeuginsassen. Daher wurden Fahrzeugmassen, Anprallgeschwindigkeiten und -winkel in Klassen unterteilt und ihre Kombination anhand der assoziierten Häufigkeiten und Schweregrade von Insassenverletzungen bewertet. So lassen sich, unterschieden für vier verschiedene Pkw-Massegruppen (ca. ≤ 1.000 kg, ca. 1.000–1.360 kg, ca. 1.360–1.780 kg, ca. 1.780–2.330 kg), diejenigen Kombinationen von Anprallgeschwindigkeiten und Anprallwinkeln bestimmen, die Schwerpunkte im Verletzungsgeschehen darstellen. Durch Gegenüberstellung mit den in Zertifizierungstests spezifizierten Anprallparametern lässt sich überprüfen, ob damit das Unfallgeschehen ausreichend genau adressiert wird. Im Detail ist diese Vorgehensweise im Forschungsbericht beschrieben [6].

Nach Schutzwandanprall etwa 15 Prozent mit Pkw-Überschlag

Abbildung 11 · Erstkollisionen an Schutzwänden nach Art des Profils und Überschlag



Quelle: UDV

5.5 Untersuchungen zu Insassenbelastungen beim Anprall an Schutzeinrichtungen

Um sich im Projekt insbesondere der Frage zu widmen, welche biomechanischen Insassenbelastungen mit modernen Fahrzeugen beim Anprall gegen Schutzeinrichtungen auftreten, wurden sowohl Crashversuche als auch rechnerische Simulationen durchgeführt. Die drei Crashversuche unter Verwendung eines instrumentierten Dummys auf dem Fahrersitzplatz, davon je einer mit einem modernen Kleinwagen gegen eine Stahlschutzplanke und gegen eine Betonschutzwand, der dritte mit einem SUV gegen eine Stahlschutzplanke, dienten dabei auch als Validierungsgrundlage für die zu erstellenden Simulationsmodelle nach der Finite-Element-Methode. Mit diesen wiederum ließen sich Varianten der Eingangsbedingungen – verschiedene Anprallgeschwindigkeiten und -winkel, aber auch mit abweichenden Geometrien der Schutzeinrichtungen – rechnen, um die Fahrzeugkinematik beim Anprall und die resultierenden Insassenbelastungen zu prognostizieren.

Grundlage bei der Auswahl von Fahrzeugen und Schutzeinrichtungen war die Verfügbarkeit bestehender numerischer Modelle. Die Wahl fiel auf einen Kleinwagen (Masse 1.190 kg) eines japanischen Herstellers aus dem Bauzeitraum 2005–2011, welcher in ähnlicher Form auch in Deutschland verbreitet ist, und einen großen SUV (Masse 2.106 kg) eines US-Herstellers, Bauzeitraum 2001–2010, der zeitweise auch auf dem europäischen Markt angeboten wurde. Der Unterauftragnehmer des Forschungsprojektpartners steuerte das Modell einer einfachen Stahlschutzplanke (ESP) bei und modellierte eine Betonschutzwand als steife Barriere mit New Jersey-Profil.

5.6 Crashversuche gegen Schutzeinrichtungen

Alle drei Crashversuche wurden in Anlehnung an die Anprallprüfung TB 32 mit einer Geschwindigkeit von 110 km/h und unter einem Winkel von 20° durchgeführt. Damit sind mittelbare Vergleiche sowohl zwischen Schutzplanke und Schutzwand möglich (Kleinwagen gegen Schutzplanke versus Kleinwagen gegen Schutzwand) als auch zwischen Kleinwagen und SUV (Kleinwagen gegen Schutzplanke versus SUV gegen Schutzplanke). Ergänzend war auf dem Fahrersitz ein Hybrid III-Dummy („50th percentile male“) mit Instrumentierung zur Erfassung der Beschleunigungen in allen drei Achsenrichtungen in Kopf, Brust und Becken platziert und mit dem fahrzeugeigenen Dreipunktgurtsystem gesichert. Alle fahrerseitigen Airbags und der Gurtstraffer waren aktiv: beim Kleinwagen sowohl der Fahrerairbag und Knieairbag als auch der Thorax-Seitenairbag in der Sitzlehne und der Vorhangairbag vor den Seitenfenstern. Der SUV verfügte lediglich über Frontairbags.

Als Schutzplanke kam ein ESP-System mit Pfostenabständen von 2 m zum Einsatz, beim Schutzwandanprall ein voll fundamentiertes System in Ortbetonbauweise mit New Jersey-Profil und 81 cm Bauhöhe.

Beim Anprall des Kleinwagens (Masse Testfahrzeug 1.100 kg) gegen die Schutzplanke (Anhang A) wurden der Holm um maximal 0,95 m seitlich deformiert und mehrere der Pfosten vom Holm abgerissen, bevor das Fahrzeug mit einer Restgeschwindigkeit von 57 km/h wieder auf die Fahrbahn zurückgeführt wurde. Der Dummy wurde durch den Anprall nach schräg links vorne ausgelenkt und kontaktierte mit dem Kopf die Seitenscheibe der Fahrertür. Der Fahrer- und der Knieairbag wurden ausgelöst, vermutlich als das linke Vorderrad an einem letzten Pfosten verhakte und abriss, aber so spät, dass der seitlich ausgelenkte Dummy-Kopf den Fahrerairbag verfehlte. Alle am Dummy gemessenen Belastungswerte blieben deutlich unterhalb der gängigen Grenzwerte; der Fahrzeuganprall selbst gegen die Schutzplanke war hinsichtlich der Prüfanforderungen in die Anprallheftigkeitsstufe A einzuordnen, der ASI-Wert betrug 0,73.

Der Anprall des SUV (Masse Testfahrzeug 2.100 kg) gegen die Schutzplanke (Anhang B) führte zu einer seitlichen Durchbiegung des Holms von 1,53 m, die Restgeschwindigkeit beim Abprall lag bei 64 km/h. Der Dummy-Kopf kontaktierte die Seitenscheibe geringfügig. Der Fahrerairbag wurde beim Schutzplankenanprall nicht ausgelöst, wobei dieser aufgrund eines technischen Problems im Vorfeld möglicherweise nicht aktiv gewesen war. Die Belastungswerte am Dummy blieben aber deutlich unterhalb der Grenzwerte; der Anprall an der Schutzplanke war mit Anprallheftigkeitsstufe A und einem ASI-Wert von 0,54 im Sinne der Prüfanforderungen ebenfalls unkritisch.

Der Anprall des Kleinwagens (Masse Testfahrzeug 1.100 kg) gegen die Betonschutzwand (Anhang C) blieb an dieser ohne Schäden und dynamische Deformation. Das Fahrzeug stieg an der Schutzwand zunächst auf, verlor mit allen Rädern den Bodenkontakt und wurde anschließend mit einer Restgeschwindigkeit von knapp 93 km/h von dieser abgelenkt. Der Dummy verfehlte wiederum den Fahrerairbag und prallte mit dem Kopf gegen die Seitenscheibe, sodass diese zerbarst. Mit einem HIC 15-Wert von 490 und einer Beschleu-

© GDV 2022

nigung am Kopf (3 ms-Maximum) knapp unterhalb des Grenzwerts von 80 g zeigten sich damit gerade noch akzeptable Werte, während Brust- und Beckenbeschleunigung unkritisch blieben. Mit einem ASI von 2,3 und einer Anprallheftigkeit oberhalb von Stufe C war auch der Fahrzeuganprall gegen die Schutzwand deutlich intensiver als gegen die Schutzplanke. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Betonschutzwand eine deutlich höhere Aufhaltestufe aufweist als die einfache Schutzplanke; ein Umstand, der beim Vergleich der Anprallbelastungen zu berücksichtigen ist.

5.7 Rechnerische Simulation

Von den beiden frei verfügbaren Fahrzeugmodellen des SUV und des Kleinwagens wies nur der letztere auch einen Innenraum mit Sitzen auf, Ausstattungsmerkmale wie Sicherheitsgurt und Airbag waren jedoch nicht enthalten. Das Modell wurde nach Vorbild des im Crashversuch verwendeten Fahrzeugs angepasst und um notwendige Ausstattungen, wie einen Dreipunkt-Sicherheitsgurt, ergänzt. Da der Crashversuch gezeigt hatte, dass die Seitenairbags nicht ausgelöst wurden und der Einfluss der Frontairbags auch wegen der späten Zündung in der Anprallphase weitgehend ohne Wirkung auf den Insassen blieb, wurde auf deren Modellierung verzichtet. Für den Dummy kam ein kommerziell verfügbares numerisches Modell zur Anwendung, das auf dem Fahrersitz „platziert“ wurde, sodass außer der genauen Nachbildung der Karosseriestruktur auch ein generischer, aber ausreichend naturgetreu modellierter Innenraum einschließlich eines Insassen zur Verfügung stand – allerdings beschränkt auf den Bereich des Fahrersitzplatzes. In diesem relevanten Bereich zeigte eine Vermessung der realen Innenraumgeometrien, dass sich Kleinwagen und SUV diesbezüglich stark ähneln (Abb. 12). Weil das verfügbare Modell des SUV ursprünglich über keinerlei Nachbildung des Innenraums verfügte, wurde der generische Innenraum, welcher im Kleinwagen-Simulationsmodell den Raum um den Fahrersitzplatz darstellt, auch in den SUV implementiert.

Beide Fahrzeugmodelle wurden anschließend anhand der Daten und des Bildmaterials aus den Crashversuchen validiert, das heißt, es wurde eine Detailanpassung der Modelle vorgenommen, um eine möglichst gute Aussage zwischen Versuch und Modellverhalten zu erzielen. Im Falle des Kleinwagens wurde zusätzlich eine zweite Validierung auf Grundlage des Anprallversuchs gegen die Schutzwand vorgenommen, welche unter anderem auch die Anpassung der Reibkennung zwischen Karosserieblech und Reifen mit der Betonstruktur beinhaltete. Damit standen drei Gesamtmodelle für Fahrzeug, Insasse, Schutzeinrichtung und Umgebung zur Verfügung, die eine gute Übereinstimmung der prognostizierten Werte sowohl für die eigentliche Anprallprüfung (ASI, THIV, Wirkungsbereich ...) als auch die biomechanischen Belastungen am Dummy (Maximalwerte der Beschleunigungen an drei Körperregionen) mit den in Crashversuchen gewonnenen Wer-

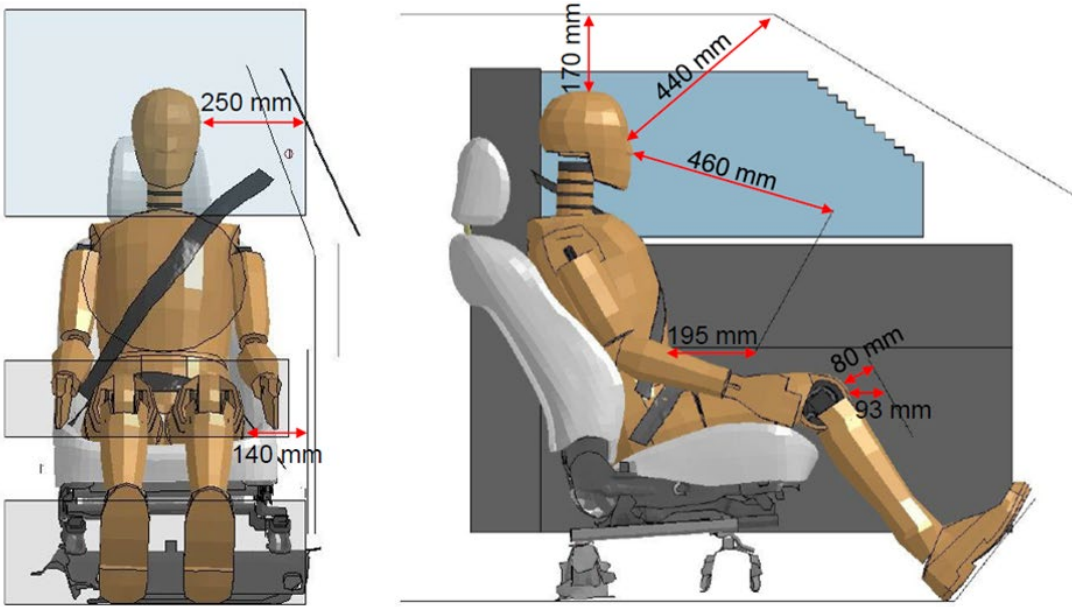


Abbildung 12 · Position des Hybrid III-Dummys im generischen Fahrzeuginnenraum

ten aufwiesen. Basierend auf diesen Modellen ließen sich die Anprallbedingungen und die Konstruktion der Schutzeinrichtungen variieren und Trendaussagen zu den Effekten auf die Fahrzeugkinematik und Insassenbelastungen treffen. Einen tabellarischen Überblick gibt Anhang D.

5.7.1 Variation von Anprallgeschwindigkeit und -winkel beim Schutzplankenanprall

Die Verringerung der Anprallgeschwindigkeit von 110 km/h auf 80 km/h führt bei gleichbleibendem Anprallwinkel von 20° beim Kleinwagen zur Reduktion des ASI-Werts um ein Drittel und für die theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfes (THIV) um 17 Prozent. Die maximalen Belastungen auf Thorax und Becken steigen dagegen etwas an. Ein auf 8° verkleinerter Anprallwinkel bei 80 km/h Geschwindigkeit vermindert den ASI erneut um ein Drittel und den THIV um die Hälfte. Die biomechanischen Belastungen sinken ebenfalls deutlich. Diese Trends zeigen sich auch beim Anprall des SUV gegen die Schutzplanke.

5.7.2 Schutzplankenanprall bei niedrigerer Einbauhöhe

Um die Auswirkungen einer zu niedrig eingebauten Schutzplanke, die beispielsweise durch Erhöhung der Fahrbahndecke bei gleichbleibender Schutzplanke im Bankett entstehen könnte, zu untersuchen, wurde die ESP-Schutzplanke im Modell mit 60 cm Bauhöhe statt 75 cm dargestellt. Dies führte beim Anprall des Kleinwagens mit 110 km/h unter einem Winkel von 20° zu einer deutlich verstärkten Rollbewegung, verbunden mit dem Abheben von drei Rädern. Der SUV drückte die Schutzplanke unter diesen Bedingungen nieder und geriet über die Schutzplanke. Diese instabilen Bewegungsabläufe (Abb. 13) lassen ein deutlich höheres Verletzungsrisiko im Anschluss an die Schutzplankenkollision erwarten. Auf eine Insassensimulation wurde hier wegen der komplexen Kinematik aber verzichtet.

5.7.3 Schutzplankenanprall bei steiferer Schutzplanke

Steifere Schutzplanken können sinnvoll sein, wo sich feste Objekte dicht hinter der Schutzeinrichtung befinden und andernfalls die Gefahr besteht, dass der Holm beim Anprall so weit ausgelenkt wird, dass das Fahrzeug letztlich auf das Objekt durchschlägt. Bei der Modellvariation wurden die Pfostenabstände der Schutzplanke von 2 m auf 1 m verringert, um dadurch die dynamische Durchbiegung beim Anprall zu reduzieren. Bei 110 km/h und 20° wurde der Wirkungsbereich dadurch beim Kleinwagenanprall um 19 Prozent reduziert, für den SUV-Anprall um etwa 27 Prozent, während sich ASI, THIV und die Belastungen auf den Insassen besonders des Kleinwagens nur geringfügig änderten.

5.7.4 Variation des Wandprofils beim Schutzwandanprall

Das New Jersey-Profil ist im Bestand von Betonschutzwänden zwar noch häufig zu finden, bei Neubauprojekten werden aber zunehmend abweichende Profilformen verwendet, bei denen der Fuß etwas flacher ansteigt. Entsprechend dieses aktuellen Profils wurde das Modell der Schutzwand abgewandelt, um einen Einfluss auf Fahrzeugkinematik und die Anprallbelastungen zu identifizieren. Für den Kleinwagen zeigt sich in der Anprallsimulation bei 110 km/h und 20° lediglich ein geringfügig stärkeres Aufsteigen an der Schutzwand gegenüber dem New Jersey-Profil, aber keine merkliche Reduktion von ASI, THIV und Insassenbelastungen (Anhang E).

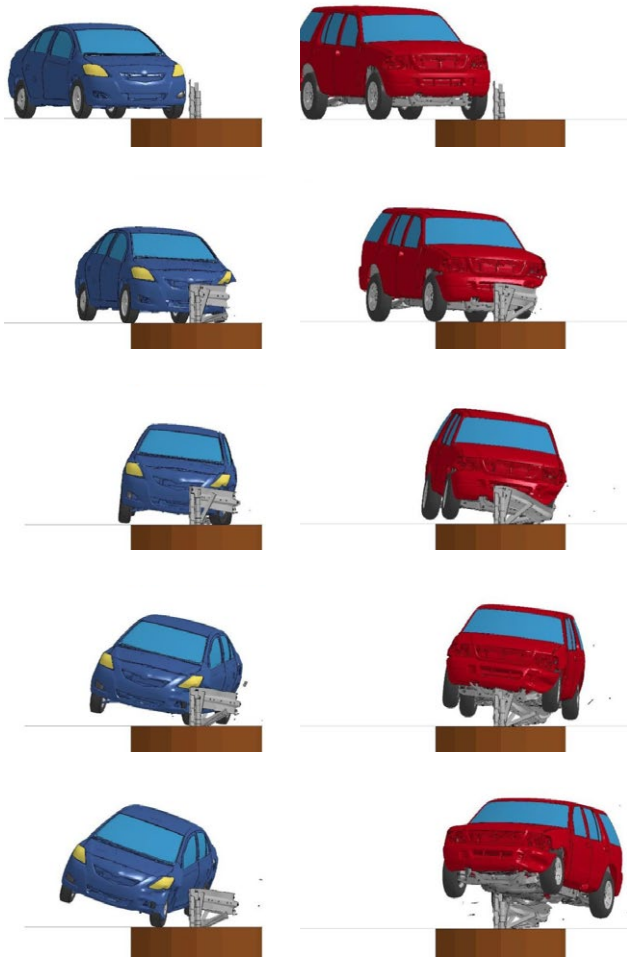


Abbildung 13 · Auswirkung zu niedrig eingebauter Schutzplanke auf Fahrzeugkinematik (li.: Kleinwagen, re.: SUV)

© GDV 2022

5.7.5 Variation des Anprallwinkels beim Schutzwandanprall

Basierend auf dem Simulationsmodell des neuen, aktuellen Profils wurde – unter Beibehaltung der Anprallgeschwindigkeit von 110 km/h – der Anprallwinkel auf 8° verringert. Dadurch reduzieren sich der ASI um ein Drittel und der THIV um mehr als die Hälfte. Auch die Insassenbelastungen sinken dadurch beim Schutzwandanprall um etwa 80 Prozent, aber der Kleinwagen führt beim Anprall und der anschließenden Flugphase eine verstärkte Rollbewegung aus und hat bei Kontaktende mit der Schutzwand immer noch eine Geschwindigkeit von 104 km/h (Abb. 14). Die Tendenz zum anschließenden Überschlag steigt dadurch weiter an. Eine gegenüber diesen Anprallbedingungen auf 130 km/h gesteigerte Anprallgeschwindigkeit verschärft das Überschlagrisiko zusätzlich und erhöht, wenngleich auf recht niedrigem Niveau, die Beschleunigungsbelastungen für Kopf und Becken.

5.7.6 Aussagekraft von ASI und THIV für biomechanische Belastungen

In neun der insgesamt elf durchgeführten Simulationsläufe mit Schutzplankenanprall wurden auch die Insassenbelastungen für den Fahrer berechnet. Diese wurden mit den ebenfalls vorliegenden ASI- und THIV-Werten verknüpft, um einen eventuellen Zusammenhang zu identifizieren. Die lineare Regression durch die Datenpunkte zeigt allerdings allenfalls einen schwachen Zusammenhang der maximalen Brust- und Beckenbeschleunigungswerte mit ASI und THIV. Mit Beschleunigungsbelastungen des Kopfes und dem Head Injury Criterion HIC korrelieren diese nicht. Als Kriterium, um die Insassengefährdung beim Anprall eines Fahrzeugs gegen eine Schutzeinrichtung abzuschätzen, erweisen sich ASI und insbesondere der THIV, der vom Konzept her eigentlich eine Abschätzung der Kopfbelastung ermöglichen sollte, somit als ungeeignet.

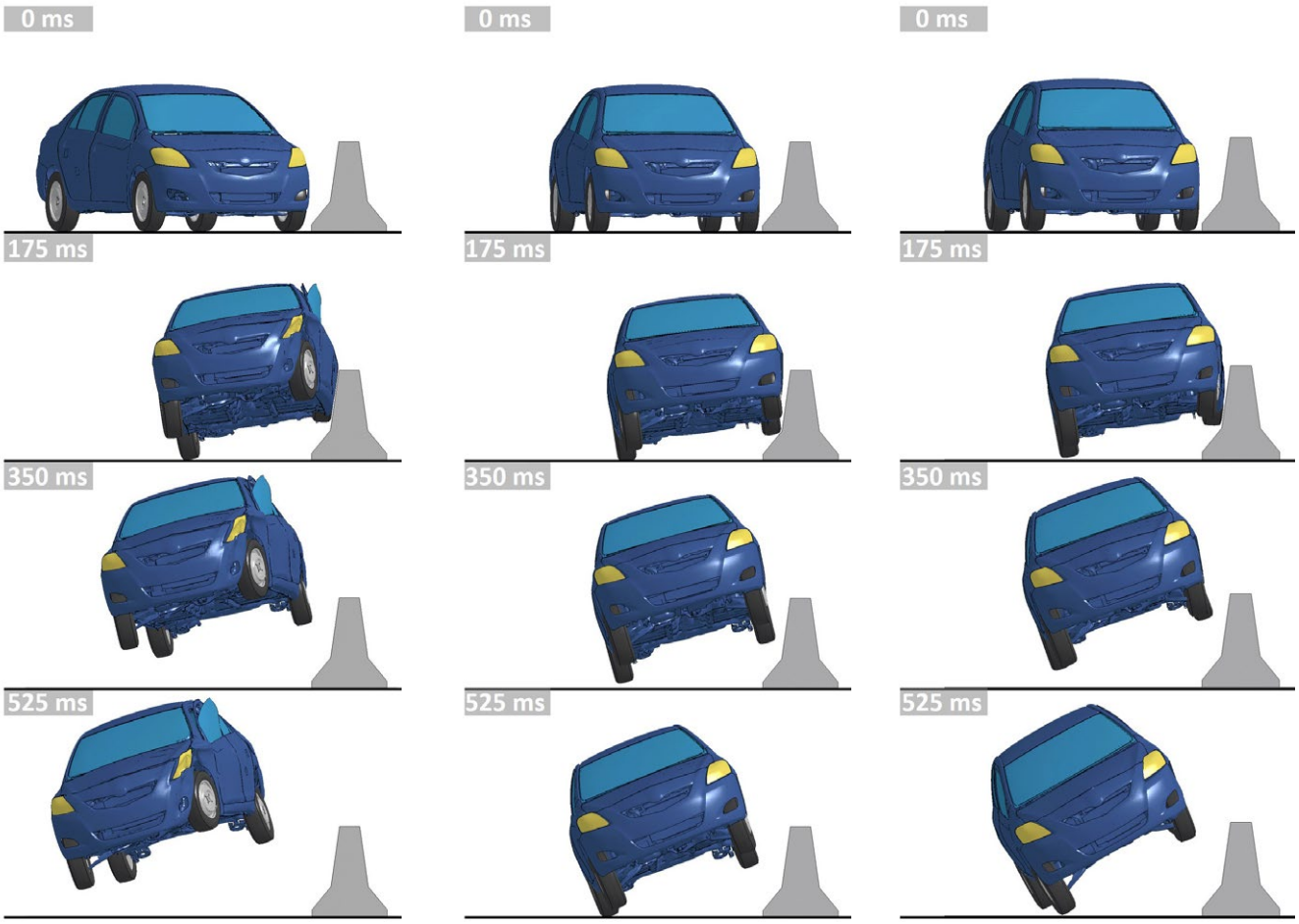


Abbildung 14 · Fahrzeugkinematik für drei Anprallkonstellationen des Kleinwagens gegen aktuelles Schutzwandprofil

6. Fazit und Schlussfolgerungen

Sogenannte passive Schutzeinrichtungen (PSE) gehören insbesondere im Außerortsbereich zu den etablierten Maßnahmen der Straßeninfrastruktur, um bei Abkommen von der Fahrbahn gefährliche Kollisionen mit Hindernissen im Seitenraum zu verhindern oder den Zusammenstoß mit Verkehrsteilnehmern auf der Gegenfahrbahn zu unterbinden. Damit wurde in den vergangenen Jahrzehnten ein erheblicher Beitrag zur Verkehrssicherheit und Verringerung der Anzahl Getöteter und Schwerverletzter gerade in Pkw geleistet. In diesem Rahmen wurde auch eine Vielzahl von Varianten von Betonschutzwänden und insbesondere Stahlschutzplanken auf den Markt gebracht, um verschiedensten Anforderungen gerecht zu werden. Dabei besteht immer ein Zielkonflikt zwischen der gewünschten Aufhaltewirkung einerseits, um Bauwerke oder andere Verkehrsteilnehmer vor einer Kollision zu schützen, und dem Abbau der Bewegungsenergie des anprallenden Fahrzeugs in „verzeihender Manier“, um dessen Insassen einem möglichst geringen Verletzungsrisiko auszusetzen und das Fahrzeug anschließend noch kontrollierbar zu halten.

Die Anprallprüfungen für Schutzeinrichtungen und die darin festgeschriebenen Kriterien haben sich allerdings in den vergangenen Jahrzehnten kaum verändert, während sich im selben Zeitraum die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte auf den Straßen wandelte, Crashtest-Verfahren zur Bewertung des Insassenschutzes von Personenwagen ständig weiterentwickelt und ausgeweitet wurden und so deutliche Verbesserungen der Fahrzeugsicherheit bewirkten. Vor diesem Hintergrund war es Aufgabe des beschriebenen Forschungsprojekts, Schutzeinrichtungen neben der Fahrbahn hinsichtlich des Schutzes von Pkw-Insassen kritisch zu beleuchten. Dafür wurden Daten aus dem realen Unfallgeschehen ausgewertet und mit Crashtests und rechnerischer Simulation Möglichkeiten aufgezeigt, um veränderte Randbedingungen bei Anprallprüfungen besser berücksichtigen zu können.

Folgende wesentliche Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt lassen sich formulieren:

Bei Zertifizierungstests von PSE nach DIN EN 1317 werden regelmäßig alte und leichte Pkw-Modelle eingesetzt. Die verwendeten Fahrzeuge repräsentieren häufig nicht die aktuelle Fahrzeugflotte mit ihren leistungsfähigen Insassenschutzmaßnahmen. Gleichzeitig gibt es eine Entwicklung hin zu größeren und schwereren Pkw, welche aktuell durch keine Anprallprüfung abgedeckt wird. Daher sollte für die Zertifizierungstests eine Anpassung der Fahrzeugspezifikationen erfolgen.

Mit ihren weiterentwickelten Insassenschutzkomponenten, wie Gurten und Airbags, und festeren Crashstrukturen haben moderne Fahrzeuge zusätzliches Potenzial, die Insassenbelastung auch bei schwereren Kollisionen auf ein erträgliches Maß zu reduzieren und das Verletzungsrisiko zu minimieren. Allerdings werden Gurtstraffer und Airbags beim Anprall gegen PSE offenbar zum Teil nicht oder zumindest verzögert ausgelöst, sodass es zu eigentlich vermeidbaren Kontakten von Insassen mit Innenraumstrukturen kommen kann. Auslösealgorithmen für diese Schutzsysteme sollten daher auch für Kollisionen mit PSE ausgelegt werden.

Der Acceleration Severity Index (ASI) korreliert kaum mit den biomechanischen Belastungen. Er zeigt bei variierenden Anprallbedingungen zwar die gleichen Tendenzen wie die Beschleunigungen an Becken und Brust, ist aber kein guter Prädiktor. Die alleinige Messung der Beschleunigungen am Fahrzeugschwerpunkt und die Berechnung des ASI spiegeln den Effekt moderner Insassenschutzsysteme auf die resultierende Insassenbelastung unzureichend wider.

Mithilfe numerischer Simulation ließen sich die Fahrzeugbewegung und Belastungen auf den Fahrer gut prognostizieren. Der Einfluss von Airbags auf den Insassenschutz ließ sich im Forschungsprojekt nicht berücksichtigten, da diese im Anpralltest nicht beziehungsweise zu spät auslösten. Der Einsatz numerischer Simulation bei der Prüfung und Zertifizierung von PSE erscheint machbar. So ließen sich Optimierungen der Systeme auch hinsichtlich realistischerer und vielfältigerer Anprallbedingungen vornehmen, ohne die Anzahl und Kosten von physischen Anprallversuchen zu vervielfachen. Darüber hinaus kann so flexibler auf eine sich verändernde Fahrzeugflotte reagiert werden.

Moderne Fahrzeuge bieten ein höheres Schutzniveau für ihre Insassen und verkraften höhere Anprallkräfte und -beschleunigungen als die derzeit noch in Abnahmetests verwendeten Pkw-Modelle. Dies eröffnet Möglichkeiten, steifere PSE mit einem höheren Widerstand gegen Durchbiegung einzusetzen und damit den Wirkungsbereich zu reduzieren, wo es aufgrund der örtlichen Gegebenheiten (z.B. dicht neben der Fahrbahn befindliche starre Hindernisse) sinnvoll ist.

© GDV 2022



Bei gleichen Anprallbedingungen hat der Anprall gegen eine Betonschutzwand eine stärkere Fahrzeugdeformation, höhere ASI- und THIV-Werte, höhere biomechanische Belastungen und eine höhere Restgeschwindigkeit bei Ende des Kontakts mit der PSE zur Folge als der Anprall gegen eine einfache Schutzplanke. Dies zeigt aber nur einen Trend auf: Weil sich die Systeme auch hinsichtlich der Aufhaltestufen stark unterscheiden, ist ein unmittelbarer Vergleich der Werte nicht aussagekräftig. Wie sich diese Werte beim Anprall gegen eine Schutzplanke mit vergleichbar hoher Aufhaltestufe wie eine Schutzwand darstellen würden, lässt sich im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts in Ermangelung entsprechender Versuche und Simulationsmodelle nicht beantworten.

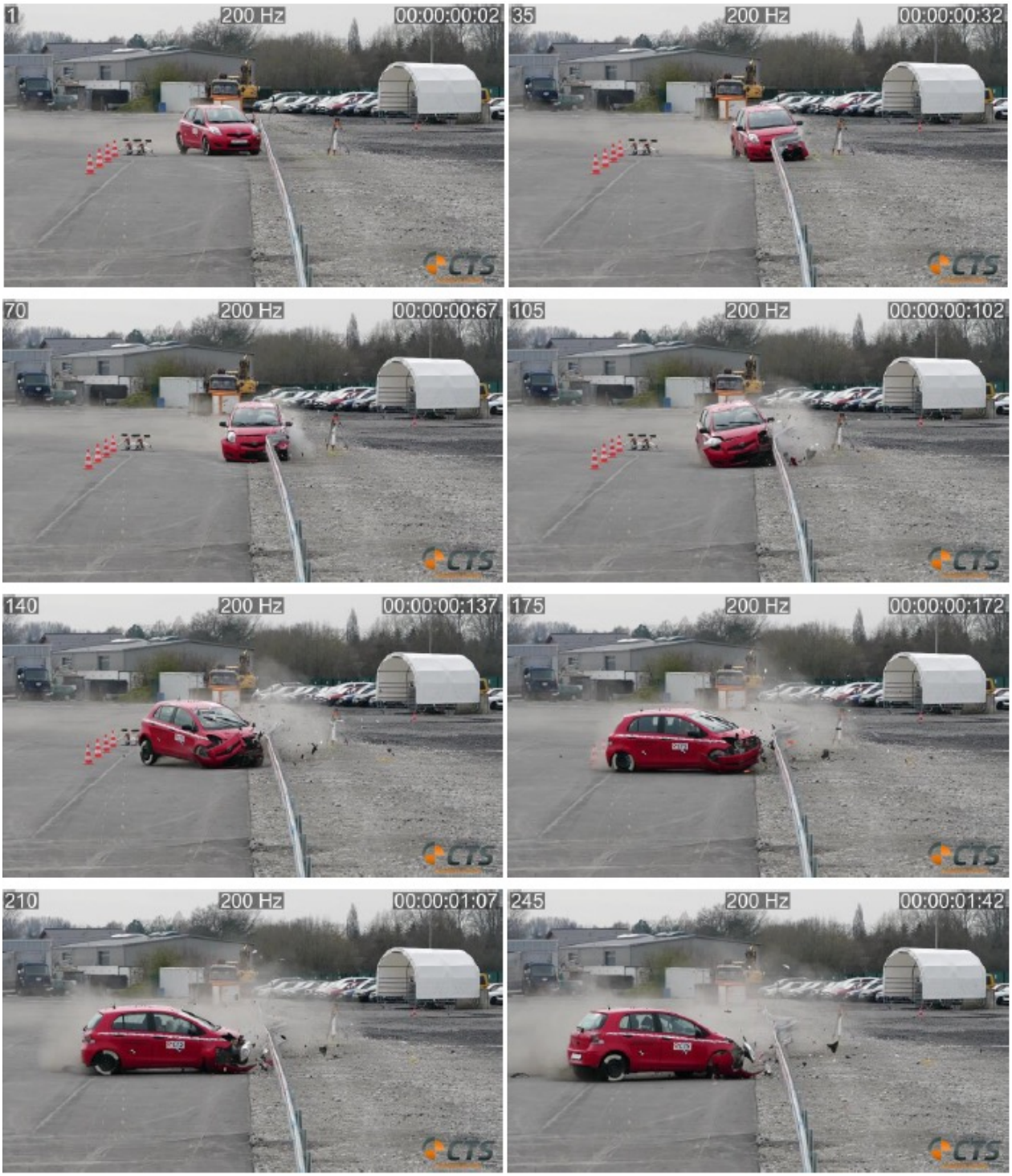
Die Crashversuche, die numerischen Simulationen und Unfalldaten zu Schutzwandanprallen liefern Hinweise, dass kleinere Anprallwinkel und höhere Anprallgeschwindigkeiten das Risiko erhöhen, dass ein Pkw an der Schutzwand aufsteigt und in Schräglage wieder auf der Fahrbahn aufkommt. Dadurch steigt auch das Risiko für einen anschließenden Überschlag. Auch ein hartes Auftreffen auf der Fahrbahn nach der Flugphase birgt prinzipiell ein Verletzungsrisiko, beispielsweise durch Stauchung der Wirbelsäule, lässt sich aber schwer quantifizieren.

Für die getesteten PSE-Systeme bewirkt die Deformation der Schutzplanke eine stärkere Reduktion der kinetischen Fahrzeugenergie im Vergleich zum Schutzwandanprall, wodurch die Abprallgeschwindigkeit deutlich niedriger ausfällt. Dennoch empfiehlt sich für beide Anprallszenarien ein automatisches Abbremsen des Fahrzeugs nach PSE-Anprall durch ein fahrzeugseitiges Sicherheitssystem, um die Gefahr von Folgekollisionen, auch mit anderen Verkehrsteilnehmern, zu mindern.

Anhang

Anprallversuch mit Kleinwagen gegen Stahlschutzplanke (ESP)

Anhang A· bei 110 km/h, 20°, Bildsequenz (0 ms bis 1225 ms)



© GDV 2022

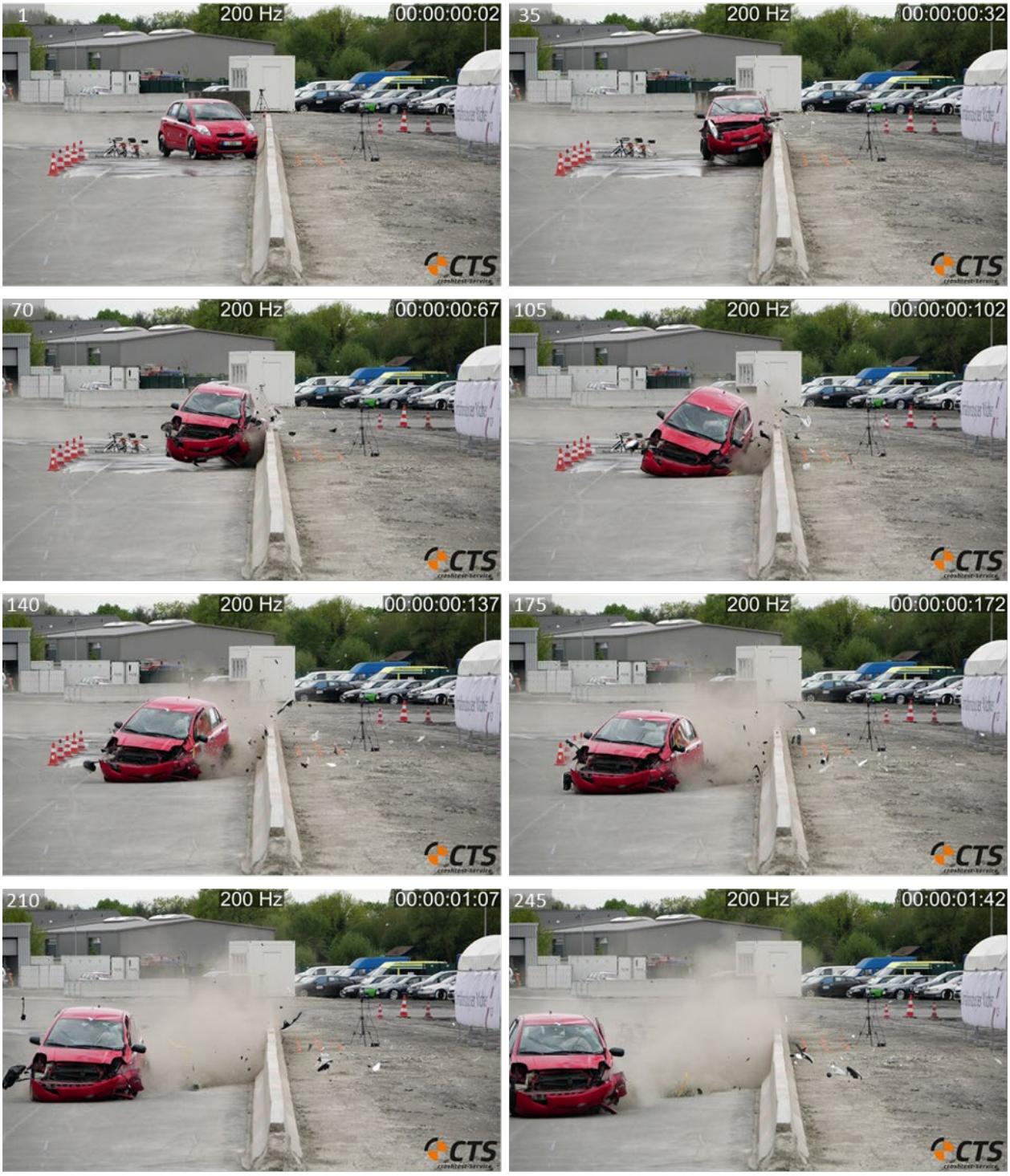
Anprallversuch mit SUV gegen Stahlschutzplanke (ESP)

Anhang B · bei 110 km/h, 20°, Bildsequenz (0 ms bis 1225 ms)



Anprallversuch mit Kleinwagen gegen Betonschutzwand (New Jersey 81)

Anhang C · bei 110 km/h, 20°, Bildsequenz (0 ms bis 1225 ms)



© GDV 2022

Ergebnisse der numerischen Simulationen mit Schutzplankenanprall

Anhang D

Nr.	Winkel / Geschwindigkeit	Fahrzeug	PSE	ASI	THIV	Wirk.-bereich W_m	Normalis. Wirk.-bereich	Max. Kopf-Beschl. (3 ms)	HIC 15	Max. Brust-Beschl. (3 ms)	Max. Becken-Beschl. (3 ms)
	[°] / [km/h]			[-]	[km/h]	[m]	[m]	[g]	[-]	[g]	[g]
1	20/80	Kleinwagen	ESP	0,60	19,4	0,71	n.b.	55,8	187	20,1	18,4
2 [1]	**20/110**	**Kleinwagen**	**ESP**	**0,85**	**23,4**	**0,86**	**1,00**	**61,1**	**213**	**16,7**	**12,4**
3	8/80	Kleinwagen	ESP	0,37	13,4	0,24	n.b.	47,6	364	10,3	5,0
4	20/50	Kleinwagen	ESP	0,46	15,7	0,33	n.b.	43,6	249	12,6	5,3
5	8/80	SUV	ESP	0,24	12,6	0,37	n.b.	21,5	28	6,9	6,1
6 [1]	**20/110**	**SUV**	**ESP**	**0,58**	**18,5**	**1,43**	**1,03**	**20,1**	**21**	**13,8**	**16,0**
7	8/130	Kleinwagen	ESP	0,54	19,2	0,46	n.b.	45,4	137	15,9	19,0
8	20/110	Kleinwagen	ESP, niedrig	0,74	25,3	0,82	0,96	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
9	20/110	SUV	ESP, niedrig	x	x	x	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
10	20/110	SUV	ESP, steif	0,67	23,6	1,04	0,76	31,4	35,4	17,6	19,0
11	20/110	Kleinwagen	ESP, steif	0,81	25,8	0,70	0,81	53,1	197	17,6	20,1

1 analog zum Realversuch

x kein Wert berechenbar, Abbruch der Simulation, n.b. – Wert nicht berechnet

Ergebnisse der numerischen Simulationen mit Schutzwandanprall

Anhang E

Nr.	Winkel / Geschwindigkeit	Fahrzeug	Schutzwand	ASI	THIV	Max. Kopf-Beschl. (3 ms)	HIC 15	Max. Brust-Beschl. (3 ms)	Max. Becken-Beschl. (3 ms)	Abprall-geschwindigkeit
	[°] / [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	aktuelles Profil	2,3	35	75	508	73	55	95
14/14a	8/110	Kleinwagen	aktuelles Profil	0,7	15	36	79	20	9	104
15/15a	8/130	Kleinwagen	aktuelles Profil	0,9	17	45	134	17	13	122
16/16a	20/80	Kleinwagen	aktuelles Profil	1,4	25	57	323	29	26	66

LITERATUR

[1] Bundesanstalt für Straßenwesen: „Schutzeinrichtungen an Straßen – Einsatz von Fahrzeug-Rückhaltesystemen in Deutschland vor dem Hintergrund europäischer Normen", Internet-Download: https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v4-schutzeinrichtungen/schutzeinrichtungen.html

[2] 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.

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

[4] 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.

[5] AAAM: „Abbreviated Injury Scale (AIS) 2005 – Update 2008", Association for the Advancement of Automotive Medicine, Barrington, IL, USA.

[6] Ziegler, J., Unger, T., Spitzhüttl, F.: „Anforderungen an Schutzeinrichtungen neben der Fahrbahn", Forschungbericht Nr. 83, Unfallforschung der Versicherer, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., Berlin, 2022.

© GDV 2022

GDV
Unfallforschung
der Versicherer

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.
Wilhelmstraße 43 / 43 G, 10117 Berlin
Postfach 08 02 64, 10002 Berlin
Tel. 030 2020-5000, Fax 030 2020-6000
www.gdv.de, berlin@gdv.de