

Interdisziplinäre Weiterentwicklung eines optimierten biofidelen Dummys als Fußgänger-Surrogat bei Full-Scale Crashtests

PD Dr. med. Sven Hartwig¹, Mirko Knappe², Andreas Kunze², Dr. Michael Weyde^{2*}

¹ Institut für Rechtsmedizin der Charité Berlin, Germany

² Priester & Weyde, Germany



Gehaltener Beitrag
auf der EVU-Tagung
2017 in Haarlem

*Corresponding author; e-mail: berlin@unfallgutachter.de

Abstract

In den letzten 7 Jahren wurde im Institut für Rechtsmedizin an der Charité Berlin der Großteil der getöteten Verkehrsunfallopfer nicht nur obduziert, sondern standardisiert unter Verwendung eines Multislice Computertomographen (MSCT) radiologisch untersucht. Seit etwa derselben Zeit werden schwere Verkehrsunfälle in Berlin von der Polizei in einer Qualität aufgenommen, wie man es sonst nur bei Verbrechenstaten kannte. Hierzu werden die speziell ausgebildeten Verkehrspolizisten bei Unfällen mit getöteten Personen des Weiteren von Unfall-Sachverständigen unterstützt. Hierdurch konnten einerseits umfangreiche Unfalldaten und damit einhergehende Verletzungsinformationen erfasst und andererseits in Korrelation gebracht werden. Diese Erkenntnisse wurden bei der Weiterentwicklung des biofidelen Dummys (BD-Dummy) berücksichtigt, damit dieser nicht nur wie bei den zuvor im Ing.-Büro Priester & Weyde entwickelten ersten beiden Prototypversionen des BD-Dummy realistische Schäden an den Fahrzeugen bei Crashversuchen erzeugt, sondern auch solche Schäden am Dummy verursacht werden, die Aufschluss über zu erwartende Verletzungen bei Fußgängern geben bzw. die Verletzungswahrscheinlichkeit in Zukunft ggf. bestimmen lassen könnten. Der weiterentwickelte BD-Dummy wurde bereits in mehreren Crashversuchen eingesetzt, bei denen unter anderem auch Realunfälle nachgestellt wurden. Die Unfallnachstellungen in Form von Kollisionsversuchen unter Verwendung des weiterentwickelten BD-Dummy erfolgten zum Teil in Kooperation mit Crashtest-Service.com, der Universität Zilina und der Polizei in den Niederlanden. Im Rahmen des Vortrages, der sich in drei Teile gliedert, werden einerseits einige Ergebnisse aus den durchgeführten Crashversuchen dargestellt und andererseits der aktuelle Entwicklungsstand des BD-Dummy präsentiert. Ferner werden die Erkenntnisse aus den computertomographischen Untersuchungen von getöteten Verkehrsunfallopfern, die einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklung des BD-Dummy hatten, von medizinischer Seite vorgestellt. In diesem Paper wird allerdings vorrangig nur die technische Entwicklung des biofidelen Dummys dargestellt

Zusammenfassung

Seit 2010 wird vom Ingenieurbüro Priester & Weyde in Kooperation mit dem Institut für Rechtsmedizin an der Charité in Berlin, sowie Studenten der TU Berlin, der HTW Dresden und der Universität Zilina ein biofideler Dummy als Fußgänger-Surrogat für Full-Scale-Crash-Tests entwickelt. Seit 2017 wird dieser Biofidel-Dummy bei Crash-Test-Service in Münster auch kommerziell produziert. Von Anfang an stand bei der Entwicklung dieses sogenannten BD-Dummy im Vordergrund, dass der Dummy als Surrogat für einen Menschen in der Lage ist, realistische Schäden an Crash-Fahrzeugen bei Kollisionsversuchen zu erzeugen. Um dies zu ermöglichen, wurden Ersatzwerkstoffe verwendet und zum Teil sogar erst entwickelt, die hinsichtlich ihrer Festigkeit und Elastizität mit menschlichem Knochen sowie Muskel- und Hautgewebe vergleichbar sind. Ferner wurde bei der Konstruktion der Knochen und Gelenke eine möglichst ähnliche Konstruktionsart angestrebt, wie sie beim menschlichen Vorbild vorliegt, und zwar nicht nur um die Beweglichkeit ähnlich den anthropomorphen

Eigenschaften zu ermöglichen bzw. auch einzuschränken, sondern um auch solche signifikanten Schäden am Dummy zu erzeugen, wie sie als typische Verletzungen an Knochen und Gelenkverbindungen des Menschen bei dem selben Anstoß äquivalent zu erwarten wären. Dazu wurden mehrere Kollisionsversuche durchgeführt und ausgewertet, wobei es sich zum Teil um forensische Nachstellungen von Realunfällen gehandelt hat. Dadurch konnten die Verletzungen der getöteten Fußgänger und Radfahrer bei den Realunfällen mit den Schäden an den bei den Nachstellungen verwendeten BD-Dummys verglichen werden. Hierdurch konnte der Biofidel-Dummy dahingehend weiterentwickelt werden, dass neben der Reproduzierbarkeit durch Verbesserungen in der Fertigungsqualität eine Optimierung der Biofidelität hinsichtlich der Beweglichkeit und der Dummy-Schäden erreicht werden konnte. Im Rahmen von Diplomarbeiten wurden dazu Prototypen des optimierten biofidelen Dummys produziert, in Crashversuchen getestet und hinsichtlich der entstandenen Fahrzeugschäden sowie der Fähigkeit, potenzielle Verletzungen als äquivalente Schäden wiederzugeben, bewertet. Die Versuche haben gezeigt, dass der Biofidel-Dummy hervorragend als Fußgänger- und/oder Radfahrer-Surrogat bei Kollisionsversuchen eingesetzt werden kann, da er zum einen realitätsnahe Schäden an den Versuchsfahrzeugen erzeugt und zum anderen auch selbst weitestgehend plausible Beschädigungen erlitten hat, die mit den bei einem Fahrzeug-Anprall gegen eine Person zu erwartenden Verletzungen zu vergleichen sind. Nichtsdestotrotz gibt es weitere Verbesserungsansätze, die durch kooperative Zusammenarbeit zwischen den technischen und medizinischen Hochschulen sowie dem Fertigungsunternehmen umgesetzt werden. Dies geschieht einerseits in Form der allgemeinen statistischen Erfassung und Auswertung von Verletzungen bei Realunfällen und andererseits durch das Nachstellen einiger Realunfälle im Rahmen von forensischen Untersuchungen, wobei anschließend ein Vergleich der konkreten Verletzungen mit den Dummy-Schäden aus den Nachstellungen erfolgt. Ziel ist es, einen biofidelen Dummy zu entwickeln, der in der Lage ist, die bei typischen Unfallkonstellationen mit sogenannten vulnerablen Verkehrsteilnehmern, also Fußgängern und Zweiradfahrern, zu erwartenden Verletzungen repräsentativ durch äquivalente Schäden am Dummy darzustellen, so dass in Zukunft belastbarere Aussagen hinsichtlich der Verletzungswahrscheinlichkeit durch Anwendung eines Biofidel-Dummy bei normierten Full-Scale-Crash-Tests möglich sind, als dies derzeit mit aus technischer und medizinischer Sicht durchaus fraglichen Komponententests (Head- / Leg-Impactor-Tests) der Fall zu sein scheint. Dabei zeigt die Auswertung der Kopf- und Thorax-Beschleunigungen bei Nachstellungen mit den bereits gebauten und getesteten Biofidel-Dummy, dass erwartungsgemäß die Sekundärkontakte mit der meist harten Fahrbahn in der Regel zu deutlich höheren Belastungen beim anthropomorphen Dummy führen, als der primäre Anprall gegen das Fahrzeug, so dass die Verwendung eines geeigneten Biofidel-Dummys in normierten Full-Scale-Crash-Tests möglicherweise in Zukunft auch zu ganz anderen, und zwar wirksameren Konstruktionen beim passiven und aktiven Schutz vulnerabler Verkehrsteilnehmer führen könnte.

Einleitung

Seit 2010 erfolgt durch diverse studentische Abschlussarbeiten [1] [2] [3] [4] [5] [6], die im Ingenieurbüro Priester & Weyde betreut wurden, die kontinuierliche Entwicklung eines biofidelen Dummys, der als Surrogat für angefahrene Personen bei forensischen Nachstellungen von Pkw-/Fußgänger- und Pkw-/Radfahrer-Kollisionen eingesetzt wird [7]. Der Vergleich mit dem bisher in der forensischen Unfallrekonstruktion in Europa überwiegend verwendeten Dummy der Universität Zilina bei Crash-Versuchen hat gezeigt, dass der Biofidel-Dummy nicht nur vergleichbare Wurfweiten

erzielt, sondern viel realistisch anmutende Beschädigungen an den Crashfahrzeugen erzeugt [8].

Von Anfang an war das Institut für Rechtsmedizin an der Charité Berlin in die Entwicklung des Biofidel-Dummys eingebunden. Denn dort wurden ebenfalls seit 2010 im Auftrag der Ermittlungsbehörden der überwiegende Teil der im Straßenverkehr in Berlin getöteten Personen computertomographisch untersucht. Die postmortalen computertomographischen Untersuchungen (pmMSCT) erfolgen mit einem

16-zeiligen Mehrschichtscanner vom Typ Toshiba Activion (Toshiba Medical Systems GmbH Neuss, Germany) mit einer Schichtdicke von 0,5 mm und einer Überlappung der Schichten von 0,3 mm. Diese Untersuchungen sind im Konsens mit den Ermittlungsbehörden inzwischen als Standard bei der Untersuchung tödlicher Verkehrsunfälle konsentiert.

Die pmMSCT ist ein hervorragendes ergänzendes Instrument zu herkömmlichen Untersuchungsverfahren und wird den hohen Anforderungen an eine objektive und exakte Befunddokumentation vollumfänglich gerecht. Die zerstörungsfreie Untersuchung erfolgt vor der manipulativen und destruktiven Autopsie. Die gewonnenen Daten stehen anders als das Untersuchungsobjekt selbst auch noch nach Jahren für die Klärung von aufkommenden Fragen zur Verfügung und bieten vielfältige Möglichkeiten der Verletzungserfassung, Verletzungsdokumentation und -darstellung sowie zur interdisziplinären Unfallrekonstruktion. So kann anhand des Bruchbildes und der Dislozierung von Knochen auf die Anstoßrichtung und Anstoßintensität geschlussfolgert werden, wie dies beispielhaft für eine Tibia-Fraktur nach Anprall eines Pkw dargestellt ist (vgl. Abbildung 2).



Abbildung 1: Darstellung der primären Anprallstelle in Form einer keilförmigen Unterschenkelfraktur (linke Tibia nach Anprall)

eines Pkw [im Bild von links]) mittels pmMSCT-Untersuchung

Die Verletzungen werden seit kurzem systematisch in einer hinsichtlich der personenbeziehbaren Daten anonymisierten Art und Weise erfasst, wobei in der Datenbank neben den üblichen Merkmalen und Merkmalsausprägungen der allgemeinen Unfallstatistik auch die auf den Körper an der konkreten Stelle einer Verletzung gewirkten anstoßbedingten Kräfte erfasst werden. Dies ist möglich, weil zu den jeweiligen Unfällen in der Regel auch unfallanalytische Gutachten vorliegen. Dadurch können die Kontakte der Fahrzeuge mit vulnerablen Verkehrsteilnehmern mittels des Mehrkörpersystems im Programm PC-Crash [9] simuliert werden. Hierdurch könnte es in Zukunft möglich sein, eine Korrelation zwischen den beim Anstoß gewirkten Kräften sowie der Art, Lage, Richtung und Intensität der resultierenden Verletzungen bei Verkehrsunfällen herzustellen.

Derzeit werden bereits die Ergebnisse von pmMSCT-Untersuchungen bei der Unfallanalyse berücksichtigt. Gerade dann, wenn ein vorliegender Real-Unfall durch einen Versuch nachgestellt werden muss, können die Ergebnisse der computertomographischen Untersuchung mit den Schäden an einem Dummy verglichen werden, sofern der als Surrogat für den verletzten bzw. ggf. auch getöteten Verkehrsteilnehmer verwendete Dummy hinsichtlich der Konstruktion sowie der Materialeigenschaften wie Festigkeit und Elastizität vergleichbar mit seinem anthropomorphen Vorbild ist.

Da die heutzutage in der Automobilindustrie eingesetzten Dummys, welche hauptsächlich zum Messen von biomechanischen Belastungsgrößen dienen, nicht bei einem Anprall bleibend beschädigt werden sollen, sind derartige Dummys konstruktiv weder geeignet, realistische Schäden an Fahrzeugen zu erzeugen, wenn sie als Fußgänger- oder Radfahrer-Surrogat von einem Pkw angefahren

werden, noch entstehen an den bisher in der Industrie üblicherweise verwendeten Dummys Schäden, die mit den zu erwartenden Verletzungen eines Menschen unter denselben Anstoßbedingungen zu vergleichen wären [10].

Es besteht somit Bedarf an einem kostengünstigen und vor allem biofidelen Dummy, welcher auch in forensischen Kollisionsversuchen eingesetzt werden kann. Daher wurde im Ingenieurbüro Priester & Weyde in Berlin ein solcher Dummy im Rahmen von studentischen Arbeiten entwickelt und getestet. Ziel der Entwicklung war es, möglichst realitätsnahe Schäden am Fahrzeug zu erzeugen, um diese später als Referenz in der Unfallrekonstruktion verwenden zu können. Mit der weiterführenden Entwicklung des Dummys sollen nunmehr auch Verletzungen des Fußgängers durch Erzeugen von äquivalenten Schäden simuliert werden können. Um die Anwendbarkeit dieses Biofidel-Dummys feststellen bzw. prüfen zu können, wurden bereits Crashversuche durchgeführt und die dabei festgestellten Daten mit den Werten aus der Fachliteratur verglichen [11] [12] [13] [14].

Entwicklung des optimierten BD-Dummys

Der Biofidel-Dummy von Priester & Weyde, kurz BD-Dummy, orientiert sich am 50-Perzentil-Mann und weist damit eine Gesamthöhe von rund 175 cm sowie eine Masse von 78 kg auf. In der aktuellsten Generation wurde das Skelett des BD-Dummy deutlich überarbeitet und stärker dem anatomischen Skelett des Menschen angepasst [6]. Während in den ersten Generationen des BD-Dummy der Skelett-Apparat durch Holz nachgebaut wurde, werden die Knochen inzwischen aus einem Mehrkomponenten-Materialwerkstoff hergestellt. Dies hat den Vorteil, dass die Ergebnisse reproduzierbar sind, was bei Holz aufgrund seiner allotrop-artigen Eigenschaften nicht möglich ist. Nach umfangreichen Literaturrecherchen zu konkreten Knochenfestigkeiten sowie den

biomechanischen Eigenschaften des menschlichen Knochengewebes wurde ein Kompositwerkstoff als Ersatz für menschliches Knochenmaterial entwickelt und getestet [5]. Dabei spielen neben dem Bruchverhalten des Materials auch die Form und die Abmaße der Knochen eine entscheidende Rolle für die Entwicklung des biofidelen Dummys. Anhand der gewonnenen Daten wurde ein als geeignet angesehenes 3D-Knochenmodell konstruiert und mit den Materialkennwerten des neuen Knochenersatzmaterials dimensioniert (vgl. Abbildung 2).

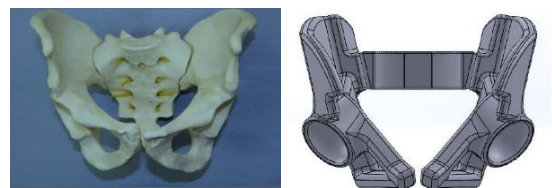


Abbildung 2: Gegenüberstellung anatomisches Becken und Dummy-Becken [4]

Als neues Knochenersatzmaterial kommt ein Gemisch aus Epoxidharz und Aluminiumpulver zum Einsatz. Gegenüber den zuvor aus Holz hergestellten Ersatzknochen des alten Dummys besitzt das neue Material den Vorteil, dass es gießfähig ist und in beliebige Form gebracht werden kann. Somit können die Knochen deutlich aufwendiger und biofideler gestaltet werden (vgl.

Abbildung 3: Skelettaufbau des Oberkörpers vom BD-Dummy ().

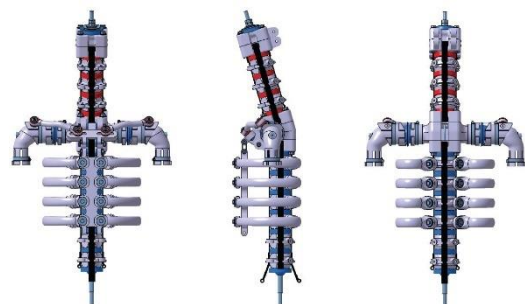


Abbildung 3: Skelettaufbau des Oberkörpers vom BD-Dummy [6]

Des Weiteren gewährleistet das neue Material, im Gegensatz zu Holz, gleichbleibende Fertigungsqualitäten, was auch der Reproduzierbarkeit zu Gute kommt. Im

Weiteren können nun auch Beschädigungen am Skelett per Computertomographie festgestellt werden, ohne den Dummy zwingend zerlegen zu müssen.

Ebenfalls überarbeitet wurden die Gewebeteile in Bezug auf die geometrische Form wie auch auf das verwendete Ersatzmaterial. Durch den Einsatz von Mehr-Komponenten-Silikon konnte auf der einen Seite die Langzeitlagerfähigkeit des BD-Dummys deutlich verbessert sowie auf der anderen Seite eine realitätsnähere Haptik erzielt werden. Dank der verschiedenen Shore-Härten, der eingesetzten Silikone, können auch knorpelartige Körperelemente, wie etwa Bandscheiben, nachgebildet werden. Dadurch weist die Wirbelsäule des BD-Dummys eine sehr nah an die Realität grenzende Flexibilität auf. Ein weiterer Vorteil der Mehr-Komponenten-Silikone besteht darin, dass sie während der Fertigung flüssig sind und somit sehr gut in komplexe Formen gegossen werden können [4] [6].

Für die Gussformen der Skeletteile wurde als Material ein verhältnismäßig steifes Silikon gewählt, welches ein materialschonendes Entformen der Gussteile ermöglicht. Die zur Herstellung erforderlichen 3D-Positive wurden von dem vorliegenden CAD-Modell abgeleitet und mit Hilfe eines 3D-Druckers gedruckt. Die Gewebeteile des BD-Dummys werden in zwei Arten von Formen gegossen. Zu einem sind dies Gipsformen für kleinere Teile und zum anderen mit Epoxidharz laminierte Styroporformen für die voluminöseren Bauteile. Zukünftig sollen auch hier Silikonformen zum Einsatz kommen.

Herstellung eines personenspezifischen Dummys

Neben der Herstellung des 50%-Mann Dummys ist auch eine personifizierte Anpassung des BD-Dummys möglich. Dazu werden die anthropometrischen Abmaße des Unfallopfers benötigt. Diese können aus den CT-Aufnahmen festgestellt werden. Des Weiteren ist es mittels der Aufnahmen möglich, die Skelettmaße

sowie die Lage der Gelenkpunkte des Opfers zu bestimmen und anhand dieser die spätere Skelettkonstruktion des Dummys festzulegen. Allerdings muss dabei beachtet werden, dass in Folge eines Unfalls Knochen brechen und verschoben werden können. Daher müssen die jeweiligen Werte geschätzt oder aus den Normgrößen (DIN 33402- Körpermaße des Menschen) abgeleitet werden (vgl. Abbildung 4).

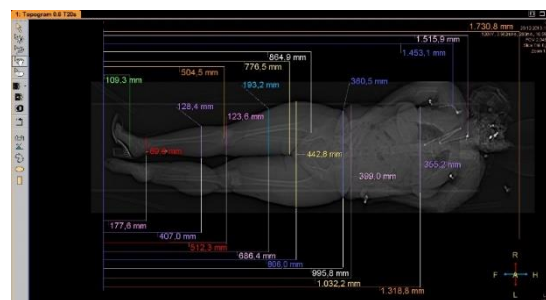


Abbildung 4: CT-Aufnahme mit Abmaßen [15]

Der Scan mittels eines Computer-Tomographen ermöglicht es, aus den Rohdaten Schnittbilder zu erzeugen. Anhand dieser Slices kann die Massenverteilung des Opfers bestimmt werden, indem in einem CAD-Programm die jeweiligen Oberflächen nachgeformt werden. Unter zu Hilfenahme der Höhenabstände, welche ebenfalls aus den CT-Daten abgeleitet werden können, werden möglichst ähnliche Volumina des spezifischen Dummy in Relation zur konkreten Person erreicht. Durch eine gleiche Dichte des verwendeten Dummy-Materials und der durchschnittlichen Dichte menschlichen Gewebes ergibt sich eine Massenverteilung des Dummys wie die bei der konkret verletzten bzw. beim Unfall getöteten Person. Der Slice kann nun in eine CAD-Software als Hintergrund geladen und bemaßt werden, so dass auf dem Hintergrund direkt technische Zeichnungen im entsprechenden Maßstab erstellt werden können. Im CAD-Programm werden die einzelnen Schnitte als elliptische Körper nachgeformt und deren Oberflächeninhalt mit denen der CT-Daten verglichen und angepasst. (vgl. Abbildung 5)

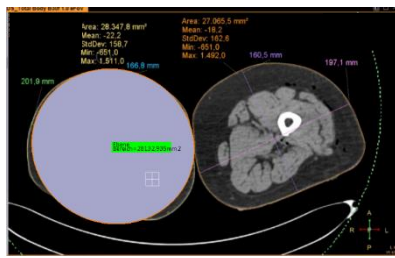


Abbildung 5: Darstellung eines Slice in einem CAD-Programm [15]

Anhand der CAD-Daten ist es somit möglich, personenspezifische Gussformen für die Gewebeteile herzustellen. Die jeweiligen Querschnitte werden auf Holzplatten übertragen, welche auf Styroporblöcke geklebt werden. Unter Zuhilfenahme eines Heizdrahtes werden die Gussformen aus dem Styroporblock geschnitten. Im Anschluss können die spezifischen Gewebeteile mit einem 2-Komponenten-Silikon gegossen und am Dummy montiert werden (vgl. Abbildung 6).



Abbildung 6: spezifischer Dummy der 2. Generation (hier im Bild ohne äußere Hülle dargestellt, damit man die spezifischen Gewebeteile des Surrogates einer 163 cm großen und 80 kg schweren Frau erkennen kann)

Test der optimierten BD-Dummys

Um den optimierten BD-Dummy hinsichtlich seiner Anwendbarkeit als Surrogat für vulnerable Verkehrsteilnehmer im Full-Scale-Crash-Test zu bewerten, wurden bereits

mehrere Pkw-/Fußgänger- und Pkw-/Radfahrer-Kollisionen durchgeführt. Insbesondere bei der Nachstellung von Realunfällen ist es damit möglich, die Schäden aus dem Unfall mit denen am Crash-Fahrzeug aus der Nachstellung zu vergleichen. So wurde beispielsweise das spezifische Surrogat einer 163 cm großen und rund 80 kg schweren Frau (vgl. Abbildung 6) in einem Crashversuch als Fahrradfahrerin mit rund 100 km/h angefahren. Der Vergleich der Schadenfotos aus der Nachstellung im Crashversuch zeigt, dass nicht nur die Wurfweiten, sondern auch die Schäden am Crash-Fahrzeug nach dem Crash-Test überwiegende Übereinstimmungsmerkmale mit dem spezifischen Schadenbild am realen Unfallfahrzeug haben, wenngleich die vorhandenen Abweichungen zeigen, dass die zunächst in der Unfallrekonstruktion angedachte Anstoßkonstellation abweichend und die Kollisionsgeschwindigkeit durchaus auch noch höher gewesen sein dürfte.



Abbildung 7: Gegenüberstellung der Fahrzeugschäden aus Realunfall (linkes Foto) und Nachstellung im Crash-Test (rechtes Foto) [15]

Bereits die erste Generation des BD-Dummy wurde anhand eines Realunfalls validiert [11]. Bei diesem Realunfall, den das Ing.-Büro Dr. Rau/Leser/Strzeletz zur Verfügung stellte, war die Kollisionsgeschwindigkeit bekannt, weil das Unfallfahrzeug mit einem Unfall-Daten-Speicher ausgestattet war. Dabei konnte bei weiteren Untersuchungen im Rahmen der Validierung des BD-Dummy unter anderem auch festgestellt werden, dass sowohl die Körpergröße als auch der Bremsstatus des Pkw einen erheblichen Einfluss auf die Lage der Kopfanprallstelle haben [12]. Dies wiederum

führt zu der Erkenntnis, dass die Aufwurfweite und die Abwicklungslänge keine zuverlässigen Kriterien für die Eingrenzung der Kollisionsgeschwindigkeit sind, weil die Lage der Kopfanprallstelle am Pkw nicht nur von der Kollisionsgeschwindigkeit abhängt. Vielmehr kommt dabei auch der spezifischen Form bzw. Kontur der Fahrzeugfront eine erhebliche Rolle zu. Der einfache Vergleich mit Abwicklungslängen aus Crashversuchen dürfte daher ohne Berücksichtigung der bremsbedingten Verzögerung bzw. des daraus resultierenden Eintauchens der Fahrzeugfront, der konkreten Fahrzeugform und der Größe der angefahrenen Person nicht geeignet sein, um die Kollisionsgeschwindigkeit hinreichend sicher eingrenzen zu können.

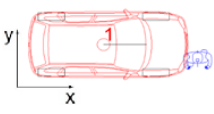
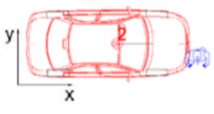
Auch der maßgeblich von KNAPE [6] weiterentwickelte BD-Dummy wurde wiederum anhand desselben Realunfalls validiert. Bei diesem Realunfall hatte ein Pkw vom Typ Opel Corsa B den Fußgänger mit rund 53 km/h im gebremsten Zustand frontal erfasst. Im Rahmen der Fachtagung „Technische Analyse von Verkehrsunfällen“ der Universität Žilina in Galanta, Slowakei wurden daher eine Nachstellung dieses Realunfalls als Full-Scale-Crash-Test durchgeführt [16]. Ferner wurde ein weiterer Crash-Test im höheren Geschwindigkeitsbereich durchgeführt, um die Haltbarkeit und Geeignetheit des weiterentwickelten BD-Dummys auch für Kollisionsgeschwindigkeiten über 70 km/h zu erproben. Bei dem zweiten Crash-Test wurde als Crash-Fahrzeug ein Ford Mondeo Mk. 2 verwendet.

Die beiden verwendeten Versuchsfahrzeuge vom Typ Opel Corsa B und Ford Mondeo Mk. 2 waren bei den Crash-Tests mit mehreren Unfalldatenspeichern, und zwar der Version 1.3 und der AT-Serie sowie mit einem Beschleunigungsmessgerät der Fa. DSD des Typs PicDAQ 5 ausgerüstet. Zum Messen der Beschleunigungen im Dummy, wurde im Kopf sowie im Gesamtschwerpunkt jeweils ein

3-axialer Beschleunigungssensor der Fa. Gulf Coast Data Concepts verbaut.

Der verwendete Fahrzeugtyp aus Versuch 1 wurde bewusst so gewählt, da mit diesem Versuch ein vorliegender Realunfall nachgestellt werden sollte. Das Unfallfahrzeug verfügte über einen Unfalldatenspeicher, wodurch die Kollisionsgeschwindigkeit von ca. 53 km/h bekannt war. Darüber hinaus lagen Schadenfotos von dem Fahrzeug vor. Der zweite Crashversuch sollte dazu dienen, die Anwendbarkeit des BD-Dummys auch bei höheren Kollisionsgeschwindigkeiten zu prüfen, die hier mit rund 71 km/h erreicht wurde. Der Fußgänger-Dummy wurde bei beiden Versuchen frontal von den Versuchsfahrzeugen erfasst, wobei der Anstoß leicht nach rechts versetzt von der Fahrzeugmitte erfolgte. Der Dummy hatte keine Eigengeschwindigkeit und wurde von rechts angefahren (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Versuchsübersicht

	Versuch 1	Versuch 2
Anstoßkonfiguration		
		
Pkw	Opel Corsa B	Ford Mondeo Mk 2
Dummy	Optimierter BD-Dummy, 50-Perz. Mann; 175 cm; 78 kg	
Geschwindigkeit	Opel: 52,3 km/h; Dummy: 0,0 km/h;	Ford: 71,1 km/h; Dummy: 0,0 km/h;

Der Erstanprall erfolgt in beiden Versuchen gegen die Beine des Dummys. Daraufhin schmiegte sich der BD-Dummy an die Fahrzeugkontur an. Dabei kam es aufeinander folgend zu einer merklichen Geschwindigkeitsänderung der Oberschenkel, des Beckens, des Abdomens, des Thorax sowie von Hals und Kopf des Fußgänger-Surrogats. Der Kopfanprall des Dummys aus Versuch 1 erfolgte leicht rechtsseitig in den oberen Bereich der Windschutzscheibe. Dadurch riss die Scheibe ein, wodurch der Kopf in Fahrgastraum eindringen konnte. Ein tieferes Eintauchen des Kopfes in das Fahrzeug wurde durch den Anprall der linken Schulter an die rechte A-Säule des Pkw verhindert. Der Dummy stützte sich im weiteren Verlauf mit der Schulter an der A-Säule ab und begann über das Fahrzeug zu rotieren, wodurch der Kopf wieder aus der Fahrgastzelle gezogen wurde. Durch die synchron beginnende Bremsung des

Versuchsfahrzeuges wurde diese Bewegung unterbrochen und der Dummys fiel neben dem Fahrzeug, und zwar etwa auf Höhe des rechten Außenspiegels, in Richtung Boden. Erst nach dem Sekundärstoß des Fußgänger-Surrogats löst sich dieser vom Fahrzeug. Daher ist in diesem Versuch keine Flugphase des Dummys zu beobachten gewesen (vgl. Abbildung 8).

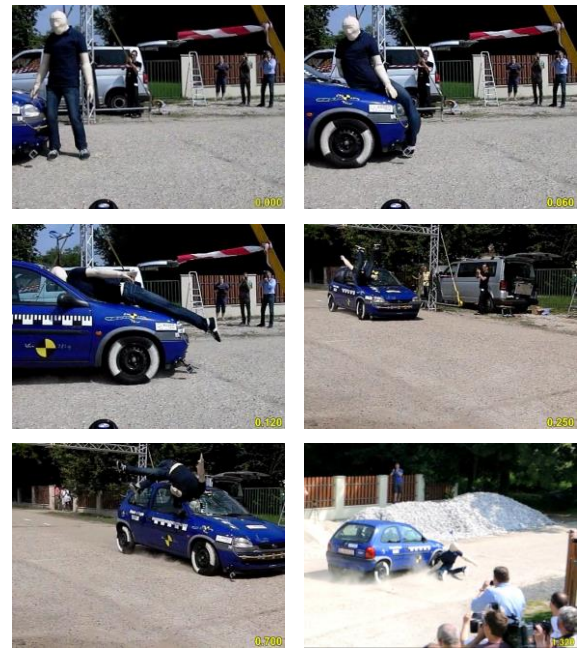


Abbildung 8: Serienbilder Versuch 1

Im Gegensatz zu Versuch 1, hielt die Windschutzscheibe des Ford Mondeo den Belastungen des Kopfanpralls soweit stand, dass diese nicht vollständig einriss. Durch die beginnende Rotation des Dummys löste sich der Oberkörper von der Motorhaube. Dies hatte zur Folge, dass der Energieaustausch zwischen Fahrzeug und Dummy im Wesentlichen über den Kopfbereich des Dummy stattfand. Dabei wurde der Kopf über die Scheibe in Richtung Dachkante gedrückt, wo sich eine ovale Bruchspinne auf der Windschutzscheibe bildete. Die Beine des BD-Dummys rotierten im Folgenden über dessen Kopf und Thorax, bis der Dummy sich nahezu um 180° in seiner Coronalebene gedreht hatte. In der weiterführenden Rotation löste sich der Dummy vom Fahrzeug bis er etwa 0,475 s nach Erstkontakt in die Flugphase überging. Im Weiteren rotierte das Fußgänger-Surrogat

entlang der rechten Fahrzeugseite, bis der Dummy schließlich im Bereich des hinteren rechten Rades flächig auf den Untergrund prallte (vgl. Abbildung 9).



Abbildung 9: Serienbilder Versuch 2

Auswertung der Dummy-Wurfweiten

Nach den Versuchen wurden die Positionen der Dummy-Schwerpunkte eingemessen, wobei die positiven x-Werte in Fahrbahnlängsrichtung und die positiven y-Werte entgegen der Blickrichtung des Dummies angenommen wurden.

Dadurch ergaben sich für Versuch 1 ($v_k = 52,3$ km/h) folgende Wurfweiten des Dummies:

- Längswurfweite: 16,0 m
- Querwurfweite: -1,7 m
- Gesamtwurfweite: 16,1 m

Für den zweiten Versuch ($v_k = 71,1$ km/h) wurden die nachkommenden Wurfweiten ermittelt:

- Längswurfweite: 31,8 m
- Querwurfweite: -1,8 m
- Gesamtwurfweite: 31,9 m

Die in beiden Versuchen gemessenen Wurfweiten lassen sich mit den bisherigen

Messwerten aus Kollisionsversuchen und Realunfällen nach BURG/MOSER [17] sowie Versuchen mit älteren BD-Dummy Generationen [16] weitestgehend in Einklang bringen. Jedoch sollten weitere Versuche im höheren Geschwindigkeitsbereich durchgeführt werden, um die Regressionskurve statistisch abzusichern (vgl. Abbildung 10).

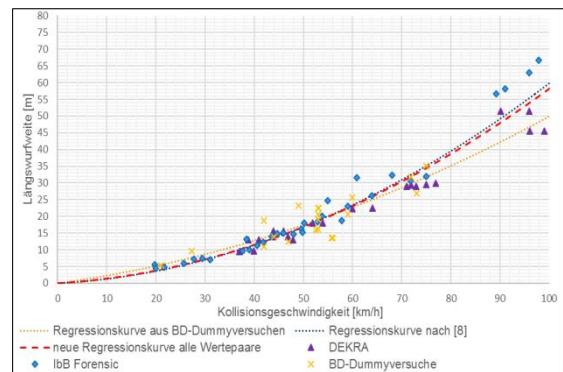


Abbildung 10: Längswurfweiten aus Realunfällen, Crashversuchen mit diversen Dummy-Typen, sowie dem biofidelen BD-Dummy mit neuen Regressionskurven nach [13] und [14]

Auswertung der Dummy-Sensorik

Mittels der gemessenen Beschleunigungswerte aus der Dummy-Sensorik konnte analysiert werden, welche Werte für die üblicherweise verwendeten Schutzkriterien bei den durchgeführten Versuchen erreicht wurden. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass die konkreten Schutzkriterien (HIC_{36} , a_{max} und a_{3ms}) eigentlich nicht mit den verwendeten Messgeräten zu bestimmen sind, da diese nicht den standardisierten Vorgaben entsprechen. Daher wurden die Schutzkriterien nur nach den jeweiligen Berechnungsverfahren aus den vorhandenen Beschleunigungswerten ermittelt. Deshalb sind die nachfolgenden Werte der Schutzkriterien als vergleichend anzusehen.

Es ergab sich dabei für den ersten Versuch ($v_k = 52,7$ km/h) während des Kopfanpralls auf die Windschutzscheibe ein maximaler, vergleichender HIC_{36} -Wert von 188. Auslöser für diesen verhältnismäßig geringen Wert dürfte der Einriss der Scheibe sein, wodurch

der Kopf des Dummys in den Fahrgastraum gelangen konnte. Die Videoauswertung hat des Weiteren ergeben, dass die erreichte Maximalbeschleunigung des Kopfes von $a_{\max} = 67,7 \text{ g}$ sowie die höchste, über drei Millisekunden gemittelte Beschleunigung von $a_{3 \text{ ms}} = 59,1 \text{ g}$ beim Anprall des Kopfes gegen die Innenverkleidung der A-Säule auftraten. In diesem Moment wurde der Kopf durch die beginnende Rotation des Dummys aus dem Fahrgastraum gezogen und verhakte sich dabei mehrfach mit der A-Säule. Alle ermittelten vergleichenden Schutzkriterien-Level, während des Kollisionsversuch mit $v_k = \text{rund } 53 \text{ km/h}$, blieben deutlich unter den Grenzwerten. Damit kann geschlussfolgert werden, dass der hier vorliegende Kopfanprall in die Frontscheibe bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von rund 53 km/h noch nicht mit einer überwiegenden Wahrscheinlichkeit zu irreversiblen Verletzungen geführt hätte. Für die Schutzkriterien des Thorax aus Versuch 1 wurden die nachfolgenden Werte ermittelt: Der Primäranprall des Dummys erzeugte eine Maximalbeschleunigung des Oberkörpers von und $a_{\max} = 41,1 \text{ g}$ sowie eine über drei Millisekunden gemittelte Beschleunigung von $a_{3 \text{ ms}} = 37,6 \text{ g}$. Für den sekundären Anprall auf der Fahrbahn ergaben sich ein $a_{\max}$ von $49,2 \text{ g}$ sowie ein $a_{3 \text{ ms}}$ -Wert von $39,5 \text{ g}$. Die Auswertung der Beschleunigungsdaten im Thorax des BD-Dummy zeigt somit, dass der Fahrbahnaufprall zur höheren Belastungen auf den Dummy-Körper geführt hat, als der Primäranprall gegen das Fahrzeug. Wie bereits beim Kopf werden auch beim Oberkörper die jeweils geltenden Grenzen der Schutzkriterien beim Anprall des Pkw mit $v_k = \text{rund } 53 \text{ km/h}$ nicht überschritten.

Die Werte der abgeleiteten Schutzkriterien beim zweiten Versuch ($v_k = 71,1 \text{ km/h}$) sind der folgenden Aufstellung zu entnehmen: Der Kopfanprall auf die Windschutzscheibe des Crashfahrzeuges erzeugte eine maximale Kopfbeschleunigung von und $a_{\max} = 466,5 \text{ g}$ sowie ein $a_{3 \text{ ms}}$ -Wert von $315,1 \text{ g}$. Genau wie der vergleichende HIC-Wert von 2042 fielen alle Schutzkriterien-Level aus dem zweiten Versuch

erwartungsgemäß deutlich höher aus als im ersten Versuch. Dabei wurden beim Anprall mit rund 71 km/h sämtliche Grenzwerte um das Mehrfache überschritten. Die Maximalbeschleunigung des Thorax beim Primäranprall von $a_{\max} = 30,7 \text{ g}$ sowie die Werte des Sekundäranpralls von $54,8 \text{ g}$ zeigen, dass der sekundäre Anprall auf die Fahrbahn höhere Beschleunigungen zur Folge hatte, als der Anprall mit dem Fahrzeug. Auch die über drei Millisekunden gemittelten Beschleunigungen von $a_{3 \text{ ms}} = 29,4 \text{ g}$ beim primären Anprall gegen das Fahrzeug bzw. von $a_{3 \text{ ms}} = 48,7 \text{ g}$ beim sekundären Auftreffen auf die Fahrbahn zeigen, dass die höheren Belastungen für den Körper während des Aufpralls auf die Fahrbahnoberfläche wirken.

Es hat sich beim Vergleich der beiden Versuche gezeigt, dass die Thorax-Beschleunigung beim Primäranprall nahezu unabhängig von der Kollisionsgeschwindigkeit zu sein scheint. Dies lässt sich nach Auswertung der Videos dadurch erklären, dass die höhere Kollisionsgeschwindigkeit dazu führt, dass der Oberkörper weniger auf der Motorhaube aufschlägt, sondern eher an dieser entlang bzw. hochrutscht, bis es schon nach kurzer Zeit zum Kopf- und Schulteranprall mit der Windschutzscheibe kommt. Nichtsdestotrotz führt die höhere Kollisionsgeschwindigkeit des Pkw zu einer größeren Geschwindigkeitsänderung des gesamten Dummy, so dass sowohl die Kopfbelastungen beim Primäranprall am Fahrzeug aber auch die Thorax-Belastungen beim Sekundäraufprall auf der Fahrbahn bei der höherer Kollisionsgeschwindigkeit deutlich höher ausfallen.

Auswertung der Dummy-Schäden

Um die Anwendbarkeit des überarbeiteten Biofidel-Dummys hinsichtlich der Übereinstimmung zwischen den Dummy-Schäden und den bei einem Menschen zu erwartenden Verletzungen feststellen zu können, war es zunächst nötig, die während des

Crashes entstandenen Beschädigungen zu dokumentieren und ihnen Anprallpunkte am Fahrzeug beziehungsweise am Untergrund zuzuordnen. Dazu wurden von beiden Dummys CT-Aufnahmen angefertigt. Darüber hinaus wurde im Anschluss der Dummy aus Versuch 1 zerlegt und die Schäden dokumentiert (vgl. Abbildung 11 sowie Tabelle 2).

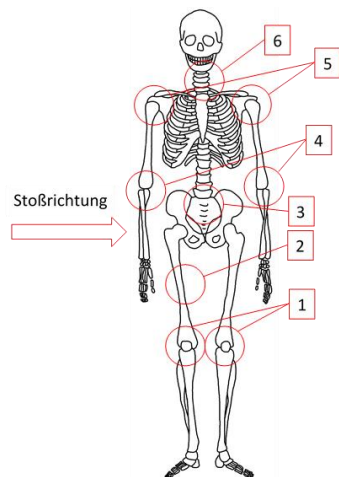


Abbildung 11: Beschädigungen Dummy V1

Tabelle 2: Schäden BD-Dummy V1

	Schäden am Dummy V1
1	Beidseitiger Bruch der Unterschenkel im Bereich des Kniegelenks
2	Bruch des rechten Oberschenkels
3	Doppelter Bruch des Kreuzbeins
4	Beidseitiger Bruch der Ellenbogen
5	Beidseitiges Auskugeln der Schultergelenke
6	Beschädigungen an den Bandscheiben der Halswirbelsäule

Dabei wurde bei dem Dummy aus Versuch 1 (v_k = rund 53 km/h) festgestellt, dass beide Unterschenkel direkt unterhalb des Kniegelenks gebrochen waren. Durch Auswertung der Videofilme konnten diese „Dummy-Verletzungen“ dem Kontakt mit der Frontschürze als verletzungsverursachendes Bauteil zugeordnet werden. Im weiteren Verlauf stieß der Dummy mit dem rechten beziehungsweise anstoßseitigen Oberschenkel gegen die vordere Motorhaubenvorderkante des Opel Corsa, was zu einer Fraktur des Ersatz-Femur-Knochens führte (vgl. Abbildung 12).

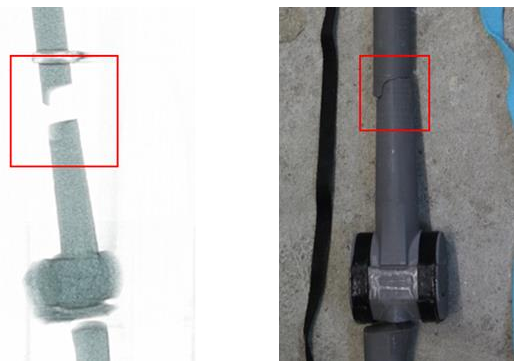


Abbildung 12: Gegenüberstellung CT-Aufnahme und freigelegter Oberschenkel des Dummys

Auch der Anprall der Pelvisregion auf die Motorhaube zog mehrere Frakturen des Beckenknochens nach sich. Zu einer Luxation der linken Schulter kam es in Folge des Anpralls auf den unteren Teil der Windschutzscheibe des Versuchsfahrzeuges. Des Weiteren erlitten beide Arme Beschädigungen im Bereich der Ellenbogen durch verschiedene Anstoßereignisse. Die Bandscheiben der Halswirbelsäule, bestehend aus einem weichen 2-Komponenten-Silikon, zeigten mehrere Einrisse. Diese Beschädigungen resultierten wahrscheinlich aus den starken Beugungen des Halses vor und nach dem Kopfanprall.

Vergleichend dazu wies der Dummy aus Versuch 2 (v_k = rund 71 km/h) deutlich mehr Schäden auf (vgl. Abbildung 13 sowie Tabelle 3).

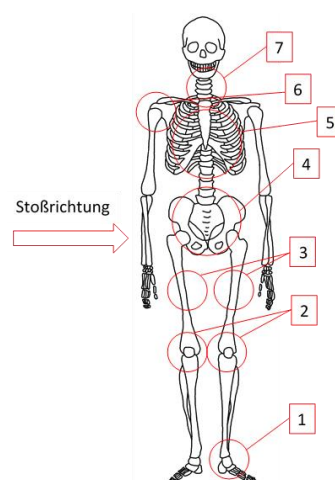


Abbildung 13: Beschädigungen Dummy V2

Tabelle 3: Schäden BD-Dummy V2

	Schäden am Dummy V2
1	Abriss des rechten Fußes
2	Beidseitiger Bruch der Unterschenkel unterhalb der Kniegelenke
3	Beidseitiger Bruch der Oberschenkel
4	Mehrfacher Beckenbruch
5	Mehrfache Rippenfrakturen
6	Fraktur am rechten Schultergelenk
7	Beschädigte Bandscheiben der Halswirbelsäule

Eine Auswertung der Beschädigungen an den Armen konnte bei diesem Dummy nicht durchgeführt werden, weil der Dummy aus dem zweiten Versuch später noch für andere Versuche verwendet worden war. Die Analyse der Videodaten lässt jedoch vermuten, dass es an den Armen auch bedingt durch den Anprall des Pkw Ford mit rund 71 km/h zu Schäden an den Armen gekommen sein dürfte. Durch den deutlich härteren Anprall mit der vorderen Motorhaubenkante erlitt jedenfalls der linke, stoßabgewandte Oberschenkel einen Bruch. Darüber hinaus wies der Brustkorb des Dummy etliche Rippenfrakturen auf, die wahrscheinlich dem stärkerem Sekundärstoß auf die Fahrbahnoberfläche geschuldet sein dürften. Zusätzlich wurde dem Dummy beim Anprall mit rund 71 km/h infolge des sogenannten Unterzieheffektes während des Primärstoßes ein Fuß abgerissen. Dieser Effekt ist auch bei Realunfällen häufig zu beobachten und Auslöser für schwere Fuß- bzw. Unterschenkelverletzungen. Dabei kann der Kontakt mit der Unterkante der Frontstoßfängerverkleidung dazu führen, dass der Fuß in einigen Fällen nur noch durch Haut und Gewebe am Körper gehalten wird (vgl. Abbildung 14). Auch komplette Amputationen sind bei höheren Kollisionsgeschwindigkeiten gelegentlich zu beobachten.



Abbildung 14: Vergleich des Unterzieheffekts mit vollständig abgerissenem Fuß im Versuch bei $v_k =$ rund 71 km/h (oben) und partiell abgerissener Fuß nach Real-Unfall (unten) [18]

Vergleich: Crashversuch und Realunfall, jeweils mit 53 km/h

Der Fußgänger, welcher im zugrundeliegenden Realunfall verunglückte, besaß mit einer Körpergröße von 171 cm und einem Gewicht von 73 kg ähnliche Körpereigenschaften wie der genutzte Biofidel-Dummy. Im Gegensatz zu dem Versuch wurde der Fußgänger auf der Fahrerseite eines Opel Corsa B erfasst. Dass der Anprall bei der Nachstellung im Versuch spiegelverkehrt mit der rechten Frontpartie erfolgte, ist dadurch begründet, dass der Fahrer im Versuchsfahrzeug möglichst wenig gefährdet werden sollte. Die Wurfweiten beim Realunfall lagen bei 16 m in Längsrichtung, sowie rund 2 m in Querrichtung. Diese Werte sind fast identisch mit den im Crashversuch erzeugten Werten (Längswurfweite: 16 m; Querwurfweite: 1,7 m). Auch die dynamischen Abwickellängen (Unfall: 240 cm; Versuch: 230 cm) sind vergleichbar. An dem Crashfahrzeug konnte kein Beulenversatz festgestellt werden, was zu einem auf die nicht vorhandene Eigengeschwindigkeit des Fußgänger-Dummys und zum anderen auf die Fußstellung des Dummy zurückzuführen sein dürfte. Bei dem

Unfall wurde ein Beulenversatz von ca. 10 cm festgestellt [19].

Die Windschutzscheibe des Unfallfahrzeuges (linkes Foto in Abbildung 15) weist auf der Fahrerseite zwei Bruchspinnen auf, von denen die eine durch den Anprall der Schulter und die andere durch den Kopfanprall verursacht wurden. Der Anprall des Kopfes erfolgte auf den oberen Scheibenrahmen. Das Fahrzeug aus dem Crashversuch (rechtes Foto in Abbildung 15) zeigt ein ähnliches Schadensbild. Die Schulter erzeugte eine Bruchspinne im unteren Bereich der Frontscheibe. Der Aufprall des Kopfes erfolgte circa 10 cm niedriger als beim Realunfall, weswegen keine Beschädigungen am Scheibenrahmen vorzufinden sind. Dafür durchschlug der Dummy die Scheibe (vgl. Abbildung 15).



Abbildung 15: Fahrzeugbeschädigungen nach Unfall (linkes Foto) [19] und nach dem Crash-Versuch mit rund 53 km/h (rechtes Foto)

Im Bereich der Front weist das Unfallfahrzeug unterhalb des linken Scheinwerfers Wischspuren auf, die mit „(1)“ markiert sind im linken Foto der Abbildung 16. Diese Wischspuren sind durch den Anprall mit den unteren Extremitäten hervorgerufen. An fast gleicher Stelle sind auch beim Crash-Fahrzeug nach dem Kollisionsversuch Wischspuren zu erkennen (rechtes Foto in Abbildung 16). Des Weiteren weisen beide Fahrzeuge eine Eindellung zwischen Scheinwerfer und Kühlergrill auf, die in beiden Fotos der Abbildung 16 mit einer „(2)“ markiert ist. Darüber hinaus wurde beim Unfall das Glas des linken Scheinwerfers des grünen Opel Corsa zerstört sowie die Motorhaube verzogen. Das

Versuchsfahrzeug besitzt zudem noch eine großflächige Eindellung auf der Motorhaube, die auf den Fotos vom Pkw aus dem Realunfall nicht so ausgeprägt zu existieren scheint (vgl. Abbildung 16).



Abbildung 16: Fahrzeugbeschädigungen 2: Unfall (links) [19] und Versuch (rechts)

Bei der Gegenüberstellung der Beschädigungen beider Fahrzeuge sind überwiegende Gemeinsamkeiten zu erkennen. Die Bruchbilder der Windschutzscheiben sind, bis auf den erhöhten Kopfanschlag beim Realunfall und das Einreißen der Scheibe beim Crashversuch, vergleichbar. Ebenso verhält es sich bei den Wisch- und Druckspuren im Bereich unterhalb des anstoßseitigen Scheinwerfers sowie die markante Delle an der Motorhauben-Vorderkante. Nicht vergleichbar sind die Beschädigungen am Scheinwerfer des Unfall-Fahrzeuges, weil dieses noch über eine Streuscheibe aus Glas verfügte, während beim Crash-Fahrzeug im Versuch der gesamte Scheinwerfer aus Kunststoff bestand.

Messung von Deformationen mit computergestützte Fotogrammetrie

Mit Hilfe von drei verschiedenen Mess- bzw. Dokumentationsmethoden wurden die Schäden an den Versuchsfahrzeugen in Hinblick auf ihre Lage und Intensität erfasst und ausgewertet:

- Händische Messung der Deformationstiefe mit einem Maßstab
- Computergestützte Fotogrammetrie mit PhotoScan
- Laserscanner des Typs Faro X 130 HDR

Dabei sei angemerkt, dass bei der Messung mittels Maßstab nur die maximale Deformationstiefe bestimmt wurde. Vor und

nach den Versuchen wurden die Fahrzeuge aus verschiedensten Perspektiven fotografiert. Anschließend konnte mit dem Programm PhotoScan eine dreidimensionale Punktwolke erstellt werden, welche mit der vom Laserscanner erzeugten Referenz-Punktwolke verglichen wurde. Im Bezug zu der Referenz-Punktwolke gab es Abweichungen von bis zu 6 mm bei der Messung der Deformationstiefen via PhotoScan. Durch die händische Messung wurde eine Deformationstiefe von 16 mm und mit der von PhotoScan erzeugten bildbasierten Punktwolke von 18 mm festgestellt. Damit zeigt sich aber, dass die Abweichungen verhältnismäßig gering ausfallen und die mit PhotoScan erzeugten Punktwolken sich prinzipiell zu Bestimmung von Deformationen eignen. Nachteilig erweisen sich die Einschränkungen dieses Systems, wenn es zu starken Spiegelungen, in Folge von direkter und intensiver Sonneneinstrahlung auf der Lackoberfläche kommt [14].

Zusammenfassung

Im Rahmen der Weiterentwicklung eines biofiden Dummys wurden bereits mehrere Prototypen des inzwischen in der dritten Generation optimierten BD-Dummys hergestellt und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit als Fußgänger-Surrogat bei Full-Scale-Crash-Tests untersucht. Die Auswertung der bisherigen Versuche und der Vergleich mit nachgestellten Real-Unfällen hat gezeigt, dass der BD-Dummy in der Lage ist, Schäden an den Crash-Fahrzeugen zu erzeugen, wie es der Mensch tut, wenn dieser als Fußgänger oder Radfahrer von einem Pkw erfasst wird.

Ferner hat die Auswertung der Videos und der Dummy-Sensorik gezeigt, dass die Belastung auf den Kopf trotz vergleichsweise günstiger Anprallstelle mittig in der Windschutzscheibe erheblich von der Kollisionsgeschwindigkeit abhängt, wohingegen die maximalen Beschleunigungen des Thorax ggf. nahezu unabhängig von der Kollisionsgeschwindigkeit sein kann. Unabhängig davon ist aber

festzustellen, dass die Belastungen auf den Thorax beim Sekundärstoß auf die Fahrbahn in der Regel höher ausfallen können als beim Primäranprall gegen das Fahrzeug.

Die an dem in der dritten Generation weiterentwickelten BD-Dummy erzeugten Schäden können grundsätzlich als plausibel angesehen werden, d.h. dass der optimierte Biofidel-Dummy in der Lage ist, zur statistischen Verletzungsverteilung bei Pkw/Fußgängerkollisionen vergleichbar in vielen Körperregionen auch Verletzungen zu simulieren, indem an den entsprechenden Stellen beim Dummy korrespondierende Schäden an den Körperstellen auftreten. Insbesondere können die üblicherweise auftretenden Verletzungen der unteren Extremitäten mit den Schäden am Skelett des Dummy nachvollzogen werden. Infolge des Anpralls der Fahrzeugfront gegen die Beine des Dummy wiesen die verwendeten Dummys Beschädigungen in derselben Körperregion auf, wie es beim Menschen unter denselben Anstoßbedingungen zu erwarten ist, und zwar sowohl in Bezug auf den Unter- als auch auf den Oberschenkel.

Die Auswertung der Dummy-Schäden und deren Zuordnung zu den Anprallstellen am Fahrzeug sowie dem Untergrund hat außerdem ergeben, dass die „Verletzungen“ bzw. Schäden am Dummy überwiegend durch die auch nach der Statistik zu erwartenden, typischen verletzungsverursachenden Fahrzeugteile verursacht wurden. Das deutet darauf hin, dass bedingt durch ein realistisches Anprallverhalten des BD-Dummys es möglich sein könnte, anhand der Schäden am Dummy Rückschlüsse auf die Verletzungen bzw. Verletzungswahrscheinlichkeit bei einem Menschen unter gleichen Anstoßbedingungen zu ziehen.

Die in den bisherigen Crashversuchen erzeugten Schadenbilder an den Versuchsfahrzeugen zeigen bezüglich Art, Umfang, Lage und Intensität eine Übereinstimmung mit Schäden aus

Realunfällen. Insbesondere der Vergleich von Versuchen mit demselben Pkw-Typ, wie er bei einem zugrundeliegenden Realunfall vorlag, zeigt, dass die Beschädigungen am Fahrzeug überwiegend übereinstimmen und somit als durchaus realistisch anzusehen sind. Hinsichtlich der Erzeugung von realistischen Schadenbildern ist der weiterentwickelte BD-Dummy somit als besonders geeignet zu bezeichnen. Ferner stimmten die in der Nachstellung generierten Wurfweiten sowohl in Längs- als auch in Querrichtung mit den Messungen bei einem gut dokumentierten Realunfall überein. Der überarbeitete BD-Dummy ist daher geeignet, als Surrogat für sogenannte vulnerable Verkehrsteilnehmer bei der Nachstellung von Pkw-/Fußgänger- und Pkw-/Radfahrer-Unfällen im Crashversuch verwendet zu werden. Dabei scheint anhand der bisher durchgeführten Versuche nicht nur ein Vergleich der Schadenbilder, sondern auch eine Gegenüberstellung der Dummy-Schäden mit den im Realunfall eingetretenen Skelett-Verletzungen möglich zu sein, so dass ggf. auch Aussagen zur Verletzungswahrscheinlichkeit in Zukunft durch die Verwendung des BD-Dummy möglich sein könnten. Hierzu werden aber in Zukunft noch weitere Auswertungen der Verletzungen und ihrer Entstehung durch interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Rechtsmedizinern und Unfallanalytikern mittels retrospektiver Analyse der in Berlin seit 2010 in der Regel sehr gut dokumentierten Unfälle von vulnerablen Verkehrsteilnehmern stattfinden.

Verweise

- [1] M. Knappe, Konstruktion eines Fußgängerdummys zur realistischen Schadenerzeugung an Fahrzeugen bei experimentellen Simulationen, Berlin: Bachelorarbeit TU Berlin, 2011.
- [2] M. Walter, Entwicklung eines Fußgängerdummys zur Nachbildung realistischer Deformationen bei Crash-Versuchen im Vergleich zu Schäden bei PKW/Fußgänger-Unfällen, Dresden: Diplomarbeit HTW Dresden, 2011.
- [3] N. Wagner, Entwicklung, Konstruktion und Erprobung eines Ersatzkörpers für die Durchführung von Fußgänger/ Pkw-Crashversuchen, Berlin: Studienarbeit TU Berlin, 2011.
- [4] E. Schröder, Entwicklung, Konstruktion, Bau und Erprobung eines menschengetreuen Beckens für den Einsatz bei einem (biofidelen) Fußgänger-Dummy, Diplomarbeit Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, 2015.
- [5] K. Austilat, Entwicklung, Konstruktion und Prüfung einer beweglichen Verbindung innerhalb eines anthropomorphen Testkörpers mit Hilfe geeigneter Substitutionsmaterialien und Fügetechniken, Berlin: Bachelorarbeit TU Berlin, 2015.
- [6] M. Knappe, Weiterentwicklung eines biofidelen Fußgänger-Dummys zur realistischen Schadenerzeugung an Fahrzeugen bei experimentellen Simulationen von PKW/Fußgänger-Kollisionen, Masterarbeit Technische Universität Berlin, 2016.
- [7] M. Weyde, Anwendbarkeit von Dummy-Versuchen in der forensischen Praxis bei der Rekonstruktion von Pkw-Fußgänger-Unfällen, Wildhaus: AREC Group, 2013.
- [8] G. Kasanicky, P. Kohut und T. Kubjatko, Erweiterte Versuche Fußgänger SUV und Bus mit Dummy Messtechnik, Wildhaus: AREC Group, 2013.
- [9] H. Steffan und A. Moser, *PC-Crash, ein Programm zur Simulation von Verkehrsunfällen*, Linz: DSD - Dr. Steffan Datentechnik, 2017.
- [10] N. Bogen, *Experimentelle Untersuchung zur Rekonstruktion von PKW/Fußgänger-Kollisionen mit Hilfe verschiedener Dummy-Typen*, Dresden: Diplomarbeit HTW Dresden, 2012.
- [11] S. Jäger, Vergleichende Untersuchung hinsichtlich der Unterschiede im Schadenbild am Pkw nach realen Kollisionen mit Fußgängern und experimentellen Simulationen mit verschiedenen Dummytypen, Berlin: Bachelorarbeit TU Berlin, 2012.
- [12] E. Senatli, Vergleichende Untersuchung zwischen experimentellen und rechnerischen Simulationen von Pkw-/Fußgänger-Unfällen, Berlin: Diplomarbeit TU Berlin, 2012.
- [13] S. Hubricht, Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Versuchen zu PKW/Fußgänger-Kollisionen im Geschwindigkeitsbereich zwischen 30 und 90 km/h, Dresden: Diplomarbeit HTW Dresden, 2013.
- [14] S. Isenberg, Experimentelle Untersuchung zur Rekonstruktion von Pkw/Fußgängerunfällen unter Verwendung optimierter biofideler Dummys bei Crash-Tests, Diplomarbeit Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, 2017.

- [15] Politieacademie, Collision-test, Nederland: CTS Crash-Test-Service, 2014.
- [16] M. Weyde, *Anwendbarkeit eines optimierten biofidelen Dummys als Fußgänger-Surrogat bei Full-Scale Crashtests*, Galanta, Slowakei: Vortrag anlässlich des Seminars "Technische Analyse von Verkehrsunfällen" (www.usi.expertgroup.sk), 2017.
- [17] H. Burg und A. Moser, Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion. Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation 2.Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [18] Castro / Becke / Nugel (Herausgeber), *Personenschäden im Straßenverkehr*, München: C.H. Beck Verlag, 2016.
- [19] O. Kaya, Kopfanprall beim Pkw-Fußgänger-Unfall: Vergleich Realunfall-Versuch-Simulation, Bewertung von Verletzungskriterien, Diplomarbeit Technische Universität Berlin, 2011.
- [20] A. Kunze, *Anwendbarkeit eines optimierten biofidelen Dummys als Fußgänger-Surrogat bei Full-Scale Crashtests*, Dresden: Diplomarbeit HTW Dresden, 2017.
- [21] B. Kurzke, *Anpassung des Mehrkörper-Modells für Fahrrad und Aufsassen im Programm PC-Crash zur realistischen Simulation von PKW/Fahrrad-Unfällen*, Dresden: Diplomarbeit HTW Dresden, 2015.

Klik hier als u tekst wilt invoeren.