



Thomas Kinsky, Dipl.-Ing. (TU)

**Die Applikation
des neuen flexiblen Beinprüfkörpers
für die Fußgängerschutztests**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

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

Institut für Fahrzeugsicherheit

optionales Feld (Zweitbetreuer/in, Fakultätsname, etc)
max. 2-zeilig

Graz, September 2014

Danksagung

Wie auch an Eides statt erklärt, wurde die vorliegende Arbeit von mir allein und selbständig erstellt. Trotzdem möchte ich zahlreichen Personen für die gute Zusammenarbeit danken, die diese Arbeit erst ermöglicht hat.

Zuerst danke ich meinem Betreuer, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann Steffan, der mir während des Doktoratsstudiums sowie beim Erstellen der vorliegenden Arbeit mit Rat und Tat zur Seite gestanden hat, wann immer das nötig war, und der diese Arbeit begutachtet hat.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop für die zweite Begutachtung dieser Arbeit sowie Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Brenn für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

In den inzwischen vielen Jahren, in denen ich mich intensiv mit dem Thema Fußgängerschutz beschäftigt habe und noch beschäftige, habe ich bei vielen Gelegenheiten von der Zusammenarbeit mit zahlreichen Experten der Automobilindustrie profitieren können. Besonders hervorheben möchte ich Frau Antje Sipido sowie die Herren Dr. Oskar Ries, Franz Roth, Dr. Abayomi Otubushin, Winfried Schmitt, Robert Fleischhacker, Benjamin Bünger, Klaus Rathje, Dr. Flavio Friesen, Wolfgang Hahn sowie Manfred Zeugner. In gemeinsamen Sitzungen, Projekten und zahlreichen Diskussionen konnte ich viel über die verschiedenen Bereiche des Fußgängerschutzes, die Testverfahren und das Testen sowie die praktische Umsetzung des Fußgängerschutzes lernen. Herzlichen Dank dafür!

Herrn Henrik Liers danke ich für seine zahlreichen Erläuterungen zu allen Bereichen rund um die Unfallforschung und die statistische Aufbereitung der entsprechenden Arbeitsergebnisse.

Besonders danken möchte ich auch Herrn Dirk-Uwe Gehring und seinen Mitarbeitern, besonders den Herren Peter Leßmann, Thomas Junker sowie Sven Färber, für ihre praktische Unterstützung in vielen Teilbereichen meiner Arbeit.

Ebenso danke ich Herrn Jan-Christopher Kolb sowie Herrn Martin Fritz für die gemeinsame Arbeit an dem neuen Prüfkörper.

Ich danke Herrn Dr. Atsuhiko Konosu, dem „Vater“ des FlexPLI, der durch seine Arbeit erst meine ermöglicht hat und der oft ein kritischer Diskussionspartner war.

Ebenso danke ich Herrn Oliver Zander für seine Beiträge und Erläuterungen, die auch meine Arbeit inspiriert haben.

Diese Arbeit ist neben meiner beruflichen Tätigkeit in meiner Freizeit entstanden. Ich danke jedoch meinen Vorgesetzten Herrn Josef Krottil und Herrn Andreas Dindorf, die mir oft ein flexibles Arbeiten ermöglichten, so dass ich mich den Herausforderungen des Studiums angemessen widmen konnte.

Abschließend danke ich meiner Ehefrau Katrin und meinem Sohn Sander für die private Unterstützung in der Zeit des Studiums.

Neuwied, 21.11.2014

Thomas Kinsky

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung / Abstract	VII
1.	Einführung	1
2.	Ein Überblick über das Thema Fußgängerschutz	1
2.1.	Historischer Überblick	1
2.2.	Entwicklung der heutigen Testverfahren und Testwerkzeuge	14
2.3.	Fußgängerunfälle in der Statistik	24
2.4.	Fußgängerschutztests für die Fahrzeugzulassung sowie den Verbraucherschutz	29
2.5.	Zukünftige Weiterentwicklung der Testverfahren zum Fußgängerschutz	36
3.	Das Testverfahren mit dem Beinprüfkörper gegen den Stoßfänger	41
3.1.	Biomechanische Betrachtungen	41
3.2.	Der EEVC-Beinprüfkörper	49
3.3.	Der neue flexible Beinprüfkörper FlexPLI	55
3.3.1.	Übersicht über die Entwicklungsschritte des FlexPLI	55
3.3.2.	Testen mit dem FlexPLI Version GTR	72
3.3.3.	Zertifizierung des FlexPLI	82
3.3.4.	Design der Version GTR des FlexPLI	85
3.3.5.	Einfluss des Testens mit dem FlexPLI auf das Fahrzeugdesign	93
3.3.6.	Prüfkörper-Grenzwerte für das Testen mit dem FlexPLI	100
4.	Zusammenfassung und Ausblick	104
	Nachwort	105
	Quellenverzeichnis	106
	Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen	124

Kurzfassung

Etwa seit den 1970er Jahren wurde intensiv an der Entwicklung von Testverfahren gearbeitet, um die Fronten von Fahrzeugen hinsichtlich des Risikos zu bewerten, welches diese bei einem Unfall mit Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern darstellen. Ziel der Anstrengungen war die Verbesserung des Schutzes von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern, vereinfacht als Fußgängerschutz bezeichnet. Ende der 1990er Jahre wurden die neuen Testverfahren erstmals für Verbraucherschutztests angewendet, 2003 wurde die erste gesetzliche Regelung zum Fußgängerschutz in Europa verabschiedet. Die Herausforderung, die neuen Anforderungen zu erfüllen, machte den Fußgängerschutz zu DEM Thema der Fahrzeugsicherheit in der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts.

Die vorgelegte Arbeit betrachtet in erster Linie das Testverfahren mit dem Beinprüfkörper gegen den Stoßfänger. In den letzten Jahren wurde ein neuer Prüfkörper entwickelt, der so genannte „Flexible Fußgänger-Beinform-Prüfkörper“ oder FlexPLI. Dieser Dummy soll den existierenden Prüfkörper in der Zukunft ersetzen. Die Entwicklungsschritte des neuen Prüfkörpers werden erläutert und die Änderungen für das Testverfahren sowie die notwendigen Schritte für die Applikation des Prüfkörpers werden beschrieben.

Abstract

Since approximately the 1970 years, intensive work was invested to develop test procedures for assessing the front end of vehicles to determine the risk they represent during an accident with pedestrians and other vulnerable road users. The objective of these efforts was the enhancement of the protection of pedestrians and other vulnerable road users, commonly referred to simply as pedestrian protection. End of the 1990 years, the new test procedures were applied for the first time in consumer protection tests; in 2003, the first legislation on pedestrian protection was adopted in Europe. The challenge to comply with the new requirements made pedestrian protection becoming THE subject of vehicle safety in the first decade of the 21st century.

The work presented is focusing at the test procedure of the legform impactor against the bumper. In the past years, a new impactor has been developed, the so-called “Flexible Pedestrian Legform Impactor” or FlexPLI. This dummy is deemed to replace the existing impactor in the future. The steps in the development of the new impactor are explained and the modifications to the test procedure as well as the necessary steps for the application of the impactor are described.

1. Einführung

Fußgängerschutz war DAS Thema der passiven Fahrzeugsicherheit in der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts: Neue Fahrzeuge mussten erstmals eine Reihe von Anforderungen erfüllen, die dem Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern dienen sollten und sollen. Zuerst forderten Verbraucherschutzorganisationen die verbindliche Durchführung der Tests, später auch der Gesetzgeber. Aber: Zu Beginn der Umsetzung waren die Anforderungen teilweise noch unvollständig formuliert, die Prüfkörper waren noch nicht alle fertig für den industriellen Einsatz, es gab wenig bis keine Erfahrung mit der Umsetzung der Anforderungen in der Fahrzeugentwicklung sowie am Fahrzeug. Die Automobilhersteller und ihre Zulieferer arbeiteten mit Hochdruck an dem Thema Fußgängerschutz, alles drehte sich darum.

2. Ein Überblick über das Thema Fußgängerschutz

2.1. Historischer Überblick

Die Testverfahren bzw. Maßnahmen, die heute in der passiven Fahrzeugsicherheit vereinfacht als „Fußgängerschutz“ verstanden werden, wurden etwa seit den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts definiert. Aber das Thema Fußgängerschutz ist natürlich wesentlich älter:

Zufußgehen ist die grundlegende Fortbewegungsart der Menschen. Im Allgemeinen lernt jeder Mensch das Zufußgehen mit etwa einem Jahr und behält diese Fähigkeit sein Leben lang; sie erlaubt die selbständige Fortbewegung von A nach B auch ohne irgendwelche Hilfsmittel.

Zufußgehen ist normalerweise auch eine sehr sichere Fortbewegungsart. Auf Grund der geringen Geschwindigkeit werden Hindernisse oder Probleme rechtzeitig erkannt und auch ein Zusammenstoß mit anderen Fußgängern bleibt in der Regel folgenlos. Erst durch die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern als Fußgängern wird das Zufußgehen gefährlich: Größere, schwerere, schnellere Verkehrsteilnehmer machen es zum Risiko für den Fußgänger. Daher gibt es bereits seit Beginn der Mobilität Probleme zwischen unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern.

In der Vergangenheit galt auf Straßen und Wegen lange das Recht des Stärkeren. Der einfache Fußgänger, der es sich in der Regel nicht leisten konnte, anders zu reisen, hatte Reitern, Kutschen etc. Platz zu machen und andere, vermeintlich

wohlhabendere Reisende nicht zu behindern. Mit dem Übergang vom Mittelalter zur Neuzeit, etwa um das 15./16. Jahrhundert herum, und mit der damit verbundenen zunehmenden Urbanisierung wurde allerdings besonders in den Städten das Miteinander von Fußgängern und anderen Verkehrsteilnehmern zum Problem. Bereits 1563 bat daher das französische Parlament den König – übrigens vergeblich –, Fahrzeuge auf den Straßen von Paris zu verbieten (vgl. Wikipedia/Fußverkehr (o.J.)). Wikipedia zitiert auch Goethe, der in seiner „Italienischen Reise“ beschrieb, wie sein Kutscher im Neapel des späten 18. Jahrhunderts versuchte, sich durch unaufhörliches Rufen Platz auf der Straße zu schaffen.

Wohl erst mit der Industriellen Revolution im späten 18. und frühen 19. Jahrhundert änderte sich auch die Sicht auf die Fußgänger am Rande der Straßen, die bis dahin eher als störend wahrgenommen worden waren. Der Mensch, oder besser die menschliche Arbeitskraft, bekam einen Wert, den man zu erhalten und zu schützen versuchte. Als einer der grundlegenden Meilensteine in diesem Zusammenhang kann der „Locomotive Act“ oder „Red Flag Act“ von 1865 in Großbritannien (vgl. Wikipedia/Locomotive Act o.J.) gesehen werden: „Straßenlokomotiven“, denen Automobile zugeordnet wurden, durften mit einer maximalen Geschwindigkeit von außerorts 6 km/h (4 mph) und innerorts 4 km/h (3 mph) fahren und mussten eine 3-köpfige Besatzung haben, von der eine Person eine rote Flagge 55 m (60 Yard) vor dem Fahrzeug herzutragen hatte, um andere Verkehrsteilnehmer zu warnen. Mit einer Gesetzesänderung von 1878 durften lokale Vorschriften die Verwendung der roten Flagge optional regeln, und die Distanz zum Vorhergehenden wurde auf 18 m (20 Yard) verringert. Aber erst mit einer Änderung von 1896 durfte das dritte Besatzungsmitglied entfallen, und es wurde eine maximale Geschwindigkeit von 23 km/h (14 mph) erlaubt (vgl. Wikipedia/Locomotive Act o.J.).

Interessant ist, dass man die Entwicklung des Automobils in anderen Ländern weniger konservativ betrachtete: Eastman berichtete aus den Vereinigten Staaten von Amerika (Eastman 1984, S. 115): „Early proponents of motorized road vehicles argued that they were much safer than horse-drawn vehicles.“ [Frühe Befürworter motorisierter Straßenfahrzeuge argumentierten, dass diese viel sicherer seien als von Pferden gezogene Fahrzeuge. Anm. d. Verf.] Als Hauptgrund dieser vermeintlichen Sicherheit wurde laut Eastman die Tatsache hervorgehoben, dass Pferde scheuen und durchgehen können – Eigenschaften von Lebewesen, die einem Automobil natürlich fremd sind. Allerdings zitierte Eastman auch einen J. Frank Duryea, der Ende des 19. Jahrhunderts in der Diskussion um Vor- und Nachteile des Kraftfahrzeuges gegenüber dem Pferd feststellte (Duryea 1897, zit. n. Eastman 1984, S. 115): „... The mechanical motor is ... superior in many respects, and when its superiority is better known his inferiority will be more apparent.“ [Der mechanische Motor ist ... in vieler Hinsicht überlegen, und wenn seine Überlegenheit besser bekannt ist, wird auch seine Unterlegenheit offensichtlicher sein. Anm. d. Verf.] Die Nachteile der Automobile wurden dann auch schnell offensichtlich: 1899 wurde in New York der erste Fußgänger bei einem Unfall mit einem Automobil tödlich verletzt (vgl. Eastman 1984, S. 115).

Etwa um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert waren die größeren technischen Probleme der eigentlichen Motorisierung gelöst und die Autos hatten sich weg von der motorisierten Kutsche hin zum, auch heute noch so verstandenen, „klassischen“ Automobil entwickelt. Automobile wurden deutlich populärer und ihre Anzahl wuchs besonders in den Städten schnell. Allerdings wurden damit auch die Probleme im Miteinander von Fußgängern und Automobilen immer größer: Das Statistische Bundesamt der Bundesrepublik Deutschland beschreibt in einer Pressemitteilung vom 4. April 2006 (vgl. Statistisches Bundesamt 2006), dass im Jahr 1906/1907, dem ersten Jahr der Aufzeichnung der Straßenverkehrsunfallstatistik in Deutschland, 32 Prozent aller Unfälle von Kraftfahrzeugen Unfälle mit Fußgängern und Radfahrern waren. Damit waren ungeschützte Verkehrsteilnehmer die größte Gruppe der Unfallgegner für die Autofahrer. Auch das dürfte dazu geführt haben, dass die Entwickler der Automobile sich immer mehr mit Themen der Sicherheit beschäftigten und besonders natürlich mit der Sicherheit von Fußgängern und auch Radfahrern.

Mit einer Patentschrift von 1901 ließen sich Doré und Evanovitch die Erfindung eines V-förmigen Schutzschildes an Motorwagen patentieren (vgl. Doré/Evanovitch 1901). Obwohl dieser ausdrücklich als Schutz für den Fahrer deklariert wurde, dürfte er auch Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern zu Gute gekommen sein. Da der Schutzschild auch die Vorderräder eines Fahrzeuges weitgehend mit abdeckte, bestand für Fußgänger eine geringere Gefahr, unter die – damals in der Regel noch freistehenden – Vorderräder zu geraten (siehe Abbildung 1).

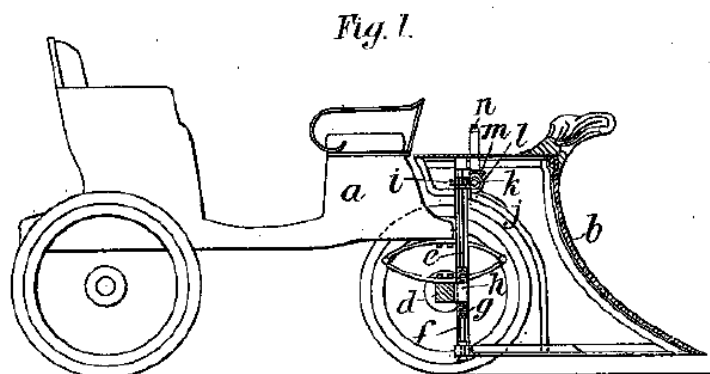
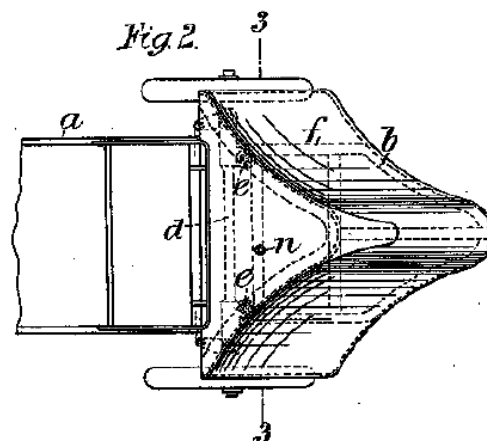


Abb. 1:
V-förmiger Schutzschild an
der Fahrzeugfront
(Doré/Evanovitch 1901,
S. 3).



In der Jubiläumsausgabe 1906 – 2006 zum 100-jährigen Bestehen der Zeitschrift „Automobil Revue“ zitierte Gloor einen Artikel aus der „Automobil Revue“ Nr. 49 von 1913 (vgl. Gloor 2006): Dort wurde ein Mechanismus beschrieben, der aus einem an der Fahrzeugfront angebrachten Netz bestand sowie einem Gestänge, das sich bei einem Unfall mit einem Fußgänger automatisch ausklappte. So sollte ein Fußgänger bei einem Unfall aufgefangen und nicht mehr überrollt werden (siehe Abbildung 2). Allerdings verwies schon die „Automobil Revue“ 1913 darauf, dass der wichtigste Schutz für Fußgänger Vorsicht heiße.



Abb. 2: Mit einem Netz und einem automatisch ausklappenden Gestänge wurden Fußgänger bei einem Unfall aufgefangen (Gloor 2006, S. 45 nach „Automobil Revue“ Nr. 49/1913).

Auch in den folgenden Jahren war das Ziel der Automobilentwickler, ein Überfahren von verunfallten Fußgängern zu vermeiden. Singer und Wortmann erhielten ab dem 6. Mai 1924 ein Patent auf ihre Fußgänger-Fangvorrichtung (vgl. Singer/Wortmann 1925): Ein an einem Hebelmechanismus befestigtes Netz sollte bei einem Kontakt mit einem Fußgänger durch dessen Stoß nach hinten kippen (siehe Abbildung 3) und den Fußgänger dann auffangen und mit dem Fahrzeug weitertransportieren.

Interessant dabei ist, dass bereits damals besonderes Augenmerk auf kleinere Verkehrsteilnehmer, wie Kinder, gerichtet wurde. Singer und Wortmann beschrieben, wie durch spezielle zusätzliche Hebel erreicht wurde, dass die oben beschriebene Fangvorrichtung auch bei Kindern zuverlässig funktionierte (vgl. Singer/Wortmann 1925, S. 2f.).

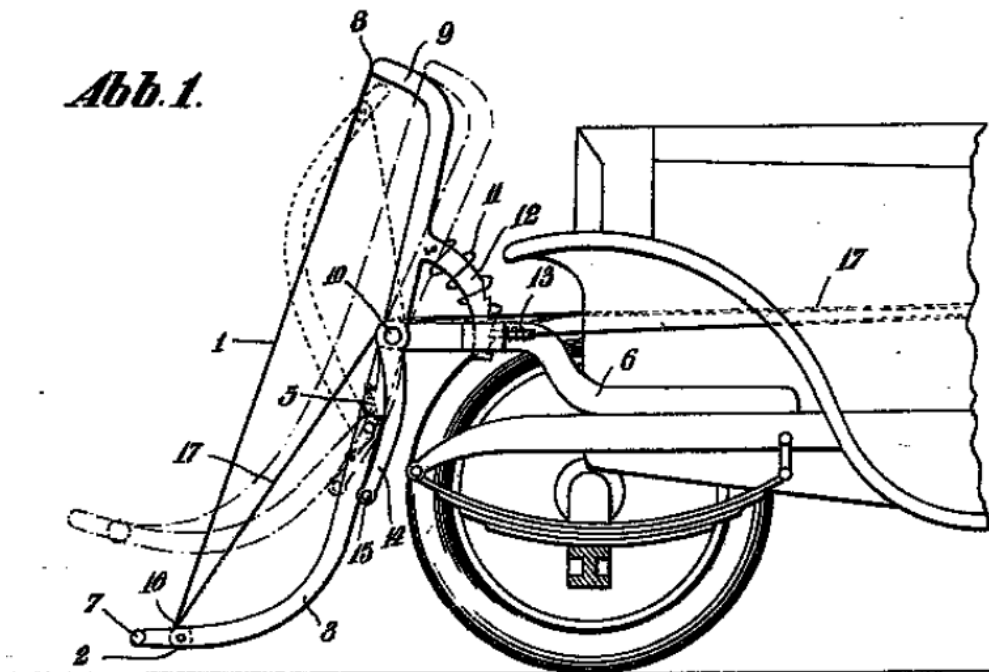


Abb. 3: Fußgänger-Fangvorrichtung an Kraftfahrzeugen
(Singer/Wortmann 1925, S. 4)

In den nächsten Jahrzehnten gab es keine – zumindest keine bedeutenden – Fortschritte im Bereich der fahrzeugseitigen Fußgängersicherheit. Die Entwicklungen in der Fahrzeugsicherheit konzentrierten sich auf den populärer werdenden Rennsport bzw. auf militärische Aspekte. Für den „normalen“ Fahrzeugverkehr versuchten Städte und Gemeinden, die Probleme mit Fußgängerunfällen durch eine klarere Regelung des Miteinanders von motorisierten und ungeschützten Verkehrsteilnehmern in den Griff zu bekommen. Ishaque und Nolan berichteten, dass in den späten 1920er Jahren einige Bezirke der Stadt London mit Fußgängerüberwegen und Straßenmarkierungen experimentierten. Mehr als 50 Jahre vorher, im Jahr 1868, waren erste Versuche mit Verkehrssignalen für Fußgänger noch nach wenigen Monaten erfolglos abgebrochen und dann auch nicht wieder aufgenommen worden (vgl. Ishaque/Nolan o.J.). Im 20. Jahrhundert vermehrte sich die Zahl der Fußgängerüberwege jedoch sprunghaft, bis sich in den späten 1940er/frühen 1950er Jahren dann der so genannte „Zebrastreifen“ durchsetzte (vgl. Wikipedia/Fußgängerüberweg o.J.).

Nach den bahnbrechenden Entwicklungen speziell im Bereich des Insassenschutzes in den 1950er und 1960er Jahren gab es auch Bestrebungen, mehr für die Sicherheit

der ungeschützten Verkehrsteilnehmer zu tun. Der Anlass dafür war in erster Linie die inzwischen rasant angestiegene Anzahl der ungeschützten Verkehrsteilnehmer, die im Straßenverkehr getötet oder verletzt wurden (siehe Kapitel „2.3. Fußgängerunfälle in der Statistik“). In breitem Umfang begann die Grundlagenforschung, um die Kinematik des Fußgängerunfalles nachzuvollziehen und die Verletzungsmechanismen zu verstehen, und die Erarbeitung technischer Lösungen für die entsprechenden Verbesserungen der Fahrzeugfronten.

In einer Anhörung vor dem US-Kongress im Jahr 1965 zur „Rolle des Bundes in der Verkehrssicherheit“ erläuterte Wakeland, dass lebensrettenden bzw. verletzungsvermeidenden Maßnahmen an Fahrzeugen bis zu diesem Zeitpunkt nur eine geringe systematische Aufmerksamkeit geschenkt worden war (vgl. Wakeland 1965, S. 1050). Erste Maßnahmen umfassten den Verzicht auf hakenförmige Türgriffe, hervorstehende Scharniere oder speerförmig hervorstehende Ornamente (Beispiel siehe Abbildung 4); auch erste Fahrzeuge mit abgerundeten Oberflächenkanten an der Front gab es bereits. Allerdings herrschte immer noch die Meinung vor, dass man bei einem Unfall eines ca. 4000 Pfund (ca. 1800 kg) schweren Automobils mit einem ca. 150 Pfund (ca. 70 kg) schweren Fußgänger an schweren Verletzungen wenig ändern bzw. diese lediglich „umverteilen“ könne.



Abb. 4:
(Eventuell nicht repräsentatives,
aber für die betrachtete Zeit
sicherlich nicht untypisches)
Beispiel für eine pfeilförmig aus der
Fahrzeugfront herausragende
Kühlerfigur, hier an einem 1928er
Hispano Suiza im Automobili-
museum Monaco
(Foto: Verfasser)

Wakeland zeigte in seinem Beitrag aber auch, dass und wie sich einzelne Verletzungen von verunfallten Fußgängern direkt einzelnen verletzungsverursachenden Teilen am Fahrzeug zuordnen ließen und dass ein Verzicht auf solche Teile bzw. ein geändertes Design auch die Verletzungsschwere hätte mindern können (vgl. Wakeland 1965, S. 1052ff.). Zwar sei es unter Umständen nicht möglich gewesen, ein existierendes Design radikal zu verändern, da zahlreiche funktionale Notwendigkeiten das Aussehen von Fahrzeugteilen bestimmen. Allerdings könne jede designändernde Maßnahme danach bewertet werden, ob sie die Verletzungen eines ungeschützten Verkehrsteilnehmers minimieren und nicht eine unerwartete

Quelle für neue Verletzungen darstellen könnte. Wakeland schlug daher vor, eine Person - beispielsweise den verantwortlichen Designer - vorsichtig an einem um die Handgelenke geschlungenen Seil über die Fahrzeugfront zu ziehen. So sollte für das gesamte Äußere eines Fahrzeuges festgestellt werden, ob ein Verletzungsrisiko für Fußgänger bestehe. Wakeland nannte diesen Test wegen seiner Ähnlichkeit zu der Prozedur, die in der Vergangenheit bei der Marine praktiziert worden war, den „Automobile Stylists Keel-Hauling Test“, also auf Deutsch etwa den „Automobildesigner-Kielholen-Test“ (vgl. Wakeland 1965, S. 1074). Als zweiten Test schlug Wakeland dann einen Pendeltest mit einer Art Schaukel vor, mit dem lokale Verletzungsquellen mit Hilfe eines einfachen Dummys getestet werden konnten. Diesen Test nannte er „Blunt Trauma Swing Test“, also auf Deutsch etwa „Stumpfe-Verletzungen-Schaukeltest“ (vgl. Wakeland 1965, S. 1074).

Leider ist nicht überliefert, ob Wakeland speziell den ersten oben genannten Test wirklich ernsthaft vorschlug – das darf aber sicherlich bezweifelt werden, auch wenn eine „gefühlte“ Bewertung von Verletzungsquellen sicherlich sinnvoll sein kann. Allerdings führten wohl auch solche Diskussionen dazu, dass in den Jahren danach gesetzliche Regelungen erlassen wurden, die als erste Schritte für den Schutz ungeschützter Verkehrsteilnehmer klare Vorgaben für die äußere Gestaltung von Fahrzeugen machten, beispielsweise Vorgaben zu zugelassenen Radien, die an einer Fahrzeugkarosserie verwendet werden dürfen, zu hervorstehenden Außenkanten und Ornamenten, zu der Größe von Öffnungen in der Fahrzeugaußenhaut und ähnlichem.

Im Jahr 1970 wurde durch das „Committee on the Challenges of Modern Society“¹ der NATO das internationale Programm für „Experimental Safety Vehicles“ (ESV)² initiiert, das die Entwicklung moderner Technologien in der Automobiltechnik vorantreiben sollte (vgl. ESV 2012). Das Programm wurde später unter Beibehaltung der Abkürzung in „Enhanced Safety of Vehicles“³ umbenannt und konzentrierte sich dann verstärkt auf Fragen der Fahrzeugsicherheit sowie der internationalen Zusammenarbeit, um die Zahl der durch Kraftfahrzeuge Getöteten und Verletzten zu reduzieren. Noch heute finden im Zweijahresrhythmus Konferenzen des ESV-Programmes statt, auf denen die neuesten Erkenntnisse der allgemeinen Fahrzeugsicherheit, aber auch der Sicherheit ungeschützter Verkehrsteilnehmer präsentiert werden. Schirmherr der ESV-Aktivitäten ist die US-amerikanische Verkehrssicherheitsbehörde NHTSA (englisch: National Highway Traffic Safety Agency⁴).

¹ Komitee für die Herausforderungen der modernen Gesellschaft

² Experimentalsicherheitsfahrzeuge [gemeint sind Experimentalfahrzeuge zur (Fahrzeug-) Sicherheit; Anm. d. Verf.]

³ Verbesserte Sicherheit von Fahrzeugen

⁴ Nationale Agentur für Fernstraßenverkehrssicherheit [US-amerikanische Verkehrssicherheitsbehörde; Anm. d. Verf.]

In Europa wurde im gleichen Jahr das „European Experimental Vehicles Committee“⁵ (EEVC) ins Leben gerufen, das sich als europäische Antwort auf das ESV-Programm verstand (vgl. EEVC 2011a). Auch hier versuchte man, an Hand von Experimentalfahrzeugen mögliche Fortschritte im Bereich der Fahrzeugsicherheit aufzuzeigen. Später folgte das EEVC dem ESV-Programm mit einer Verallgemeinerung seiner Aufgaben und einer Umbenennung in „European Enhanced Vehicle-safety Committee“⁶ (vgl. EEVC 2011b). Träger des Komitees sind alle europäischen Regierungen, die sich an den Aktivitäten beteiligen möchten; sie werden in der Regel durch ihre Verkehrsministerien repräsentiert. Als Hauptziele werden aktuell die unabhängige wissenschaftliche Forschung im Bereich der Fahrzeugsicherheit sowie die Koordination der europäischen Forschungsaktivitäten genannt (vgl. EEVC 2011b). Allerdings war das EEVC in den letzten Jahren inaktiv.

Beide Programme, sowohl das ESV-Programm als auch die Aktivitäten des EEVC, hatten – und haben – allerdings eine wesentliche Schwäche: Keines der Programme verfügte über eigene finanzielle Mittel, mit denen die Forschung vorangetrieben werden konnte (vgl. EEVC 2011a). Man verließ sich darauf, dass alle Beteiligten ihre Forschung selbst finanzierten und die Ergebnisse dann der Allgemeinheit zur Verfügung stellten. Über weite Strecken funktionierte das offensichtlich recht gut. Allerdings kann man, wenn man beispielsweise die jeweiligen Veröffentlichungen systematisch verfolgt, durchaus auch erkennen, dass einzelne Beteiligte bestimmte Themen unterschiedlich stark vorantrieben und dabei vielleicht auch eigene Interessen verfolgten.

Sowohl im Rahmen des ESV-Programmes als auch im Rahmen der Aktivitäten des EEVC wurden vor allem in der Anfangszeit Gesamtfahrzeuge präsentiert mit der Absicht, experimentelle Lösungen zu zeigen, die die Fahrzeugsicherheit vorantreiben könnten. Dabei konzentrierte man sich nicht speziell auf die Sicherheit ungeschützter Verkehrsteilnehmer, hatte diese aber von Beginn an als einen der wesentlichen Aspekte der Fahrzeugsicherheit im Fokus. Zahlreiche interessante Detaillösungen zeigten dabei, wie man das Thema „Fußgängerschutz“ umsetzen könnte. Lorenz zeigte einige dieser Fahrzeuge, die im Rahmen der 21. ESV-Konferenz 2009 in Stuttgart noch einmal der Öffentlichkeit präsentiert wurden (vgl. Lorenz 2009, S. 3ff.):

Das „Mercedes-Benz Experimentalsicherheitsfahrzeug ESF 13“ von 1972 (siehe Abbildung 4) verfügte beispielsweise über eine verlängerte energieabsorbierende Frontstruktur sowie über gepolsterte Kantenbereiche, um bei einem Zusammenstoß mit einem Fußgänger oder anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern das Verletzungsrisiko möglichst zu minimieren. Anmerken muss man allerdings, dass das wohl wichtigste Auslegungskriterium des ESF 13 die Erfüllung der Anforderungen eines Frontalaufpralles mit 80 km/h gegen eine starre Barriere war.

⁵ Europäisches Komitee für Experimentalfahrzeuge

⁶ Europäisches Komitee für die verbesserte Fahrzeugsicherheit



Abb. 4: Mercedes-Benz Experimentalsicherheitsfahrzeug ESF 13 von 1972 bei der 21. ESV-Konferenz 2009 in Stuttgart (Foto: Lorenz 2009, S. 4)

Das britische „Safety Research Vehicle⁷ SRV 5“ auf Basis des Austin 1300 (siehe Abbildung 5) hatte eine besondere Frontgestaltung, mit der man im Fall eines Unfalls die Kinematik des Fußgängers beeinflussen wollte: Durch einen sehr tief angeordneten Stoßfänger sollte der Fußgänger deutlich unter dem Knie angestoßen werden. Dadurch sollten, falls diese nicht vermieden werden konnten, weniger komplizierte Brüche der unteren Extremitäten verursacht werden. Gleichzeitig sollte der Fußgänger auf die Fahrzeugfront kippen. Ein Fangbügel, der durch den Anprall des Fußgängers ausgelöst worden wäre, hätte diesen dann auf der Fahrzeugfront festgehalten, damit er im weiteren Unfallverlauf nicht durch das Fahrzeug überrollt worden wäre (siehe Abbildung 6). Auf den Begleittafeln zu dem Exponat wurde vermerkt, dass dieser Mechanismus mit Fußgänger-Dummys sehr zuverlässig funktioniert habe (vgl. Lorenz 2009, S. 3).



Abb. 5: Safety Research Vehicle SRV 5 auf Basis des Austin 1300 bei der 21. ESV-Konferenz 2009 in Stuttgart (Foto: Lorenz 2009, S. 3)

⁷ Sicherheitsforschungsfahrzeug

Abb. 6:
Zeitgenössische
Dummy-Versuche
mit dem SRV 5
zeigten die
Funktionsweise der
Fußgängerschutz-
Maßnahmen (Foto:
Lorenz 2009, S. 3)



Das letzte Fahrzeug aus der Ära der reinen Forschungsautomobile, das hier erwähnt werden soll, ist das so genannte UNI-CAR (siehe Abbildung 7). Dieses war als Forschungsfahrzeug in einem vom deutschen Bundesminister für Forschung und Technologie geförderten Projekt von 1979 bis 1981 entwickelt worden. 1981 wurde es auf der Internationalen Automobilausstellung IAA vorgestellt. Entwickelt wurde das UNI-CAR von einer Arbeitsgemeinschaft von vier wissenschaftlichen Instituten der Fahrzeugtechnik (vgl. Hochschularbeitsgemeinschaft 1983): dem Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TH Darmstadt (FZD) unter der Leitung von Professor Bert Breuer, der gleichzeitig als Projektleiter fungierte, dem Institut für Kraftfahrwesen der TH Aachen (IKA) unter Professor Jürgen Helling, dem Institut für Fahrzeugtechnik an der TU Berlin (IFT) unter den Professoren Hermann Appel und Hans-Peter Willumeit sowie dem Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren der Universität Stuttgart (FKFS) unter Professor Ulf Essers. Zahlreiche Industriepartner fertigten Komponenten und Teile nach den Vorgaben der Entwickler. So konnten bis Ende 1982 mit einem kompletten und drei teilausgestatteten fahrfähigen Prototypen weitere Erprobungen durchgeführt werden.



Abb. 7:
Forschungsfahr-
zeug UNI-CAR
von 1981 in der
Ausstellung des
Deutschen
Museums in
München
(Foto: von Rotz
2012)

Zum Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern wurde für das UNI-CAR ein „Softface“ genanntes Kunststoffelement verwendet. Dieses deckte die gesamte Vorderfront ab (siehe Abbildung 8). Das Element bestand aus einem ca. 200 mm dicken Polyurethan-Schaum. Bei einem Unfall bis zu einer Kollisionsgeschwindigkeit von 45 km/h sollten so die Belastungen für den Fußgänger unterhalb der erträglichen biomechanischen Grenzwerte bleiben. Ergänzt wurde das Softface durch eine Motorhaube in Sandwich-Bauweise: Zwischen den Außenlagen aus glasfaserverstärktem Kunstharz befand sich eine energieabsorbierende Schaumschicht, die oberste Schicht bildete eine zähelastische Deckhaut. Darüber hinaus wurden integrierte Scheinwerfer und Außenspiegel verwendet sowie sämtliche Teile der Tragkonstruktion mit Schaumstoff gepolstert – Maßnahmen, welche die Aggressivität der Fahrzeugform weiter verringern sollten. Allerdings weisen die Entwickler bereits in ihrem Abschlussbericht auf Zielkonflikte hin (Hochschularbeitsgemeinschaft 1983, S. 347): „Es dürfte kaum gelingen, an der gesamten Oberfläche gleiche Steifigkeit zu erreichen, da immer verhärtend wirkende Ecken, Kanten, Rippen oder sonstige, in einem ungünstigen Winkel zur Aufprallrichtung stehende Flächen und Anschlusssteile in Kauf genommen werden müssen; ein zu beachtender Nachteil bei derart komplexen Bewegungsabläufen wie dem Fußgängerunfall.“ Außerdem wurden für die Herstellung des Softface-Kunststoffelementes Fertigungszeiten von etwa 10 Minuten pro Stück veranschlagt. Ein solcher Wert ist bis heute in der Großserienfertigung von Automobilen kaum akzeptabel.

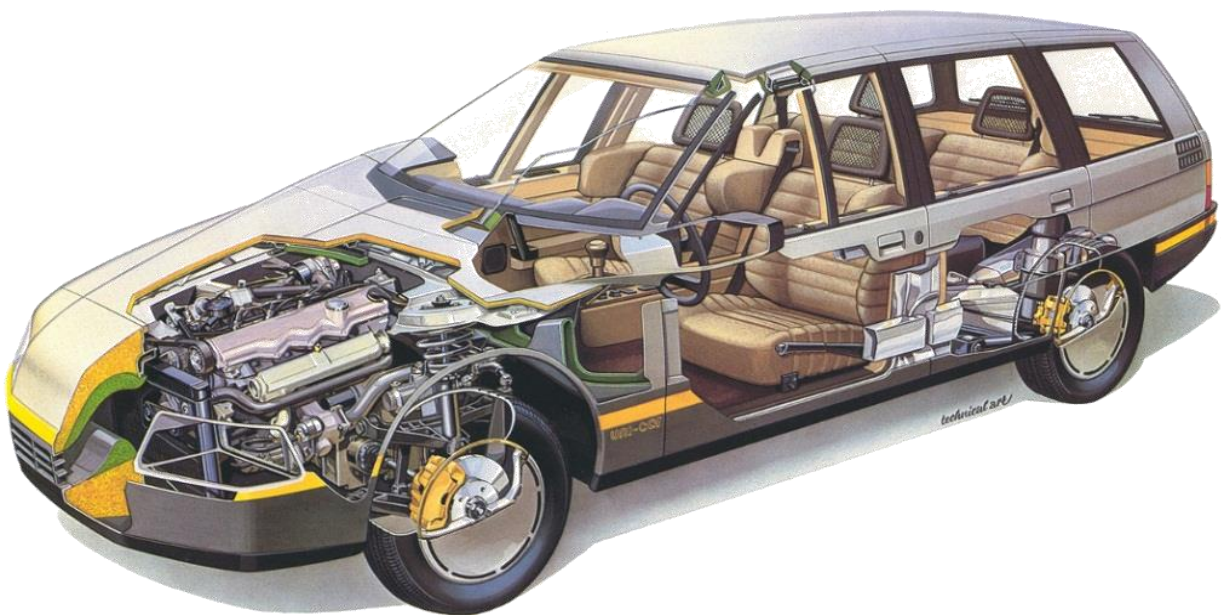


Abb. 8: Fußgängerschutz-optimierte Fahrzeugfront des UNI-CAR mit Softface, Sandwich-Motorhaube sowie weiteren Maßnahmen zur Verringerung der Aggressivität der Fahrzeugform (Hochschularbeitsgemeinschaft 1983; farbige Darstellung Wallentowitz 2007, S. 11)

Neben den gezeigten und zahlreichen weiteren Forschungsautomobilen gab es aber auch gezielte Detailuntersuchungen. So wollte man Ursachen und Abläufe von Fußgängerunfällen nachvollziehen, um technische Lösungen zur Reduzierung der Getöteten- und Verletztanzahlen zu erarbeiten. Lorenz berichtete von einem 1981 vorgeschlagenen ersten Testverfahren, mit dem Fahrzeuge auf ihre „Fußgängerfreundlichkeit“ geprüft werden sollten (vgl. Lorenz 2009): Verschiedene Dummies sollten am Kopf aufgehängt und unmittelbar vor dem Anprall an eine Fahrzeugfront von ihren Aufhängungen getrennt werden. So hätte der Anprall von stehenden Fußgängern an reale Fahrzeuge simuliert werden können (siehe Abbildung 9).

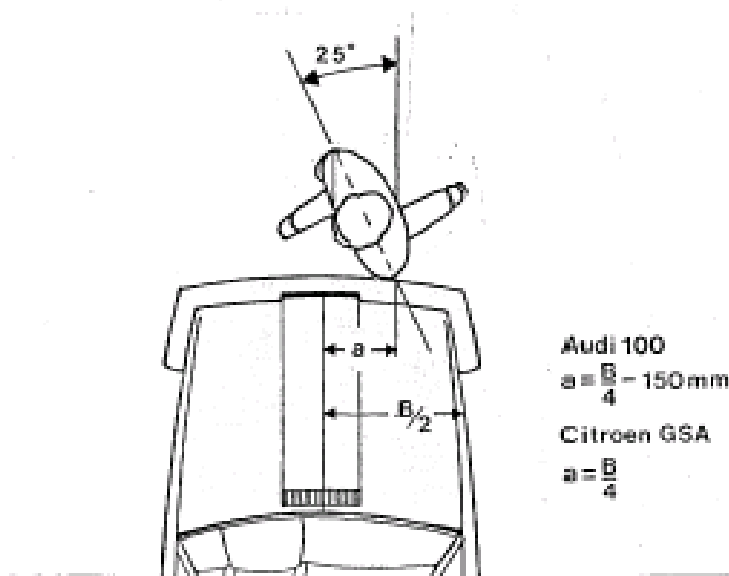


Abb. 9:
Erste Ideen für ein
Fußgängerschutz-Test-
verfahren mit einem Dummy
(Lorenz 2009, S. 9)

Auch Hahn berichtete von Tests mit modifizierten Dummies (vgl. Hahn 1999, S. 3ff.), die die Automobilindustrie bereits in den späten 1970er Jahren durchführte (siehe Abbildung 10).

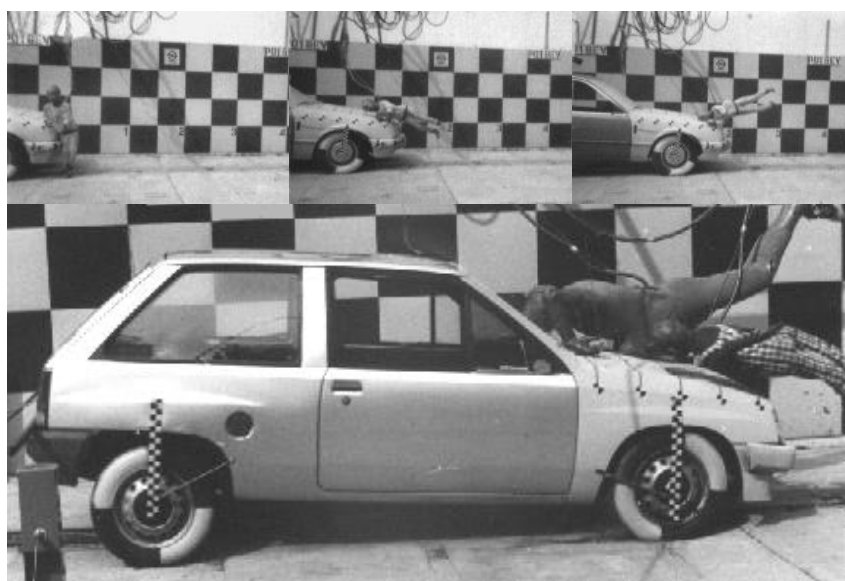


Abb. 10: Versuche mit Dummies um 1980/1982 zur Nachbildung eines Unfalles von einem Fahrzeug mit einem Fußgänger (Hahn 1999, S. 4)

Die Erkenntnisse aus solchen Tests führten – neben Einflüssen beispielsweise aus dem Bereich der Aerodynamik – dazu, dass sich das Aussehen von Fahrzeugen speziell in den späten 1970er und frühen 1980er Jahren deutlich änderte (siehe Abbildung 11).

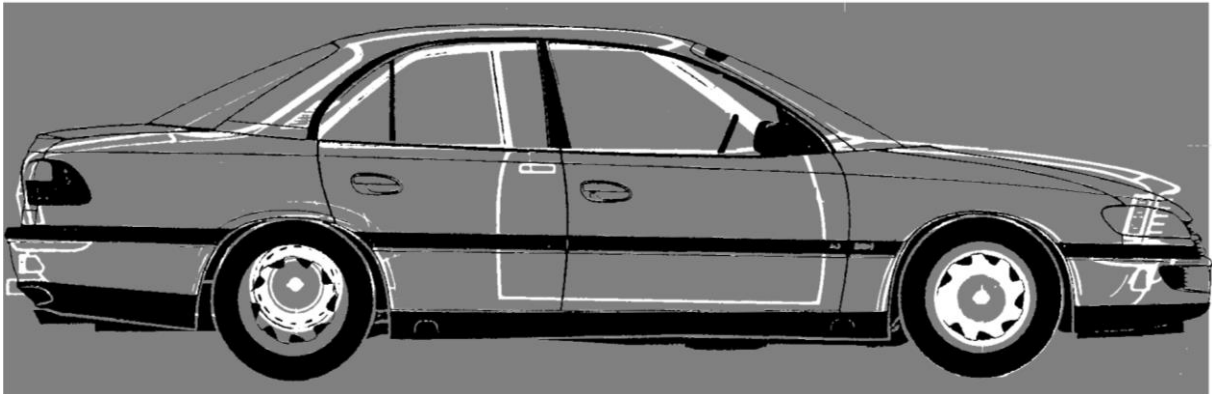


Abb. 11: Veränderung der äußeren Form von Fahrzeugen im Vergleich von einem Opel Rekord von 1978 (weiße Kontur) und einem Opel Omega von 1995 (schwarze Kontur) (Hahn 1999, S. 4)

2.2. Entwicklung der heutigen Testverfahren und Testwerkzeuge

Eine herausragende Rolle bei der gezielten Grundlagenforschung spielte auch die Arbeit des „European Experimental Vehicles Committee“ (EEVC, später umbenannt in „European Enhanced Vehicle-safety Committee“, siehe auch Kapitel „2.1. Historischer Überblick“). Kooperierende Forschungsinstitute der beteiligten europäischen Länder untersuchten dabei verschiedene Themen der Fahrzeugsicherheit detailliert. Speziell mit dem Thema Fußgängerunfall beschäftigten sich im Laufe der Jahre drei Arbeitsgruppen des EEVC, eine weitere mit dem Thema Radfahrer- und Zweiradunfälle sowie eine mit den biomechanischen Grundlagen (vgl. EEVC 2011c):

- Die EEVC-Arbeitsgruppe 4, „Biomechanics“⁸, untersuchte 1976⁹, welche der biomechanischen Parameter des Menschen bei Aufprall- und Crashtests berücksichtigt werden sollten. Über die Ergebnisse wurde auf der ESV-Konferenz 1976 in Washington berichtet (vgl. EEVC 2011c).
- Die Arbeitsgruppe 7, „Pedestrian Safety“¹⁰, analysierte 1982 Unfalldaten, um herauszufinden, wie man Fußgängerschutz am effektivsten umsetzen könnte.
- Die Arbeitsgruppe 8, „Cycle and two wheeler accidents“¹¹, untersuchte parallel zur Arbeit der AG 7 1985 Unfälle mit Zweirädern, speziell wegen der Bedeutung dieser Unfälle in den Niederlanden.
- Die Arbeitsgruppe 10, „Pedestrian Protection“¹², nutzte 1989 die Erkenntnisse der AG 7 zur Entwicklung von Testverfahren und Testwerkzeugen.
- Die Arbeitsgruppe 17, „Pedestrian“¹³, setzte die Arbeit der AG 10 1997 fort.

Wegen Ihrer Bedeutung für das Thema Fußgängerschutz soll auf die Tätigkeit der Arbeitsgruppen 7, 10 und 17 im Detail eingegangen werden:

In ihrem Bericht für die ESV-Konferenz 1982 in Kyoto (Japan) erläuterte die EEVC-Arbeitsgruppe 7 im Detail ihre Herangehensweise an das Problem der Fußgängerunfälle (vgl. EEVC 1982). Zahlreiche Quellen waren seit 1980 analysiert worden, um die Ursachen bestimmter im Realunfallgeschehen auftretender Verletzungen zu verstehen. Diesen Analysen wurden die damaligen Kenntnisse zu den Verletzungsmechanismen sowie zu den ertragbaren menschlichen Belastungen

⁸ Biomechanik

⁹ Die genannten Jahreszahlen in dieser Aufstellung beziehen sich auf die Angaben auf der Internetseite des EEVC. Tatsächlich haben die jeweiligen Arbeitsgruppen aber über einen gewissen Zeitraum aktiv gearbeitet. Diese Zeiträume werden, wenn nötig, im folgenden Verlauf der Arbeit detaillierter dargestellt; Anm. d. Verf.

¹⁰ Fußgängersicherheit

¹¹ Rad- und Zweiradunfälle

¹² Fußgängerschutz

¹³ Fußgänger

gegenübergestellt. Anschließend wurde der Einfluss der Fahrzeuggestaltung auf den Fußgängerschutz untersucht, um daraus erste Testverfahren abzuleiten.

Besonders die Ergebnisse der Tätigkeit der AG 7 hatten einen wesentlichen Einfluss auf alle weiteren Diskussionen zum Thema Fußgängerschutz. Sie werden deshalb hier noch einmal im Detail dargestellt:

Der erste Anprall eines Fußgängers an einem Fahrzeug erfolgt im Realunfall in der Mehrheit der Fälle im Bereich der Fahrzeugfront (siehe Abbildung 12). Im Durchschnitt der von der AG 7 ausgewerteten Quellen beträgt der Anteil dieser Frontalunfälle etwa 75 % (vgl. EEVC 1982, S. 23). In über 90 % der Fälle wird der Fußgänger dabei seitlich getroffen (vgl. EEVC 1982, S. 24).

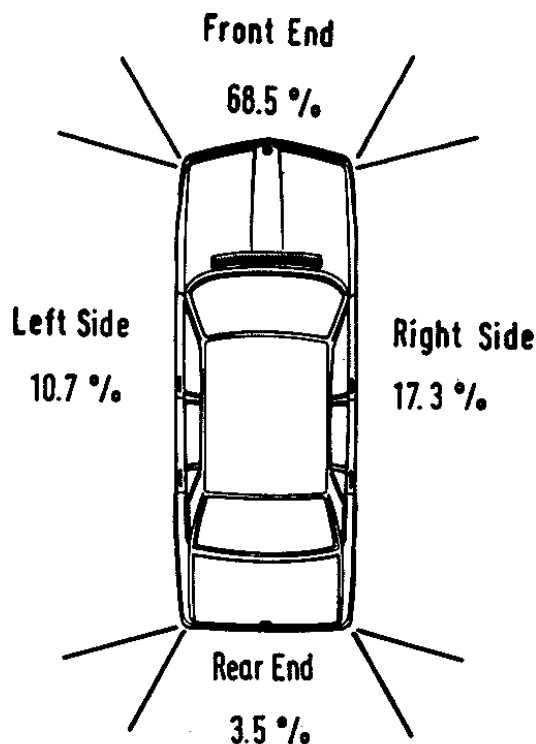


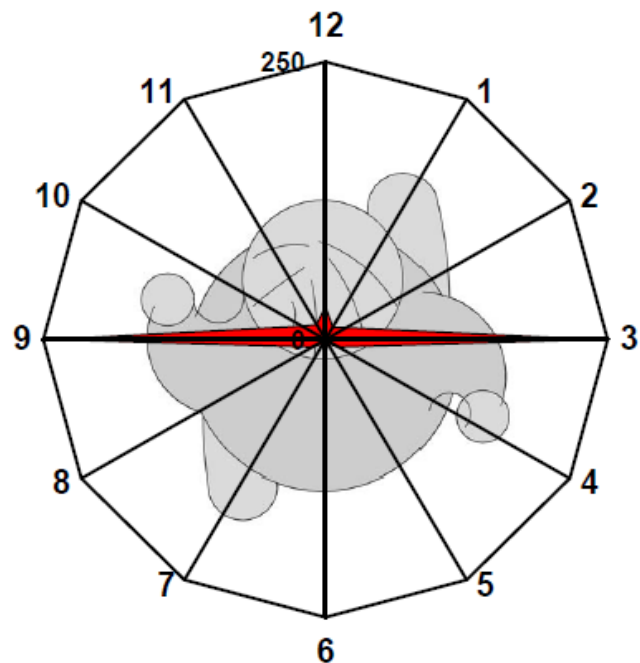
Abb. 12:
Eines der Beispiele für die Position des ersten Anpralls eines Fußgängers am Fahrzeug aus dem Bericht der AG 7 (Danner/Langwieder/Wachter 1979, zit.n. EEVC 1982, S. 43)

Neuere Untersuchungen, beispielsweise der Verkehrsunfallforschung (VUFO) an der TU Dresden auf der Basis von GIDAS-Daten¹⁴, belegen, dass diese Erkenntnisse auch heute noch Bestand haben: Bei den von der VUFO ausgewerteten Unfällen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen mit Fußgängern im Zeitraum von

¹⁴ German In-Depth Accident Study (deutsch: Deutsche Detail-Unfallstudie) steht für ein Gemeinschaftsprojekt der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) sowie der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) in Deutschland; die VUFO ist einer der Auftragnehmer für die Erhebung, Rekonstruktion und Auswertung der Unfalldaten; Anm. d. Verf.

1999 bis 2005 waren ca. 65 % aller Unfälle Fahrzeug-Frontalunfälle (vgl. Liers/Hannawald/Brehme 2007a, S. 39), und mit ca. 75 % Anteil wurde nach wie vor in der Mehrheit aller Unfälle der Fußgänger seitlich von rechts oder links getroffen (siehe Abbildung 13).

Abb. 13:
Darstellung der Orientierung des Fußgängers (in der Draufsicht) während eines Unfalles (Liers/Hannawald/Brehme 2007b, S. 32)



Nach den Erkenntnissen der EEVC-Arbeitsgruppe 7 stellen bei der Betrachtung der Gesamtheit aller Verletzungen Kopfverletzungen, Verletzungen der unteren Extremitäten sowie zusätzlich – speziell bei Kindern und älteren Fußgängern – Verletzungen im Bereich des Beckens zahlenmäßig den größten Anteil der Verletzungen dar. Kopfverletzungen sowie – speziell bei älteren Fußgängern – Brustverletzungen sind die häufigsten Ursachen für schwerste und tödliche Verletzungen. Die Verletzungshäufigkeit sowie die Verletzungsschwere hängen also auch vom Alter des jeweiligen Fußgängers ab (siehe Abbildungen 14 bis 16).

Auch die Untersuchungsergebnisse der AG 7 zur Verletzungshäufigkeit und zur Verletzungsschwere werden durch die neueren Datenauswertungen der VUFO prinzipiell bestätigt (vgl. Liers/Hannawald/Brehme 2007a, S. 20ff.).

* Total: 321 Children (up to the Age of 15 Years) = 100%

Body Areas Injured	AIS 1		AIS 2		AIS 3		AIS4/5		AIS 6		Total Injuries per Body Area	
	No.	%*	No.	%*	No.	%*	No.	%*	No.	%*	No.	%*
Head	152	64.1	35	14.8	14	5.9	18	7.6	18	7.6	237	73.8
Cervical Spine	2	-	-	-	1	-	-	-	3	-	6	1.9
Dorsal/Lumbar Spine	5	-	-	-	2	-	-	-	-	-	7	2.2
Chest	4	33.3	2	16.7	2	25.0	3	25.0	-	-	12	3.7
Pelvis / Abdomen	40	51.9	10	13.0	19	24.7	8	10.4	-	-	77	24.0
Shoulder	13	-	11	-	-	-	-	-	-	-	24	7.5
Upper Arm	29	69.0	11	26.2	2	4.8	-	-	-	-	42	13.1
Forearm	7	-	5	-	-	-	-	-	-	-	12	3.7
Hand	15	-	5	-	-	-	-	-	-	-	20	6.2
Femur	26	32.9	46	58.2	7	8.9	-	-	-	-	79	24.6
Knee	34	-	5	-	-	-	-	-	-	-	39	12.1
Lower Leg	34	37.4	47	51.6	10	11.0	-	-	-	-	91	28.3
Foot	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	4.4

* Percentages are given for Injuries of high Priority only

* Total: 432 Adults (15-65 Years of Age) = 100%

Body Areas Injured	AIS 1		AIS 2		AIS 3		AIS4/5		AIS 6		Total Injuries per Body Area	
	No.	%*	No.	%*	No.	%*	No.	%*	No.	%*	No.	%*
Head	148	51.2	58	20.0	25	8.7	24	8.3	34	11.8	289	66.9
Cervical Spine	7	-	1	-	3	-	1	-	1	-	13	2.9
Dorsal/Lumbar Spine	14	-	1	-	6	-	2	-	-	-	23	5.3
Chest	21	44.8	7	14.9	12	25.5	2	4.2	5	10.6	47	10.9
Pelvis / Abdomen	48	55.3	3	3.4	33	37.9	2	2.3	1	1.1	87	20.1
Shoulder	31	-	15	-	1	-	-	-	-	-	47	10.9
Upper Arm	42	63.6	17	25.8	7	10.6	-	-	-	-	66	15.2
Forearm	14	-	5	-	3	-	-	-	-	-	22	5.1
Hand	32	-	5	-	2	-	-	-	-	-	39	9.1
Femur	60	58.3	26	25.2	17	16.5	-	-	-	-	103	23.8
Knee	76	-	11	-	11	-	-	-	-	-	98	22.6
Lower Leg	85	39.7	53	24.8	74	34.6	2	0.9	-	-	214	49.5
Foot	18	-	6	-	-	-	-	-	-	-	24	5.6

* Percentages are given for Injuries of high Priority only

* Total: 207 Elderly Adults (65 Years and up) = 100%

Body Areas Injured	AIS 1		AIS 2		AIS 3		AIS4/5		AIS 6		Total Injuries per Body Area	
	No.	%*	No.	%*	No.	%*	No.	%*	No.	%*	No.	%*
Head	58	40.6	35	24.5	5	3.5	16	11.2	29	20.2	143	69.1
Cervical Spine	2	-	1	-	1	-	1	-	5	-	10	4.8
Dorsal/Lumbar Spine	4	-	1	-	4	-	1	-	-	-	10	4.8
Chest	16	44.4	5	13.9	6	16.7	2	5.6	7	19.4	36	17.4
Pelvis / Abdomen	16	30.8	6	11.5	24	46.2	5	9.6	1	1.9	52	25.1
Shoulder	12	-	10	45.5	-	-	-	-	-	-	22	10.6
Upper Arm	10	41.7	11	45.8	3	12.5	-	-	-	-	24	11.6
Forearm	6	-	5	-	1	-	-	-	-	-	12	5.8
Hand	14	-	3	-	-	-	-	-	-	-	17	8.2
Femur	21	44.7	14	29.8	12	25.5	-	-	-	-	47	22.7
Knee	23	-	6	-	2	-	-	-	-	-	31	15.0
Lower Leg	29	25.4	48	43.0	36	31.6	-	-	-	-	114	55.1
Foot	28	-	6	-	2	-	-	-	-	-	36	17.4

* Percentages are given for Injuries of high Priority only

Abb. 14 – 16: Darstellung der Verletzungen für Kinder bis 15 Jahre (oben), Erwachsene zwischen 15 und 65 Jahre (Mitte) sowie für Erwachsene über 65 Jahre (unten) nach verletzter Körperregion sowie nach Verletzungsschwere entsprechend der „Abbreviated Injury Scale“¹⁵ (AIS) in einer der Quellen der AG 7. Jeweils oben links ist die Gesamtzahl der Fälle angegeben; die Tabellen nennen die Absolut- sowie die Prozentzahlen (Langwieder/Danner/Wachter/Hummel 1980, zit.n. EEVC 1982, S. 34ff.).

Betrachtet man die verletzungsverursachenden Teile am Fahrzeug, kommt die AG 7 zu dem Schluss, dass die meisten Verletzungen durch den Stoßfänger, die Motorhaube oder die Kotflügel eines Fahrzeuges verursacht werden. Die Windschutzscheibe oder der Windschutzscheibenrahmen sind relativ selten die verletzungsverursachenden Teile, allerdings ist ein Anprall bzw. ein Aufprall auf diesen Bereich oft mit schwersten oder tödlichen Verletzungen verbunden.

¹⁵ Abbreviated Injury Scale (AIS) (deutsch: Abgekürzte Verletzungsskala) ist ein System der vereinfachten Klassifizierung von Typ bzw. Schwere von Verletzungen nach Verkehrsunfällen; Anm. d. Verf.

Regelmäßig kommt es auch zu einem Sekundäraufprall auf dem Boden¹⁶, der Sekundäraufprall ist sogar die häufigste Verletzungsursache. Allerdings verursacht ein solcher Aufprall nach den Erkenntnissen der AG 7 in der Regel eher weniger schwere Verletzungen.

Auch diese Erkenntnisse werden durch die neueren Untersuchungen der VUFO bestätigt (vgl. Liers/Hannawald/Brehme 2007a, S. 26ff.). Dabei wird jedoch festgestellt (Liers/Hannawald/Brehme 2007a, S. 28): „The importance of ground impacts (secondary impacts) is very large. Regarding the head and the upper extremities injuries, the number of injuries caused by the ground impact is at least as large as the sum of all vehicle parts.“ [Die Wichtigkeit von Bodenaufprallen (Sekundäraufprallen) ist sehr hoch. Bezüglich der Verletzungen des Kopfes und der oberen Extremitäten ist die Anzahl der Verletzungen, die durch den Bodenaufprall verursacht werden, mindestens so hoch wie die Summe der Verletzungen durch alle Fahrzeugteile. Anm. d. Verf.] Leider machen Liers, Hannawald und Brehme aber keine detaillierten Aussagen zur Schwere der Verletzungen nach dem Bodenaufprall im Vergleich zum Fahrzeuganprall bzw. -aufprall. Die Autoren heben aber noch einmal hervor, dass der Stoßfänger das am häufigsten getroffene Fahrzeugteil ist und dass dabei fast ausschließlich Verletzungen der unteren Extremitäten entstehen – eine Aussage, die die Wichtigkeit der vorliegenden Arbeit noch einmal unterstreichen soll.

Kein klares Bild ergibt sich in dem Bericht der AG 7 zu den Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt der Kollision des Fußgängers mit dem Fahrzeug. Es werden Studien zitiert, nach denen sich 90 % der Unfälle von Fußgängern mit Fahrzeugen in einem Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 44 km/h ereignen (Ashton/Mackay 1979, zit.n. EEVC 1982, S. 27) bzw. in einem Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 58 km/h (Appel/Kuehnel/Stürtz/Gloeckner o.J., zit.n. EEVC 1982, S. 27). Eines der Probleme zu dieser Zeit war dabei sicherlich die eingeschränkte Möglichkeit, die Kollisionsgeschwindigkeit zu ermitteln: Die AG 7 verweist darauf, dass man sich auf Aussagen von Unfallbeteiligten oder Unfallzeugen verlassen musste oder Schlüsse aus den Bremsspuren zu ziehen versuchte (vgl. EEVC 1982, S. 26).

Die Ergebnisse der Untersuchungen der VUFO sind eindeutiger und zeigen gleichzeitig die deutlich verbesserten Möglichkeiten der heutigen Unfallforschung: Liers, Hannawald und Brehme berücksichtigen in ihren Aussagen zur Kollisionsgeschwindigkeit nur Unfälle, bei den diese Geschwindigkeit zuverlässig rekonstruiert werden konnte. Sie zeigen, dass sich 77,5 % aller Unfälle mit Fußgängern in einem Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 40 km/h ereignen und ca. 91 % in einem Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 50 km/h (vgl. Liers/Hannawald/Brehme 2007a, S. 14). Geht man davon aus, dass – zumindest in zahlreichen Fällen

¹⁶ Die AG 7 erläutert den Begriff Boden nicht weiter. Liers/Hannawald/Brehme erläutern, dass der Bodenkontakt den Aufprall auf die Straßenoberfläche, den Bordstein, Pfeiler, Wände oder andere Objekte einschließt (Liers/Hannawald/Brehme 2007a, S. 27); Anm. d. Verf.

– die Fahrzeugführer noch versucht haben zu bremsen, dürfte die Ausgangsgeschwindigkeit der Fahrzeuge bei den jeweiligen Unfällen noch einmal höher gewesen sein. Damit kann man davon ausgehen, dass eine Kollisionsgeschwindigkeit von 40 km/h in etwa der zulässigen Geschwindigkeit von 50 km/h im Stadtverkehr entspricht.

Die Erkenntnisse der AG 7 stellten eine detaillierte Analyse des Unfallgeschehens dar – doch wie sollte man diese Erkenntnisse jetzt in der Interaktion zwischen Fahrzeugen und ungeschützten Verkehrsteilnehmern berücksichtigen? Der abschließende Bericht der AG 7 gab auch einige Hinweise, wie man das Aussehen von Fahrzeugen verändern könnte, um die Verletzungsrisiken abzusenken (vgl. EEVC 1982, S. 53ff.): Abgesenkte Vorderkanten der Fronthauben, „Softface“-Fronten mit möglichst langen Motorhauben, gepolsterte Windschutzscheibenrahmen, Verzicht auf harte Strukturen unmittelbar unter den Oberflächen mit möglichen Verformungswegen von ca. 200 mm, zurückgesetzte Scheinwerfer, abgedeckte Scheibenwischer sowie die Verwendung von Fahrzeugkomponenten aus weicheren Materialien – Maßnahmen, wie man sie an den Forschungsfahrzeugen jener Zeit schon regelmäßig sehen konnte. Die AG 7 stellte allerdings auch fest, dass die Umsetzung solcher Maßnahmen mit höheren Kosten für Fahrzeugkäufer verbunden sein würde.

Abschließend analysierte die AG 7 die zur Zeit ihrer Arbeit, also in den späten 1970er und frühen 1980er Jahren, verfügbaren Testverfahren. Tests von ganzen Originalfahrzeugen mit Dummys oder auch mit PMTO¹⁷ ermöglichten einen umfassenden Überblick über die Interaktion von Fahrzeug und Fußgänger, waren aber sehr komplex in der Durchführung und deshalb sehr teuer, gleichzeitig war dadurch die Wiederholbarkeit eingeschränkt. Tests von Fahrzeugsegmenten waren einfach durchführbar und erlaubten eine zuverlässige Bewertung einzelner Strukturen, allerdings war keine Bewertung der gesamten Fahrzeuggestalt und der Interaktion mit einem Fußgänger möglich. Als vermutlich genaueste Methode für die Analyse und den Vergleich von Fahrzeug-Designelementen sah die AG 7 Rechenmodelle, vorausgesetzt diese seien vollständig und nach einem zufriedenstellenden Standard validiert. Alle diese Methoden wurden im Einzelnen nach ihren Vor- und Nachteilen bewertet; unter anderem werden auch die später verwendeten Komponententests mit Kopf- und Beinprüfkörpern genauer beschrieben.

Eine Ad-hoc-Gruppe von EEVC-Fußgängerschutzexperten berichtete auf der ESV-Konferenz 1985 über Bestrebungen, unter Berücksichtigung der von der AG 7 gezogenen Schlussfolgerungen ausführliche Testverfahren zu entwickeln (vgl. EEVC 1985). Es wurde hervorgehoben, dass es langfristig das Ziel sein sollte, AIS-3- und schwerere Verletzungen bei Unfallgeschwindigkeiten von bis zu 40 km/h zu vermeiden (vgl. EEVC 1985, S. 972). Für die kurzfristige Umsetzung empfahl die Ad-

¹⁷ Post-Mortem-Testobjekte [gemeint sind Leichen bzw. manchmal auch Leichenteile; Anm. d. Verf.]

hoc-Gruppe noch einmal, bei der Fahrzeugentwicklung unnachgiebige Bereiche unter der Motorhaube und den Kotflügeln von Fahrzeugen zu vermeiden. Außerdem sollten die Stoßfänger so nachgiebig gestaltet werden, dass Knieverletzungen ausgeschlossen und die Anprallkräfte besser verteilt werden würden. Als Kriterien dafür sah man die Scherkräfte im Knie und das Biegemoment im Bereich des Knies (vgl. EEVC 1985, S. 973ff.). Zusätzlich wurde eine Bewertung der Vorderkante der Fronthaube vorgesehen, die über eine maximal zulässige Verformungskraft erfolgen sollte. Die notwendige Anprallenergie sollte sich aus den geometrischen Daten der Fahrzeugfront – der Höhe der Fronthaubenvorderkante sowie der Position des Stoßfängers im Verhältnis zu dieser Kante – ableiten lassen (vgl. EEVC 1985, S. 974). Längerfristig sah man die Notwendigkeit, auch Maßnahmen gegen Kopfverletzungen zu entwickeln. Für alle diese Empfehlungen äußerte die Ad-hoc-Gruppe erste Vorschläge für mögliche Testverfahren und detaillierte Bewertungskriterien. Die Experten betonten jedoch, dass vor einer Umsetzung entsprechender Testverfahren umfangreiche weitere Forschung notwendig wäre.

Im Jahr 1987 rief das EEVC die neue Arbeitsgruppe 10 ins Leben, die endgültig detaillierte Testverfahren entwickeln sollte, um den Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern zu bewerten. Die AG 10 bestand aus Repräsentanten sowohl von Forschungsinstituten als auch der Automobilindustrie. Janssen erläuterte in seinem Bericht über die Arbeit der AG 10, dass man sich dabei auch auf die Erkenntnisse der AG 7 sowie der zuvor erwähnten Ad-hoc-Gruppe bezog (vgl. Janssen 1996, S. 1).

Neuere Erkenntnisse standen der AG 10 durch die Arbeit eines Konsortiums zur Verfügung, welches aus der deutschen „Bundesanstalt für Straßenwesen“ (BASt), den französischen „Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité“¹⁸ (INRETS) und „Laboratoire d’Accidentologie, de Biomécanique et d’étude du comportement humain“¹⁹ (LAB), der „Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek“²⁰ (TNO) sowie dem britischen „Transport Research Laboratory“²¹ (TRL) bestand (vgl. Janssen 1996, S. 1). Janssens Bericht ließ offen, ob es sich bei diesem Konsortium um eine Untergruppe der AG 10 handelte oder ob dieses parallel tätig war.

Lawrence und Hardy erläuterten später, dass die Aufgabenverteilung innerhalb der AG 10 folgende Verantwortlichkeiten vorsah (vgl. Lawrence/Hardy 1998, S. 2131f.): Die BASt war verantwortlich für die Entwicklung einer Kopfaufprallprozedur sowie der Prototypen für die Kopfprüfkörper. TRL entwickelte den Test für den Oberschenkelprüfkörper gegen die Fronthaubenvorderkante sowie den notwendigen Prüfkörper. INRETS war verantwortlich für die Entwicklung des Tests für den

¹⁸ Nationales Institut für Forschung zum Verkehr und seine Sicherheit

¹⁹ Labor für Unfallursachenforschung, Biomechanik sowie das Verhalten des Menschen

²⁰ Niederländische Organisation für angewandte naturwissenschaftliche Untersuchungen

²¹ Transportforschungslabor

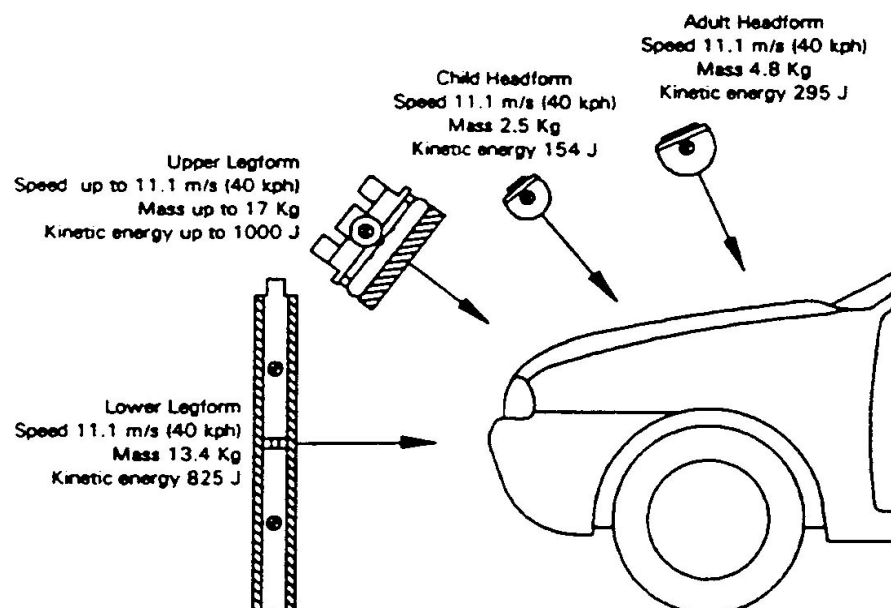
Beinprüfkörper gegen den Stoßfänger sowie eines dazugehörenden Beinprüfkörpers. Abschließend verbesserten TNO das Design der Kopfprüfkörper und wiederum TRL das des Oberschenkel- sowie des Beinprüfkörpers bis zur Produktionsreife. Vor allem der Beinprüfkörper wurde dabei noch einmal umfangreich verändert: Lawrence und Hardy verwiesen ausdrücklich auf die Weiterentwicklung des INRETS-Forschungsprüfkörpers zu einem Prüfkörper für den Einsatz als „regulatory tool“, also als „Gesetzeswerkzeug“ (vgl. Lawrence/Hardy 1998, S. 2132).

Lawrence und Hardy betonten auch noch einmal die Vorteile von Subsystemtests gegenüber Tests mit Dummies (Lawrence/Hardy 1998, S. 2132): „If pedestrian dummies were used for legislative tests it would be very difficult to predict and control the impact locations of the body parts to selected danger points accurately, particularly the head.“ [Falls Fußgängerdummies für Gesetzestests verwendet werden würden, wäre es sehr schwierig, die Anprallpunkte der Körperteile, besonders des Kopfes, vorherzusagen und zu kontrollieren, um die ausgewählten Gefahrenpunkte präzise zu testen. Anm. d. Verf.] Mit solchen Tests konnten die Bereiche von Fahrzeugen, welche überproportional viele Verletzungen von Fußgängern verursachten, gezielt und unter definierten Bedingungen getestet werden.

Der abschließende Bericht der EEVC-AG 10 war bereits im November 1994 veröffentlicht worden und schlug die Testverfahren vor, die im Wesentlichen bis heute die Grundlage aller Fußgängerschutztests darstellen (siehe Abbildung 17, vgl. EEVC 1994 sowie Janssen 1996):

- Den Anprall eines Beinprüfkörpers an den Stoßfänger,
- Den Aufprall eines Oberschenkelprüfkörpers auf die Vorderkante der Fronthaube,
- Den Aufprall von Kopfprüfkörpern, die einen Kinder- bzw. einen Erwachsenenkopf darstellen, auf die Motorhaube.

Abb. 17:
Fußgängerschutz-
Testverfahren
entsprechend den
Vorschlägen der
AG 10
(EEVC 2002, S. 7)



Nach der Veröffentlichung des Abschlussberichtes der AG 10 begannen Untersuchungen, um die neuen Testverfahren technisch zu bewerten und ihre Umsetzbarkeit zu testen. Green berichtete im Namen der im Europäischen Automobilhersteller-Verband ACEA²² organisierten Automobilhersteller über ein umfangreiches Testprogramm der europäischen Automobilindustrie, in dem zahlreiche damals aktuelle Modelle nach den neuen Verfahren getestet wurden (vgl. Green 1998). Aus den Ergebnissen der insgesamt 269 Tests schloss Green, dass die Testverfahren mit den beiden Kopfprüfkörpern bereits recht ausgereift erschienen, dass aber bei den Tests mit dem Oberschenkelprüfkörper und besonders mit dem Beinprüfkörper starke Zweifel an der Wiederholbarkeit und der Vergleichbarkeit bestanden (vgl. Green 1998, S. 2150). Green forderte, dass Details der Testverfahren geändert bzw. klargestellt werden sollten, und betonte, dass Widersprüche der neuen Fußgängerschutzanforderungen zu anderen Anforderungen zum Unfallverhalten von Fahrzeugen gesehen wurden. Deutlich hob Green hervor, dass die Umsetzung der neuen Anforderungen für alle An- bzw. Aufprallbereiche eine große Herausforderung darstellen und die europäische Fahrzeugflotte davon in Mitleidenschaft gezogen werden würde (vgl. Green 1998, S. 2150).

Auch Hahn berichtete über Bedenken, dass sich bei einer geplanten Umsetzung der vom EEVC vorgeschlagenen Testverfahren zahlreiche Probleme ergeben würden (vgl. Hahn 1999). Hahn erläuterte, dass die Vorderwagenbereiche von Fahrzeugen zahlreiche, teilweise unterschiedliche technische Anforderungen erfüllen mussten (und müssen), die beispielweise die Fahrstabilität, die aktive Sicherheit, die Luftversorgung, die Antriebseinheit und die Kraftübertragung, das Geräusch- und Vibrationsverhalten sowie die passive Sicherheit mit ihren verschiedenen Elementen betreffen. Hahn hob vor allem auch hervor, dass technische Lösungen für die gleichzeitige Umsetzung aller Anforderungen, inklusive derer zum Fußgängerschutz, zu diesem Zeitpunkt nicht existierten (vgl. Hahn 1999, S. 8f.).

Als Reaktion auf Kritiken wie jene von Green und Hahn hatte bereits 1997 die neue Arbeitsgruppe 17 des EEVC ihre Arbeit begonnen. Die Aufgabe der AG 17 war (EEVC 2002, S. 2) „... to review the EEVC WG10 pedestrian protection test methods from 1994 and to propose possible adjustments taking into account new and existing data in the field of accident statistics, biomechanics and test results.“ [... die Fußgängerschutz-Testmethoden der EEVC-AG 10 von 1994 zu überprüfen und mögliche Anpassungen vorzuschlagen unter Berücksichtigung neuer und existierender Daten aus dem Bereich der Unfallstatistik, der Biomechanik und der Ergebnisse von Tests. Anm. d. Verf.] Da das Mandat der Gruppe nur eine kurzfristige Arbeit vorsah, wurde bereits im Dezember 1998 ein neuer Bericht vorgelegt. Dieser schlug Änderungen für zahlreiche Details der Testverfahren vor, behielt aber die Tests selbst im Wesentlichen bei (vgl. Abbildung 17). Für die Prüfkörper waren zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des Berichts ebenfalls weitere Verbesserungen in Arbeit, so dass einzelne Spezifikationen bereits angepasst werden konnten.

²² Association des Constructeurs Européens d'Automobiles

Allerdings dauerte es noch fast 4 Jahre, bis alle Details geklärt waren und ein überarbeiteter Abschlussbericht zur Verfügung stand (vgl. EEVC 2002).

Mit dem Vorliegen des Abschlussberichts der AG 17 standen ab Ende 2002 endgültig Testverfahren und Prüfkörper zur Verfügung, die für die Umsetzung der Fußgängerschutzanforderungen in der Fahrzeugentwicklung geeignet schienen. Diskussionen über eine schnellstmögliche Anwendung für die Zulassungstests von Fahrzeugen bzw. für den Verbraucherschutz hatte es aber vorher bereits gegeben (siehe Kapitel „2.4. Fußgängerschutztests für die Fahrzeugzulassung sowie den Verbraucherschutz“).

Parallel zu den Aktivitäten des EEVC hatte man im Rahmen der ESV-Konferenzen bereits während der Konferenz 1996 in Melbourne entschieden, zu den wichtigsten Bereichen der Fahrzeugsicherheit internationale Arbeitsgruppen zu gründen. Diese sollten harmonisierte Testprozeduren entwickeln, die die zu diesem Zeitpunkt aktuellsten Unfallszenarien in Europa, Japan, Australien und den USA widerspiegeln. Bekannt wurden die entsprechenden Aktivitäten als „International Harmonized Research Activities“²³ (IHRA). Fußgängersicherheit war einer der sechs Bereiche, die Priorität erhielten. Unter Federführung der japanischen Regierung wurde eine Arbeitsgruppe zur Fußgängersicherheit eingerichtet, die von 1997 bis 2005 aktiv war (vgl. IHRA PS 2005). Auch die IHRA-Arbeitsgruppe stützte sich für die Festlegung möglicher Testverfahren unter anderem auf die Erkenntnisse der EEVC-Arbeitsgruppen 10 und 17, die als einzige zu diesem Zeitpunkt bereits fertige Testprozeduren etabliert hatten.

²³ International harmonisierte Forschungsaktivitäten

2.3. Fußgängerunfälle in der Statistik

Wie bereits im vorherigen Kapitel erläutert, gab es zeitgenössische Aufzeichnungen über befürchtete Risiken für Fußgänger und andere ungeschützte Verkehrsteilnehmer sowie über tatsächlich passierte Unfälle mit diesen bereits aus der Frühzeit des Automobils. Zuverlässige statistische Daten gibt es jedoch erst aus dem 20. Jahrhundert. So veröffentlicht beispielsweise Statistik Austria seit 1961 Daten zum Unfallgeschehen in Österreich (vgl. Statistik Austria 2013), das Statistische Bundesamt der Bundesrepublik Deutschland liefert Daten für Deutschland ab 1906 und bildet damit auch das Unfallgeschehen im ehemaligen Deutschen Reich mit ab (vgl. Statistisches Bundesamt 2013).

Der Bericht der AG 7 des EEVC von 1982 bezifferte den Anteil der Fußgänger an der Gesamtzahl aller im Jahr 1979 im Straßenverkehr Getöteten mit einer Bandbreite von 13,3 % (für die Niederlande) bis 33,3 % (Großbritannien) (EEVC 1982, S. 11). Allerdings bezogen sich die Zahlen der AG 7 nur auf jene sechs europäischen Länder²⁴, die zu dieser Zeit am EEVC-Programm beteiligt waren. Außerdem wurde darauf verwiesen, dass die prozentualen Anteile auch die unterschiedliche Art und Weise widerspiegeln, wie in den verschiedenen Ländern am Verkehr teilgenommen wurde: In den Niederlanden waren beispielsweise im Jahr 1979 auch 19,9 % der Getöteten Radfahrer – und damit deutlich mehr als die 13,3 % Fußgänger (EEVC 1982, S. 11).

Für Österreich sind die Daten zum allgemeinen Unfallgeschehen ab 1961 zuverlässig und zusammenhängend ausgewertet, für Deutschland ab 1953. Die Daten zeigen, dass in beiden Ländern Anfang der 1970er Jahre die Anzahl der im Straßenverkehr Schwerverletzten und vor allem auch der Getöteten am höchsten war: In Österreich starben 1972 2948 Verkehrsteilnehmer, 72020 wurden verletzt (Statistik Austria 2013, S. 11), für Deutschland war 1970 mit 21332 Getöteten und 578032 Verletzten das opferreichste Jahr (Statistisches Bundesamt 2013, S. 41). Diese Zahlen beinhalten alle Verkehrsteilnehmer – Insassen von Kraftfahrzeugen ebenso wie Fußgänger und andere ungeschützte Verkehrsteilnehmer. Die Abbildungen 18 und 19 zeigen die Entwicklung der Anzahl der im Straßenverkehr Getöteten für beide Länder sowie einige wesentliche Meilensteine der jeweiligen Verkehrsgesetzgebung, die zur Verringerung der Opferzahlen beigetragen haben.

²⁴ Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien, die Niederlande, Schweden

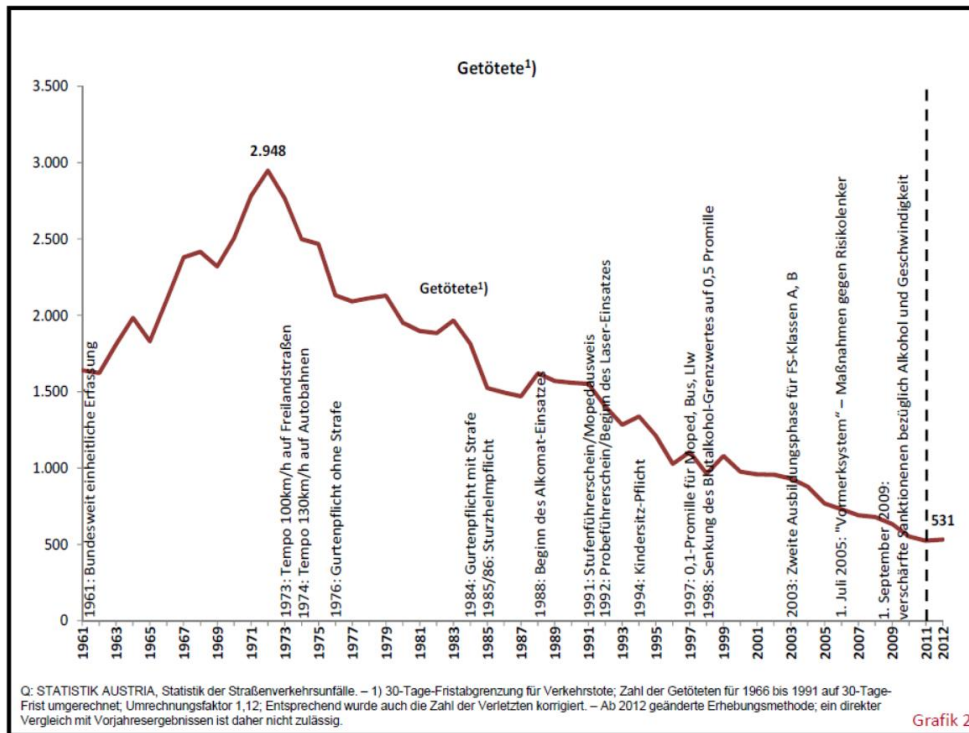


Abb. 18: Entwicklung der Anzahl der im Straßenverkehr Getöteten in Österreich von 1961 – 2012 (Statistik Austria, S. 25)

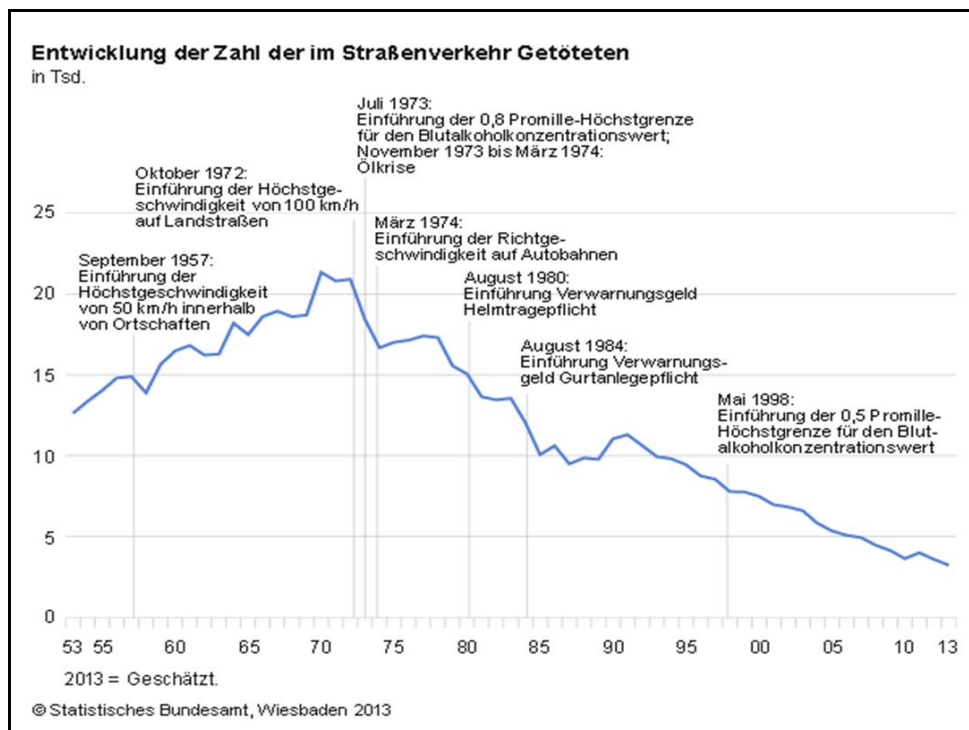


Abb. 19: Entwicklung der Anzahl der im Straßenverkehr Getöteten in Deutschland von 1953 – 2013 (Statistisches Bundesamt 2014)

Werden die gezeigten Gesamtdaten nach der Art der Teilnahme am Verkehrsgeschehen so weiter aufgeschlüsselt, wie es beispielsweise die Bundesanstalt für Straßenwesen für Deutschland auf der Grundlage der vom Statistischen Bundesamt bereitgestellten Daten jährlich tut, ergibt sich das in Abbildung 20 gezeigte Bild (BASt 2014). Dieses zeigt, dass sich seit dem Höchststand Anfang der 70er Jahre die Anzahl der im Straßenverkehr getöteten Personen deutlich rückläufig entwickelt hat. Dabei gab es zwar vereinzelt kurzzeitige gegenläufige Entwicklungen, diese kann man in der Gesamtbetrachtung aber vernachlässigen. Derzeit ist die Zahl der Verkehrsoffer so niedrig wie noch nie. Berücksichtigt man gleichzeitig die stetig wachsende Zahl der zugelassenen Kraftfahrzeuge, werden die Fortschritte noch beeindruckender. Die Anzahl der getöteten Fußgänger und Radfahrer an der Gesamtzahl scheint jedoch im Wesentlichen prozentual nahezu konstant zu sein.

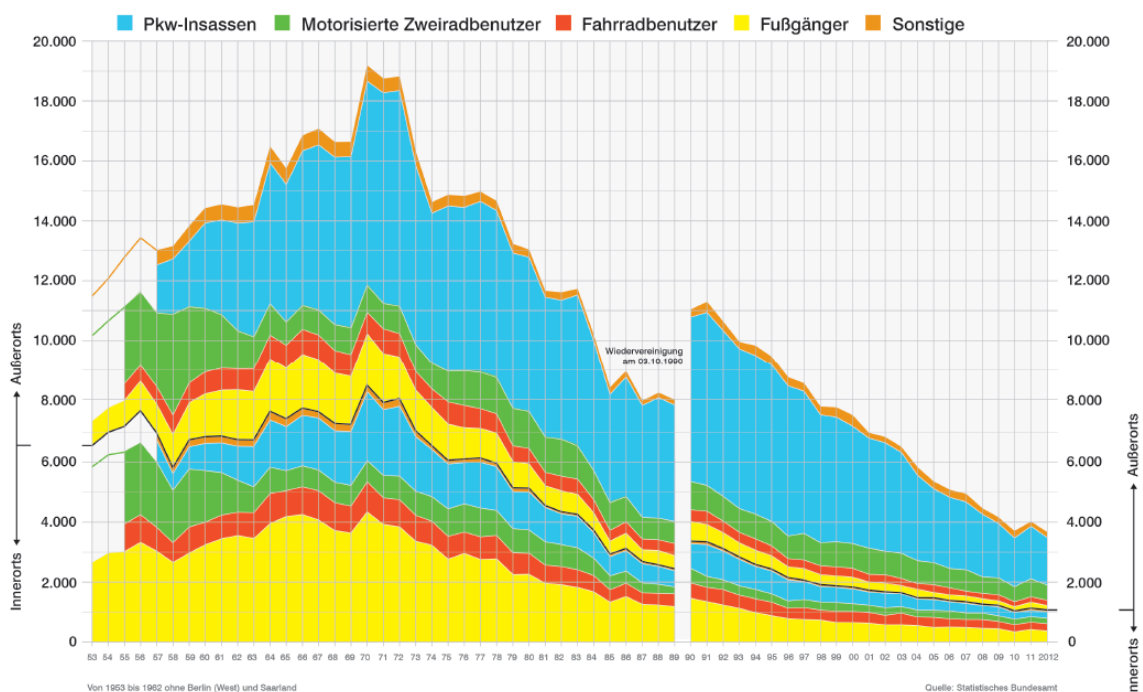


Abb. 20: Getötete im Straßenverkehr in der Bundesrepublik Deutschland nach Ortslage und Art der Verkehrsbeteiligung (BASt 2014)

Dieser Eindruck bestätigt sich nach den vom „International Transport Forum“²⁵ (ITF) im so genannten „IRTAD-Report“²⁶ von 2013 veröffentlichten Zahlen (vgl. OECD/ITF 2013):

²⁵ Weltverkehrsforum, eine Unterorganisation der „Organisation for Economic Co-operation and Development“ (OECD) (deutsch: Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung); Anm. d. Verf.

²⁶ International Road Traffic and Accident Database (deutsch: Internationale Straßenverkehrs- und Unfalldatenbank)

Für Österreich betrug 1990 der Anteil der getöteten Fußgänger 17 % aller im Straßenverkehr Getöteten sowie der Anteil der Radfahrer 7 %, 2011 waren 17 % Fußgänger und 8 % Radfahrer. Die absoluten Zahlen entwickelten sich dabei von 260 getöteten Fußgängern und 106 getöteten Radfahrern im Jahr 1990 zu 87 getöteten Fußgängern und 42 getöteten Radfahrern im Jahr 2011 (OECD/ITF 2013, S. 53).

In Deutschland wurden 1991 1918 Fußgänger und 925 Radfahrer getötet, das waren 17 % bzw. 8 % aller getöteten Verkehrsteilnehmer. 2011 waren es 614 Fußgänger und 399 Radfahrer, das waren 15 % bzw. 10 % der Gesamtanzahl (OECD/ITF 2013, S. 172).

Auch die von der „European Road Safety Observatory“²⁷ (ERSO) und der „Road Safety Data Collection, Transfer and Analysis“²⁸ (DaCoTA) für die Europäische Union veröffentlichten Statistiken²⁹ zeigen für Fußgänger einen nahezu konstanten Anteil von etwa 18 bis 19 % an den Gesamtzahlen der im Straßenverkehr Getöteten (vgl. Pace u.a. 2012). Die absoluten Zahlen waren in der betrachteten Dekade von 2001 bis 2010 aber deutlich gefallen (siehe Abbildung 21).

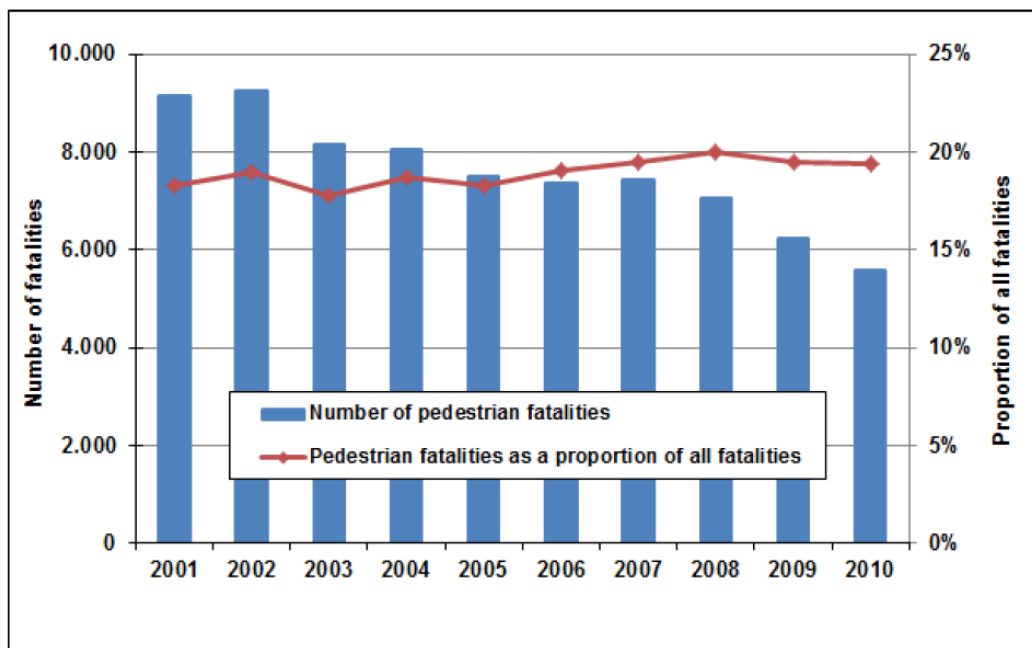


Abb. 21: Absolute Anzahl der im Straßenverkehr getöteten Fußgänger sowie prozentualer Anteil bezogen auf die Gesamtanzahl der getöteten Verkehrsteilnehmer für 19 Länder der Europäischen Union (CARE Database Sept. 2012, zit.n. Pace u.a. 2012)

²⁷ Europäische Verkehrssicherheitsbeobachtung

²⁸ Sammlung, Übertragung und Analyse von Daten zur Verkehrssicherheit

²⁹ ERSO und DaCoTA sind europäische Verkehrssicherheitsprojekte, die von der Europäischen Kommission, Generaldirektorat „Mobilität und Transport“, mitfinanziert werden; Anm. d. Verf.

Betrachtet man andere verfügbare Statistiken, sieht man aber auch, dass in verschiedenen Ländern die Anteile der getöteten Fußgänger an den Gesamtopferzahlen deutlich schwanken. Während in Ländern wie Neuseeland oder den Niederlanden die Zahl der im Verkehr getöteten Fußgänger mit unter 10 % im Jahr 2009 relativ gering war, waren es im gleichen Jahr in Japan mit ca. 35 % und in Korea mit ca. 37 % deutlich mehr (siehe Abbildung 22).

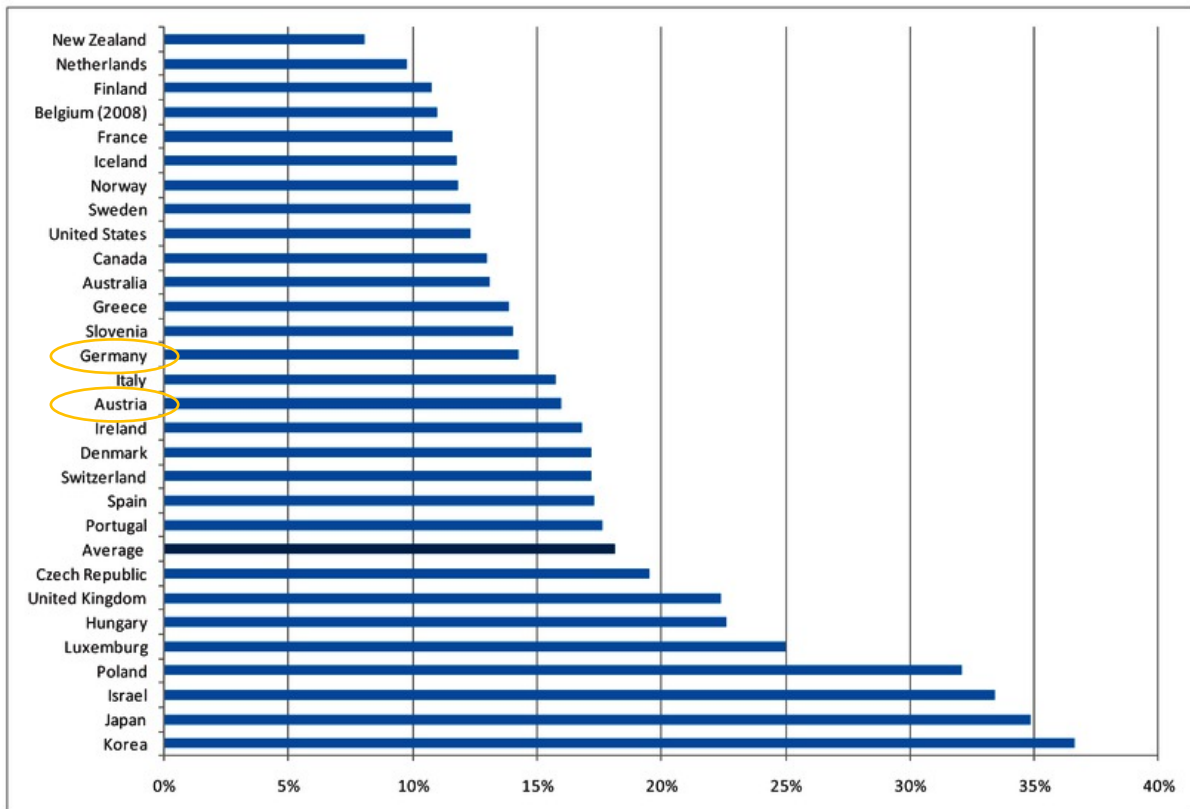


Abb. 22: Prozentualer Anteil der getöteten Fußgänger an der Gesamtzahl der im Straßenverkehr Getöteten für 29 der 34 OECD-Länder, basierend auf den IRTAD-Zahlen von 2009 (OECD/ITF 2012) [Österreich und Deutschland wurden durch den Verfasser hervorgehoben; Anm. d. Verf.]

Die gezeigten Zahlen belegen nach Ansicht des Verfassers, dass das Thema Fußgängerschutz auch heute noch eine wichtige Rolle für die Weiterentwicklung der Sicherheit im Straßenverkehr spielt.

2.4. Fußgängerschutztests für die Fahrzeugzulassung sowie den Verbraucherschutz

Vor dem Hintergrund der immensen Anzahl der im Straßenverkehr getöteten und verletzten Fußgänger und unter Berücksichtigung der Tatsachen, dass bereits Anfang der 1980er Jahre ein erstes Testverfahren zur Verfügung stand und dass die Aktivitäten der EEVC-Arbeitsgruppen die Notwendigkeit von Fußgängerschutztests begründeten und auch erste Ideen für Komponententestverfahren lieferten, legte die Kommission der Europäischen Gemeinschaften bereits 1992 einen Gesetzesentwurf für eine Fußgängerschutzvorschrift vor (vgl. EC 1992). Dieser sah vor, zusammen mit den Vorschriften für die Gestaltung von Außenkanten für Fahrzeuge auch weichere Stoßfänger, weichere Fronthaubenvorderkanten sowie weichere Fronthaubenoberflächen vorzuschreiben. Der Vorschlag verwendete noch die ursprünglich in der EEVC-AG 10 diskutierten Versionen der Prüfkörper für Kopf, Oberschenkel und Bein sowie die entsprechenden Testprozeduren, deren Entwicklung zu diesem Zeitpunkt allerdings selbst in der EEVC-Arbeitsgruppe noch nicht als abgeschlossen angesehen wurde. Wohl auch aus diesem Grund wurde der Vorschlag nicht als Gesetz verabschiedet.

Nach der Vorlage des Berichtes der AG 17 des EEVC vom Dezember 1998 gab es erneute Diskussionen, wie man das Thema Fußgängerschutz schnellstmöglich in verpflichtende gesetzliche Anforderungen umsetzen könnte. Dieser Bericht traf aber auch auf Kritik und Zweifel wie jene von Green (vgl. Green 1998) und Hahn (vgl. Hahn 1999): Zahlreiche technische Probleme ließen vor allem die Automobilhersteller bezweifeln, ob und wie die Anforderungen der EEVC-Arbeitsgruppen schnellstmöglich umgesetzt werden könnten.

Ein Verhandlungsmarathon auf hohem technischen Niveau begann, in dem zahlreiche Details unter verschiedenen Blickwinkeln diskutiert wurden und in den auch neue Vorschläge eingebracht wurden: ein neuer, im Auftrag des ACEA von TNO entwickelter Prüfkörper für den Kinderkopf, die Idee, aus Gründen der technischen Umsetzbarkeit in einzelnen Bereichen höhere Belastungswerte zuzulassen, sowie die Idee des Testens der Windschutzscheibe als einen der zweifellos vom Fußgängeraufprall häufig betroffenen Fahrzeugbereiche. In die Diskussionen zwischen der Europäischen Kommission, der Autoindustrie und dem EEVC wurde auch das so genannte „Joint Research Centre“³⁰ (JRC) eingebunden, ein Generaldirektorat der Europäischen Kommission, das dieser in wissenschaftlichen und technologischen Fragen zuarbeitet. Diese Forschungsstelle unterbreitete nach eigenen Untersuchungen einen Vermittlungsvorschlag (siehe Abbildung 23). Dieser Vermittlungsvorschlag wurde vor allem von Seiten der Automobilindustrie als ein akzeptabler Kompromiss anerkannt und führte nach umfangreichen weiteren Verhandlungen zu einer Selbstverpflichtung der Automobil-

³⁰ Gemeinsame Forschungsstelle

		EEVC (12/1999)	COMMISSION (05/2000)	ACEA (07/2000)	JRC Recommendation (unofficial)
Child head against bonnet	Impact speed	40 km/h	35 km/h	33.8 km/h	35 km/h
	Mass of impactor	2.5 kg	3.5 kg	3.5 kg	3.5 kg
	HIC	1000	1000	1000 (2/3 of the area) 2000 (1/3 of the area)	1000 (2/3 of the area) 2000 (1/3 of the area)
	Impact angle	50°	50°	53°	50°
Adult head against bonnet	WAD	1m - 1.5m	1m - 1.8m	1m - 1.8m	applied overall on hood
	Impact speed	40 km/h	35 km/h	35 km/h	35 km/h
	Mass of impactor	4.8 kg	4.8 kg	3.5 kg	4.8 kg
	HIC	1000	1000	1000 (2/3 of the area) 2000 (1/3 of the area)	monitoring only
Lower leg against bumper	Impact angle	65°	65°	65°	JRC proposing impact on windshield
	WAD	1.5m - 2.1m	1.8m - 2.1m	1.8m - 2.1m	
	Impact speed	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h
	Tibia acceleration	150g	ca. 200g *	230g	ca. 200g *
Upper leg against Bonnet Leading Edge	Knee bending	15°	21° *	21° *	< 21°
	Knee shearing	6 mm	6 mm *	--	6 mm *
	Impact speed	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h
	Femur forces	5 kN	5 kN **	monitoring only	5 kN **
Upper leg against bumper on a sports utility vehicle	Femur bending m.	300 Nm	300 Nm **		300 Nm **
	Impact speed	40 km/h	40 km/h	40 km/h	
	Femur forces	5 kN	5 kN	7.5 kN	
	Femur bending m.	300 Nm	300 Nm	510 Nm	no recommendation
Application	Lower bumper ref. line >500 mm	Lower bumper ref. line >500 mm	Approach angle >20°; lower bumper ref. line >400 mm		

* adjusted if necessary due to validation by industry

** does not apply as pass / fail criteria - monitoring only

Abb. 23: Vergleich der technischen Inhalte der verschiedenen Verhandlungspositionen zur Umsetzung der Anforderungen zum Fußgängerschutz, Diskussionsstand ca. Ende 2000 (Kinsky 2007, S. 11)

hersteller, Maßnahmen zum Schutz der Fußgänger sowie der anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmer einzuführen.

Vorgesehen war die Einführung der Selbstverpflichtung der Automobilindustrie in zwei Phasen. Eine erste Phase sah die Einführung des vom JRC vorgeschlagenen Kompromisses ab 2005 vor, eine zweite Phase die Umsetzung der EEVC-AG-17-Vorschläge ab 2010. Letzteres hatte man allerdings an eine Überprüfung der technischen Machbarkeit sowie der Effektivität geknüpft, die 2004 stattfinden sollte (vgl. ACEA 2001). Außerdem war vorgesehen, in der ersten Phase den umstrittenen Test mit dem Oberschenkelprüfkörper gegen die Fronthaubenvorderkante sowie den neu vorgeschlagenen Test mit dem Kopfprüfkörper für den Erwachsenen gegen die Windschutzscheibe zu Monitoringzwecken, also zu Überwachungszwecken, durchzuführen. Die Ergebnisse der Monitoringaktivitäten sollten von einem Komitee überprüft werden und in die Überprüfungsaktivitäten für die zweite Phase einfließen. Ergänzt wurden die vorgesehenen Fußgängerschutztests durch die Verpflichtung, parallel alle Fahrzeuge serienmäßig mit Antiblockiersystemen (ABS) und Tagfahrlicht auszustatten (vgl. ACEA 2001).

Obwohl auch die Europäische Kommission die Selbstverpflichtung der Industrie als einen wichtigen Schritt zum Schutz von Fußgängern und anderen Straßennutzern begrüßte, wurde eine endgültige Entscheidung über die Annahme der Selbstverpflichtung an die Zustimmung der Mitgliedsstaaten der Europäischen Union sowie des Europäischen Parlaments geknüpft (vgl. EC 2001a). Bereits die ersten Diskussionen in den Arbeitsausschüssen des Europäischen Parlamentes zeigten jedoch, dass eine Gesetzesregelung der Selbstverpflichtung vorgezogen werden würde (vgl. VDA 2001). Die Europäische Kommission legte deshalb noch im Jahr 2001 einen ersten Gesetzesentwurf vor (vgl. EC 2001b), der letztendlich zur Verabschiedung der EU-Richtlinie 2003/102/EG im November 2003 führte (vgl. EU 2003), die ab 1. Oktober 2005 für neue Fahrzeugmodelle anzuwenden war.

Wie bereits im Kapitel 2.2 beschrieben, hatte Japan die Leitung der IHRA-Arbeitsgruppe zum Fußgängerschutz übernommen. Hintergrund des Interesses am Thema Fußgängerschutz dürfte die Tatsache gewesen sein, dass Fußgänger einen extrem hohen Anteil der bei Verkehrsunfällen Getöteten ausmachten und, wie im Kapitel 2.3 erläutert, auch heute noch ausmachen. Wie auch in Europa führten die Aktivitäten in Japan zu einer Gesetzesdiskussion, an deren Ende die Einführung verbindlicher Vorschriften zum Fußgängerschutz stand. Die entsprechenden Details wurden in der Ausgabe 2004 des vom Japan Automobile Standards Internationalization Center³¹ (JASIC) herausgegebenen „Automobile Type Approval

³¹ Japanisches Automobilanforderungen-Internationalisierungszentrum [gemeint ist das Japanische Zentrum für die Internationalisierung von Anforderungen an Automobile; Anm. d. Verf.]

Handbook for Japanese Certification“³², des so genannten „Blue Book“³³, erstmals veröffentlicht und galten ab 1. September 2005 für neue Fahrzeugmodelle (vgl. JASIC 2004). Im Gegensatz zu Europa führte Japan als ersten Schritt allerdings nur die Anforderungen für den Test mit den Kopfprüfkörpern ein und folgte damit dem Diskussionsstand der IHRA-Arbeitsgruppe (vgl. JASIC 2004, TRIAS 63 2004).

Spätesten seit Inkrafttreten der gesetzlichen Anforderungen für neue Fahrzeugmodelle in Japan und Europa im Herbst 2005 ist die Auslegung neuer Fahrzeuge fester Bestandteil der Entwicklungsprozesse aller Fahrzeughersteller. Wanke, Thompson und Kerkeling zeigten bereits vor dem Einsetzen der Vorschriften, wie die Fußgängerschutzanforderungen die Entwicklung und das Aussehen neuer Fahrzeuge verändern (vgl. Wanke/Thompson/Kerkeling 2005). Am Beispiel der damals neuen, zweiten Generation des Opel Zafira wurde erläutert, dass die Fahrzeugfronten nachgiebiger wurden und wie einzelne Maßnahmen direkt das Aussehen der Fahrzeuge beeinflussten (siehe Abbildung 24).

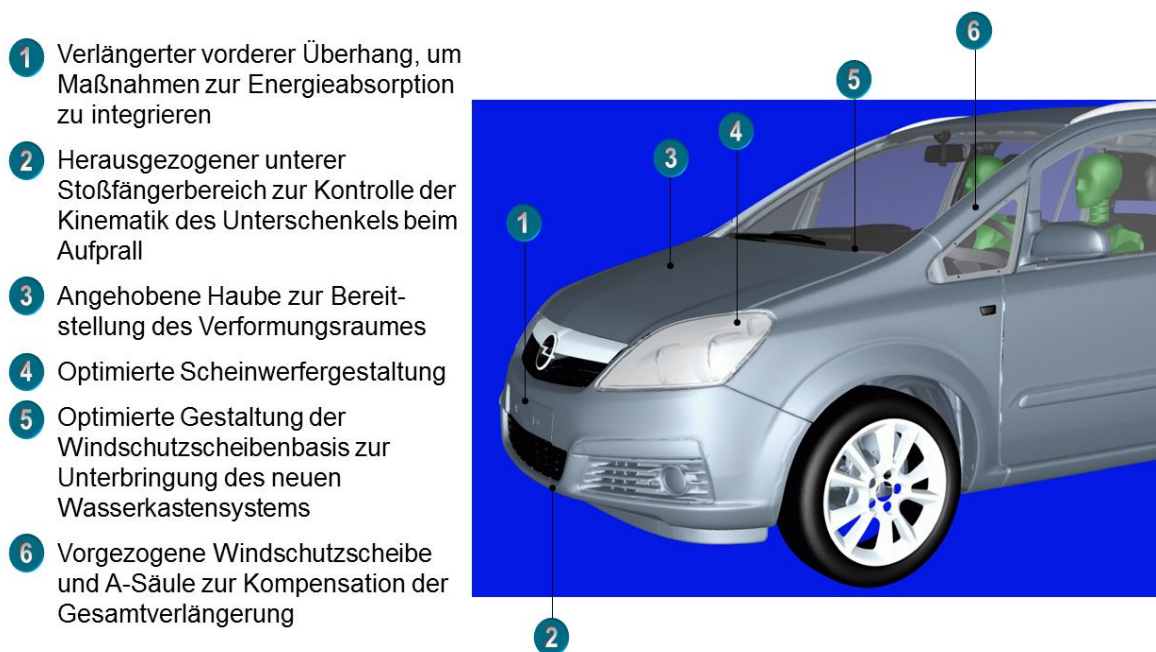


Abb. 24: Einfluss der Fußgängerschutzmaßnahmen auf die Fahrzeugfront des Opel Zafira II (Wanke/Thompson/Kerkeling 2005, S. 4, mit Erläuterungen des Verfassers, Kinsky 2008, S. 12)

³² Automobil-Typgenehmigungshandbuch für japanische Zertifizierung [gemeint ist ein Handbuch für die Typgenehmigung von Automobilen im Rahmen des Zertifizierungsverfahrens in Japan, eine Sammlung aller Gesetzesvorschriften, die Fahrzeuge im Rahmen einer Typgenehmigung für Japan erfüllen müssen; Anm. d. Verf.]

³³ Die Bezeichnung „Blue Book“ wird auch offiziell für diese Gesetzessammlung verwendet; nach dem Verständnis des Verfassers basiert der Name auf der Tatsache, dass das in der Vergangenheit als Buch veröffentlichte Werk auch tatsächlich einen blauen Einband hatte. Anm. d. Verf.

Davon konnten zwei grundlegende Prinzipien für die Fahrzeugentwicklung abgeleitet werden: Entweder die Fahrzeugkarosserie kann beibehalten werden und alle harten und unnachgiebigen Fahrzeugstrukturen und -komponenten müssen so ausgelegt bzw. angeordnet werden, dass sie die Verformung der entsprechenden Fahrzeugbereiche nicht behindern, wenn der Fußgänger – oder im Test der Prüfkörper – die Karosserie bei einem Kontakt verformt. Die Strukturen und Komponenten könnten beispielsweise aus der An- bzw. Aufprallzone heraus verlagert werden oder müssten entsprechend weich und nachgiebig ausgelegt werden. Oder, wenn es nicht möglich oder nicht gewollt ist, die bestehenden Fahrzeugstrukturen und -komponenten zu verändern, die Fahrzeugkarosserie muss „wachsen“, also im Vorderwagenbereich länger und höher werden. Auch so lässt sich ausreichender Verformungsraum schaffen. Diese Grundprinzipien haben sich sehr schnell durchgesetzt und sind im Aussehen von nach 2005 vorgestellten Fahrzeugmodellen deutlich wiederzuerkennen.

Als eine dritte Möglichkeit bot sich eine Alternativlösung an: Bereits kurz nach der Einführung der Fußgängerschutzvorschriften wurden erste Fahrzeuge mit so genannten „aktiven Fronthauben“ vorgestellt, bei denen eine sich beim Unfall automatisch aufstellende Fronthaube den erforderlichen Verformungsraum schafft. Solche Systeme sind zwar mit deutlich höheren Kosten verbunden, erlauben aber deutlich mehr Spielraum für das Fahrzeugdesign bei gleichzeitiger, weitgehender Beibehaltung der existierenden Komponenten und Strukturen.

Wanke, Thompson und Kerkeling zeigten außerdem eine der wesentlichen Herausforderungen für die Entwicklung „fußgängerfreundlicher“ Fahrzeuge auf: Der An- bzw. Aufprallbereich überlagert vollständig die Bereiche, die bis zu diesem Zeitpunkt der Auslegung von Fahrzeugen auf die Anforderungen zum Frontalaufprall vorbehalten waren (siehe Abbildung 25).

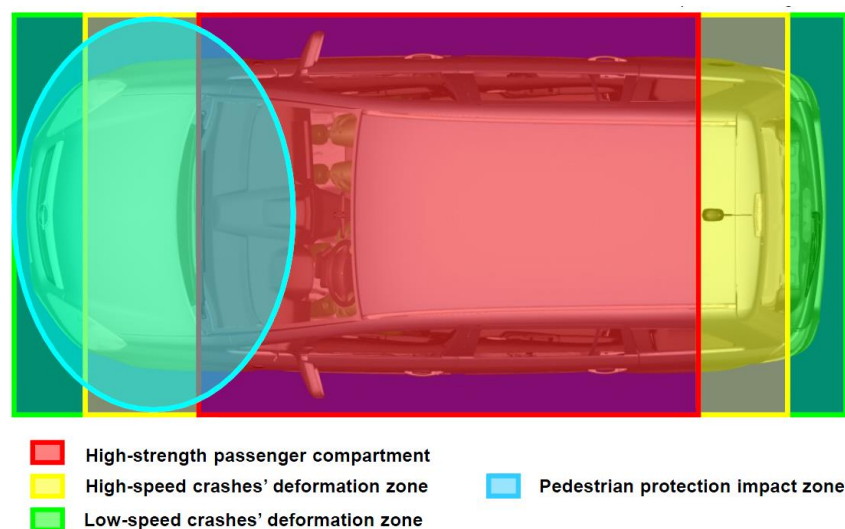


Abb. 25: Darstellung der verschiedenen Deformationszonen für den Frontalaufprall sowie die Überlagerung durch die Testbereiche für den Fußgängerschutz (Wanke/Thompson/Kerkeling 2005, zit.n. Kinsky 2009b, S. 1592)

Diese – üblicherweise als „Designkonflikt“ bezeichnete – Herausforderung ist bis heute nicht abschließend gelöst, obwohl inzwischen Fahrzeuge auf dem Markt verfügbar sind, bei denen die harten Außenstrukturen im Bereich der Windschutzscheibe bei einem Unfall dadurch abgepolstert werden, dass sich ein Airbag unter der Fronthaube derart entfaltet, dass die Außenstrukturen abgedeckt werden (siehe auch Abbildung 27, S. 36).

Die Kosten, die durch die Einführung der Fußgängerschutzgesetzgebung pro Fahrzeug entstehen, wurden von Hardy und Kollegen im Rahmen einer Studie zur Machbarkeit der Fußgängerschutzmaßnahmen abgeschätzt (vgl. Hardy u.a. 2006). Je nach Fahrzeugtyp und dem für die Umsetzung der Maßnahmen notwendigen technischen Aufwand bewegen sich die zusätzlichen Herstellungskosten in einem Rahmen von:

- 27,76 Euro pro Fahrzeug beispielsweise für ein so genanntes „kleines Familienfahrzeug“, bei dem die Umsetzung der Fußgängerschutzmaßnahmen nur auf Maßnahmen beruht, die eine ausreichende, gezielte Verformung der Fahrzeugaußenhaut zulassen (Hardy u.a. 2006, S. 208) bis
- 397,40 Euro pro Fahrzeug beispielsweise für einen Sportwagen mit einer sich bei einem Unfall automatisch aufstellenden Fronthaube (Hardy u.a. 2006, S. 209).

Für den Fahrzeugkäufer dürfte sich bei zusätzlichen Herstellungskosten dieser Größenordnung der reale Preiszuwachs in einem Rahmen von ca. 100 – 1000 Euro pro Fahrzeug bewegen.

Neben den gesetzlichen Regelungen zum Fußgängerschutz gab es parallele Aktivitäten auch für den Verbraucherschutz: Als 1996 das „European New Car Assessment Programme“³⁴ (Euro NCAP) ins Leben gerufen wurde, stand das Thema Fußgängersicherheit von Beginn an mit auf der Agenda (vgl. Euro NCAP 2014). Dieses ist insofern nicht verwunderlich, als einige der Mitglieder des Euro-NCAP-Konsortiums – speziell die Regierungen von Großbritannien und Schweden – sich auch stark innerhalb des EEVC engagierten. Das Euro-NCAP-Konsortium testete dann auch von Beginn an entsprechend den vom EEVC vorgeschlagenen Testverfahren: zuerst nach denen der EEVC-AG 10, später – ab ca. Anfang 2002 – nach denen der AG 17.

Nicht vollständig klar ist, wie Euro NCAP die in den EEVC-Testverfahren offenen Punkte für sich löste – die Entscheidungsfindung innerhalb von Euro NCAP war damals wesentlich weniger transparent als heute. Allerdings darf man den Mitgliedern des Konsortiums wohl eine gewisse Pragmatik unterstellen, für die Euro NCAP noch heute bekannt ist. Der Europäische Automobilhersteller-Verband ACEA berichtete über eine umfangreiche Kommunikation mit Euro NCAP (vgl. Green 2000), die offensichtlich genutzt wurden, um offene Details zu diskutieren. Die

³⁴ Europäisches Neuwagen-Bewertungsprogramm

Entscheidungen zu offenen Punkten fielen jedenfalls in der Technical Working Group TWG³⁵, dem verantwortlichen Expertengremium von Euro NCAP.

Die Testaktivitäten von Euro NCAP fanden von Beginn an hohe Beachtung. Die Ergebnisse der Tests wurden auf Pressekonferenzen und in den Medien veröffentlicht; die für jedes getestete Fahrzeug gelieferte Sterne-Bewertung wurde in Verbindung mit dem erläuternden Worturteil zu einem Gradmesser für das Sicherheitsniveau neuer Fahrzeugmodelle. Andere Neuwagen-Bewertungsprogramme entstanden weltweit, viele orientierten sich bei der Auswahl ihrer Testverfahren an Euro NCAP. Heute sind solche Programme fast überall auf der Welt verbreitet und werden teilweise vom jeweiligen Gesetzgeber als Instrument für die Vorbereitung der Fahrzeugindustrie auf zukünftige gesetzliche Regelungen genutzt. Die Fahrzeugbewertungen, die so genannten Ratings, sind für die Fahrzeughersteller außerdem zu einem wichtigen Werbeinstrument geworden.

Weder mit der Einführung verbindlicher gesetzlicher Vorschriften zum Fußgängerschutz in Japan und Europa noch mit der zunehmenden Verbreitung der Neuwagen-Bewertungsprogramme war das Thema Fußgängerschutz überall zufriedenstellend gelöst: Wie in Kapitel 2.3 gezeigt wurde, gab und gibt es auch in anderen Ländern und Regionen der Welt ein immenses Problem mit Fußgängern, die im Unfallgeschehen verletzt oder getötet werden. Aus Sicht der Gesetzgebung war daher die Diskussion einer Global Technical Regulation³⁶ (GTR) zur Fußgängersicherheit ein weiterer Meilenstein. Von 2002 bis 2006 diskutierten Experten der Fahrzeugsicherheit von verschiedenen Regierungen, Forschungseinrichtungen und Interessenvertretungen, wie der Fußgängerschutz am sinnvollsten weltweit umgesetzt werden könnte. Die Diskussionen mündeten in der Verabschiedung der GTR Nr. 9 zur Fußgängersicherheit (vgl. UNECE³⁷ 2009) im November 2008, die seither die Referenz zu dem Thema darstellt. Derzeit wird die zweite Phase der GTR Nr. 9 diskutiert, mit der man vor allem eine Verbesserung des Schutzes vor Beinverletzungen erreichen will. Dazu wurde in Japan ein neuer Prüfkörper für den Test mit dem Beinprüfkörper gegen den Stoßfänger entwickelt. Das Testverfahren mit dem Beinprüfkörper und vor allem der neue Beinprüfkörper werden im Kapitel 3 dieser Arbeit noch genauer betrachtet werden.

³⁵ Technische Arbeitsgruppe

³⁶ Globale Technische Regelung

³⁷ United Nations Economic Commission for Europe [deutsch: Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen; Anm. d. Verf.]

2.5. Zukünftige Weiterentwicklung der Testverfahren zum Fußgängerschutz

Ein entscheidender Schritt zur weiteren Verbesserung des Schutzes von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern wird die weitere Verbesserung der Testverfahren sein. Die naheliegendste Lösung scheint es dabei zu sein, nicht mehr nur mit Prüfkörpern zu testen, die menschliche Körperteile simulieren, sondern gleich mit ganzen Dummies.

Die Firmen Honda und GESAC entwickelten gemeinsam mit dem „Japan Automobile Research Institute“³⁸ (JARI) bereits seit 1998 einen speziellen Fußgängerdummy, den so genannten POLAR-Dummy (siehe Abbildung 26). Tests mit einem solchen Dummy erlauben eine sehr genaue Nachbildung des Realunfallgeschehens, vor allem auch der Interaktion des menschlichen Körpers mit den einzelnen Fahrzeugkomponenten (siehe Abbildung 27).



Abb. 26:
POLAR-Dummy (Akiyama/
Okamoto/Rangarajan 2001, S. 1)

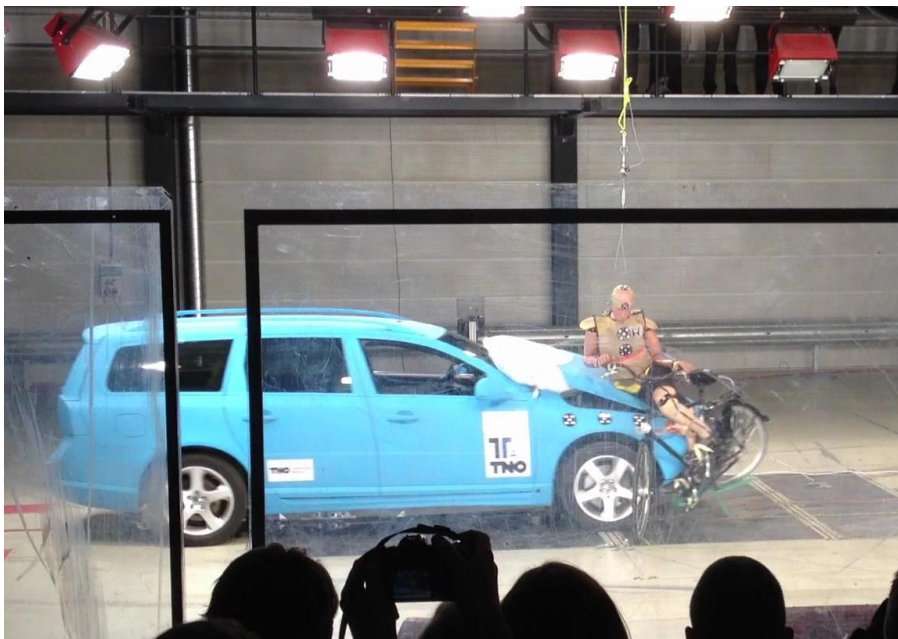


Abb. 27:
Crashtest eines
Fahrzeuges mit
einem POLAR-
Dummy der
2. Generation als
Radfahrer.
(Foto: Verfasser)

³⁸ Japanisches Automobil-Forschungsinstitut

Im Gegensatz dazu erläutert jedoch Lawrence, warum Prüfkörpertests auch in Zukunft Vorteile haben werden (Lawrence 2005, S. 2ff.): Einzelne Phasen von Unfällen können vereinfacht dargestellt werden, die Verfahren haben eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit, einfache Testverfahren können durch die Veränderung einzelner Parameter eine große Anzahl verschiedener Unfallszenarien widerspiegeln, bei denen sich beispielsweise menschliche Staturen, die Bewegungsrichtungen der Fußgänger und/oder Fahrzeuge, die Aufprallgeschwindigkeiten oder die Fahrzeugtypen unterscheiden. Darüber hinaus sind Prüfkörpertests deutlich günstiger, man kann sie recht einfach mit Hilfe der numerischen Simulation modellieren und ganze Fahrzeugbereiche können mit dem jeweiligen Verfahren getestet werden. Verbesserungspotenzial sieht Lawrence unter anderem durch ein noch besseres Verstehen der Unfallszenarien und der Verletzungsmechanismen, um so den tatsächlich ungünstigsten Fall testen zu können, sowie in der weiteren Verbesserung der Biofidelität der Prüfkörper unter Berücksichtigung neuer biomechanischer Erkenntnisse (Lawrence 2001, S. 7).

Wie man sich die Weiterentwicklung der Testverfahren konkret vorstellen muss, zeigen Tinard und Kollegen an einem Beispiel für das Kopftestverfahren (siehe Abbildung 28): Reale Unfälle werden in Tests und in der Simulation nachvollzogen und so die Belastungswerte für die Prüfkörper ermittelt. Detailanalysen der medizinischen Unterlagen von verletzten Personen erlauben Rückschlüsse auf die menschlichen Belastungsgrenzen und auf die Verletzungsmechanismen. Aus dem Vergleich der jeweiligen Ergebnisse können dann Rückschlüsse für die Verbesserung der Testverfahren gezogen werden.

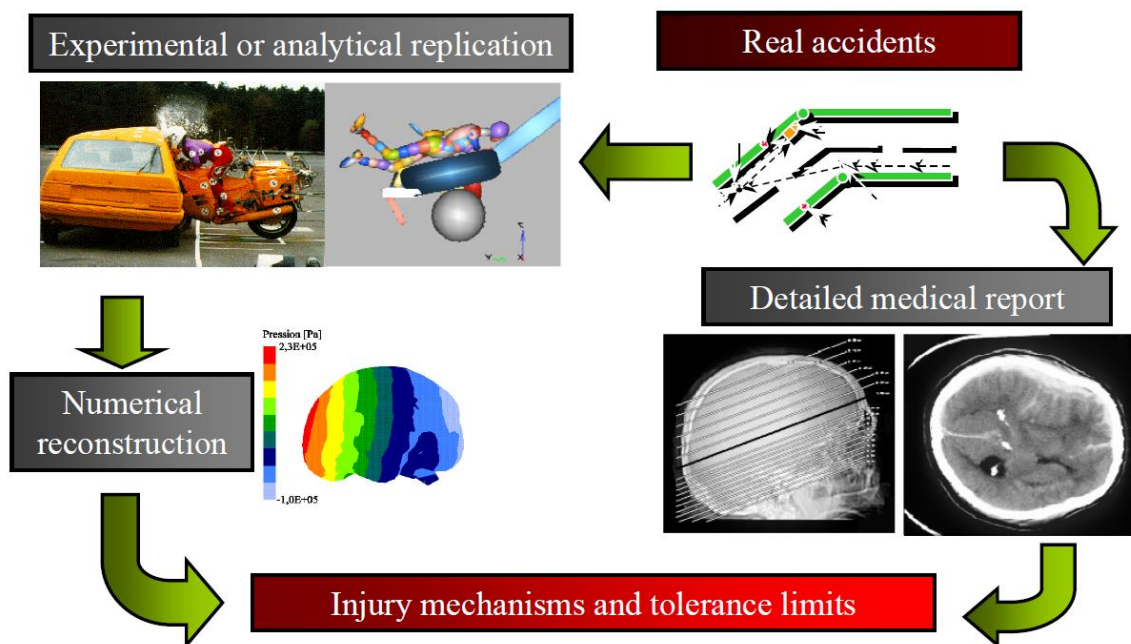
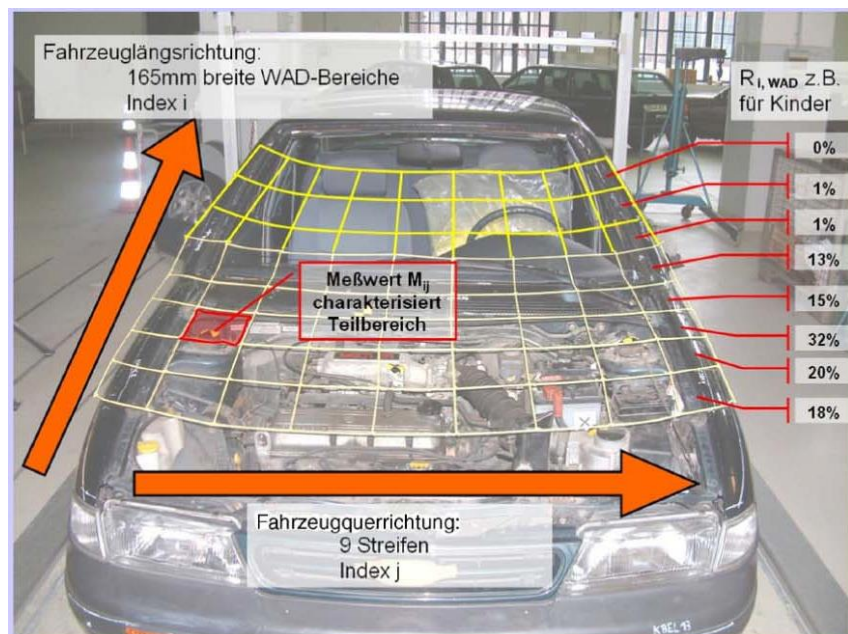


Abb. 28: Methodischer Ablauf von Unfallrekonstruktionen (Tinard u.a. 2008, S. 14)

Kühn, Fröming und Schindler versuchten, beide Ansätze – Dummy- und Prüfkörpertests – miteinander zu kombinieren (vgl. Kuehn/Froeming/Schindler 2005). Bei dem von ihnen entwickelten „Vehicle Related Pedestrian Safety Index“³⁹ (VERPS) werden mit beiden Verfahren Tests durchgeführt. Parallel dazu werden aus Unfallanalysen und Unfallrekonstruktionen die Bereiche der Fahrzeugfront ermittelt, an bzw. auf die Fußgänger bei einem Unfall typischerweise prallen (siehe Abbildung 29). Mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen kann dann für jedes Fahrzeug eine Aussage getroffen werden, ob und wie gefährlich – oder ungefährlich – das Fahrzeug im Realunfallgeschehen sein wird.

Abb. 29:
Aufteilung der Fahrzeugfront in Aufprallbereiche sowie exemplarische Angabe der Wahrscheinlichkeit des Aufpralles für Kinder. Die einzelnen Bereiche können dann mit Prüfkörper- oder Dummytests weiter untersucht werden. (Kuehn/Froeming/Schindler 2005, S. 7)



Kühn, Fröming und Schindler erachten einen Einsatz des VERPS-Index schon bei der Fahrzeugentwicklung als sinnvoll: Mit Hilfe des jeweils erzielbaren Index könnten Entscheidungen für oder gegen einzelne technische Modifikationen am Fahrzeug getroffen werden (Kuehn/Froeming/Schindler 2005, S. 7f.). Denkbar wäre nach Ansicht des Verfassers aber auch, zukünftig mit Hilfe eines solchen Index beispielsweise Versicherungsprämien für jedes Fahrzeug individuell festzulegen. Allerdings bleibt unklar, ob sich der doch recht hohe Testaufwand tatsächlich rentieren würde.

Andere Ansätze für zukünftige Testverfahren beschäftigen sich vor allem intensiv mit den Test- und Bewertungsmöglichkeiten für neue, vorausschauende Frontschutzsysteme. Diese werden verstärkt zur Ergänzung der passiven Schutzmaßnahmen eingesetzt und sollen ebenfalls in ihrer Effektivität bewertet werden. Schuessler zeigt einen für diese Zwecke entwickelten „Ultraflat Overrunable

³⁹ Fahrzeugbezogener Fußgängersicherheitsindex

Carrier for experimental Advanced Driver Assistant Systems' Testing⁴⁰ (UFO) (vgl. Schuessler 2010). Dieser Träger ist in der Lage, einen speziellen Dummy, ein so genanntes „Balloon Car“⁴¹ oder ein anderes leichtes Objekt zu tragen. Durch die Möglichkeit der Steuerung per Fernbedienung oder über das Global Positioning System⁴² (GPS) kann der UFO in den Fahrweg eines mit Fahrerassistenzsystemen ausgerüsteten Fahrzeugs hineinbewegt werden (siehe Abbildungen 30 und 31). So ist es möglich zu überprüfen, ob eine angemessene Reaktion durch das oder die Fahrerassistenzsysteme erfolgt. Gleichzeitig wäre es unkritisch, wenn dieser Träger im Testbetrieb doch überrollt werden würde.

Abb. 30:
Ultraflat Overrunable Carrier, hier
zu Demonstrationszwecken mit
einer auf der Plattform stehenden
Person (Schuessler 2010, S. 23)

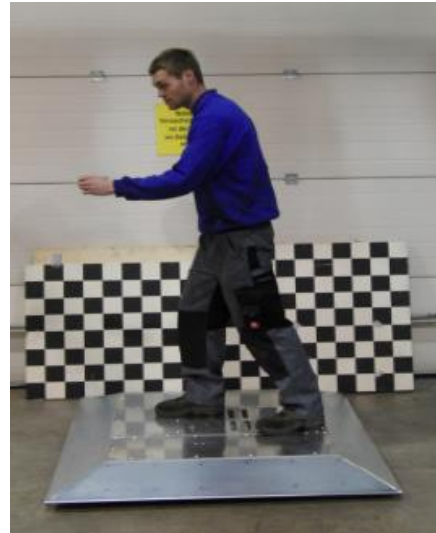


Abb. 31:
Testbetrieb in CarsonCity, einem Testgelände
in Schweden, welches speziell für das Testen
von Fahrerassistenzsystemen ausgestattet ist
(ActiveTest 2012)



⁴⁰ Ultraflacher, überfahrbarer Lastenträger für das experimentelle Testen von hochentwickelten Fahrerassistenzsystemen

⁴¹ Ballonfahrzeug [gemeint ist ein aufblasbares Objekt mit den Außenkonturen eines Fahrzeuges; Anm. d. Verf.]

⁴² Globales Positionsbestimmungssystem [globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung; Anm. d. Verf.]

Über zahlreiche weitere Aktivitäten zur Verbesserung der bestehenden Testverfahren bzw. zur Entwicklung neuer Testverfahren wurde in den letzten Jahren und wird auch aktuell berichtet. Eine umfassende Darstellung aller Aktivitäten würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Die genannten Aktivitäten sind lediglich eine subjektive Auswahl des Verfassers, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt und die keine Wertung dieser oder anderer Projekte darstellen soll. Ziel war es lediglich, die Bandbreite der Arbeiten zu zeigen.

3. Das Testverfahren mit dem Beinprüfkörper gegen den Stoßfänger

Lawrence und Hardy hatten schon 1998 bei ihren Erläuterungen zu den EEVC-Testverfahren festgestellt: „Pedestrian accident studies have shown that the most frequent causes of serious injuries were impacts of the legs with the bumper, ...“ [Fußgängerunfallstudien haben gezeigt, dass die häufigsten Ursachen für schwere Verletzungen das Zusammenprallen der Beine mit dem Stoßfänger, ... waren. Anm. d. Verf.] (Lawrence/Hardy 1998, S. 2131). Die in der EEVC-AG 7 analysierten Unfalldaten hatten gezeigt, dass sich 50 % und mehr der verunfallten Erwachsenen Verletzungen am Bein zugezogen hatten (siehe auch S. 17). Die deutliche Mehrheit der Verletzungen sind dabei Verletzungen speziell des Unterschenkels, also im Bereich des Schien- sowie des Wadenbeines; Verletzungen des Knies sind deutlich weniger häufig.

Im Gegensatz zu dem, was die Statistik aussagte, hatte der Schwerpunkt der Verletzungsbewertung bei dem vom EEVC entwickelten Testverfahren mit dem Beinprüfkörper gegen den Stoßfänger jedoch von Anfang an auf der Bewertung von Knieverletzungen gelegen. Cesari, Alonso und Matyjewski stellten dazu fest (Cesari/Alonso/Matyjewski 1991, S. 311): „Ligament injuries are of particular interest especially because of their consequences in terms of permanent disability.“ [Bänderverletzungen sind von besonderem Interesse vor allem wegen ihrer Konsequenzen, was dauerhafte Behinderung angeht. Anm. d. Verf.] In den letzten Jahren haben sich die Überlegungen allerdings darauf konzentriert, auch die im medizinischen Sinn relativ einfachen, unkomplizierten Brüche der langen Knochen im Bein zu bewerten und so möglichst zu verhindern. Dazu wurde ein neuer Prüfkörper entwickelt, dessen Einsatz auch Änderungen im Testverfahren mit sich bringt. Die Details werden im nachfolgenden Teil der Arbeit näher betrachtet.

3.1. Biomechanische Betrachtungen

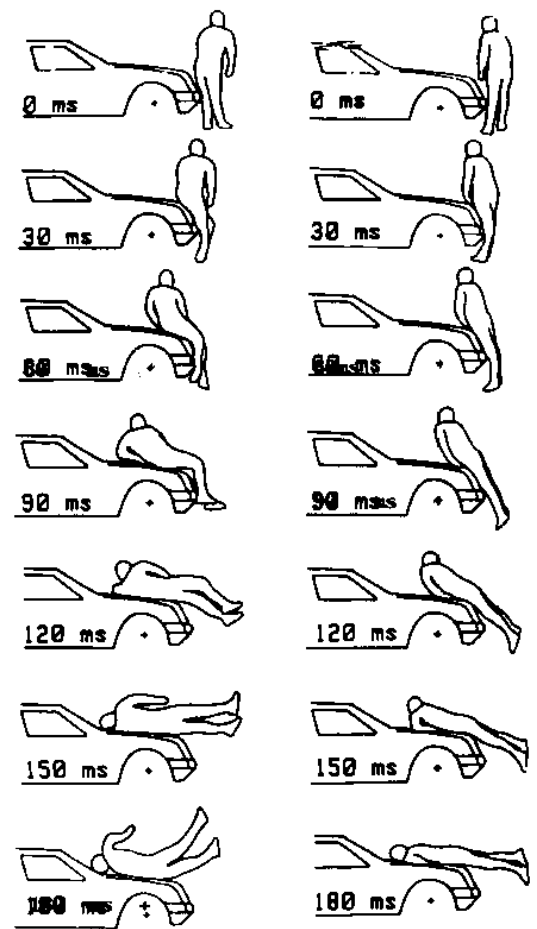
In der Frühzeit der Untersuchungen zur Fahrzeugsicherheit gab es im Wesentlichen zwei Möglichkeiten, Erkenntnisse über die Verletzungen von Menschen zu gewinnen: Man konnte entweder Verletzungsbilder untersuchen, also die Folgen eines von außen auf einen Menschen einwirkenden Ereignisses, und versuchen, daraus auf die Ursachen der Verletzungen zu schließen. Oder man konnte versuchen, das Ereignis selbst, also in der Fahrzeugsicherheit einen Unfall, möglichst gut nachzubilden, um daraus Erkenntnisse über den Ablauf zu gewinnen und so die Ursachen von Verletzungen zu bestimmen. Während bei der ersten Möglichkeit oft ein Teil der Ursachen nicht vollständig ermittelt werden kann, bleibt es bei der zweiten oft unklar, wie realitätsnah die Rekonstruktion des Unfalles war und ob das Verletzungsbild repräsentativ ist. Eine Kombination beider Möglichkeiten ist also sinnvoll und gewünscht.

Wie bereits im Kapitel 2.2 dargestellt wurde, waren sowohl umfangreiche Unfalldatenanalysen als auch Tests mit PMTO wesentliche Quellen für die Entwicklung der Testverfahren zum Fußgängerschutz durch die EEVC-Arbeitsgruppen. Zahlreiche Studien zu beiden Themengruppen wurden vor allem in den 1980er und 1990er Jahren veröffentlicht; die hier verwendeten Quellen sind nur exemplarisch gewählt, erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und stellen keine Wertung dieser oder anderer Veröffentlichungen dar.

Kallieris, Schmidt und Miltner berichteten beispielsweise über elf Tests mit PMTO und fünf mit einem Hybrid-II-Dummy, aus denen wesentliche Erkenntnisse über die Kinematik von Fußgängern bei einem Unfall sowie über zu erwartende Verletzungen gewonnen wurden (vgl. Kallieris/Schmidt/Miltner 1991). Abbildung 32 zeigt die Positionierung eines PMTO vor dem Test, Abbildung 33 charakteristische Momente während zweier Tests.



Abb. 32:
PMTO-Positionierung vor dem Test
(Kallieris/Schmidt/Miltner 1991, S. 18)



a. Koll. Geschw. 28 km / h b. Koll. Geschw. 23 km / h

Abb. 33:
Charakteristische Momente der
Kinematik bei Fußgängerunfällen
(Kallieris/Schmidt/Miltner 1991, S. 20)

Als häufigste Verletzungsart ermittelten Kallieris, Schmidt und Miltner offene und komplizierte Frakturen der unteren Extremitäten; zahlreiche andere Verletzungen traten auf, jedoch keine der Fuß- oder Kniegelenke (Kallieris/Schmidt/Miltner 1991, S. 20f.). Die Autoren stellen auch fest: „Die Gefahr einer Kniebänderzerreiung ist am gröſsten, wenn das Knie direkt vom Stoßfänger getroffen wird oder wenn es zu einer Relativbewegung zwischen Ober- und Unterschenkel kommt.“ (Kallieris/Schmidt/Miltner 1991, S. 22)

Kress und Porta berichteten über Tests mit insgesamt 604 intakten PMTO-Beinen (vgl. Kress/Porta 2001). Diese Beine wurden mit einem fahrbaren Kart, der eine Fahrzeugfront darstellte, angefahren. Das zitierte Dokument stellt lediglich einen Auszug aus einer Gesamtstudie dar, aber Kress und Porta erläuterten, dass eine Abhängigkeit der Verletzungen von verschiedenen Faktoren festgestellt werden konnte: der Anprallgeschwindigkeit und -richtung, der Geometrie der Fahrzeugfront, aber auch dem Alter des PMTO. Die durchschnittlichen Bruchkrfte für das Schienbein lagen in einer Bandbreite von 1,19 bis 7,07 kN, die für den Oberschenkel von 1,31 bis 8,37 kN. Die durchschnittlichen Biegemomente lagen zwischen 100 und 500 Nm. Kress und Porta beschrieben auch im Detail die typischen Bruchbilder der langen Beinknochen. Leider trafen Kress und Porta keinerlei Aussagen zu Verletzungen der Kniebänder. Unklar bleibt, ob diese nicht auftraten oder einfach nicht betrachtet worden waren, allerdings ist letzteres wahrscheinlicher, da es keinerlei Aussage zu diesem Thema gibt und Kress und Porta hervorhoben, dass die Bruchmuster untersucht werden sollten.

Interessant erscheint noch, dass Kress und Porta den Begriff „Bumper Fracture“, also „Stofngerfraktur“, als einen Begriff beschreiben, der in der medizinischen Fachliteratur [zumindest in Amerika; Anm. d. Verf.] spätestens seit 1929 verwendet wird (Kress/Porta 2001, S. 1f.). Eine Stofngerfraktur ist danach ein typischer Bruch im oberen Bereich des Schienbeines, der durch den Kontakt mit der harten Struktur des Stoßfängers auftritt. Oft kommt es gleichzeitig zu einem so genannten „Hngefu“, wenn der Stoßfänger in einer Höhe von etwa 17 – 23“ (ca. 43,2 – 50,8 cm) auf das Bein trifft und bei dem Anprall gleichzeitig der für die Steuerung des Fuanhebens verantwortliche Nerv gequetscht wurde.

Bereits in der EEVC-AG 10 hatte man versucht, die Bewegungsmuster von Fußgängern beim Unfall mit ersten einfachen Simulationen nachzuvollziehen (vgl. EEVC 2011c). In Rahmen der Arbeit der IHRA-Arbeitsgruppe „Pedestrian Safety“⁴³ wurden diese Aktivitäten noch einmalverstrkt und zusammengefasst, um die zukünftigen Testverfahren möglichst realitätsnah zu gestalten (vgl. IHRA PS 2002). Ein wesentlicher Bestandteil war dabei die Validierung von verschiedenen Simulationsmodellen, die in den beteiligten Forschungsinstituten verwendet worden

⁴³ Fußgängersicherheit

waren, durch den Vergleich der Simulationen mit den Daten der PMTO-Tests mit Fahrzeugen (siehe Abbildung 33).

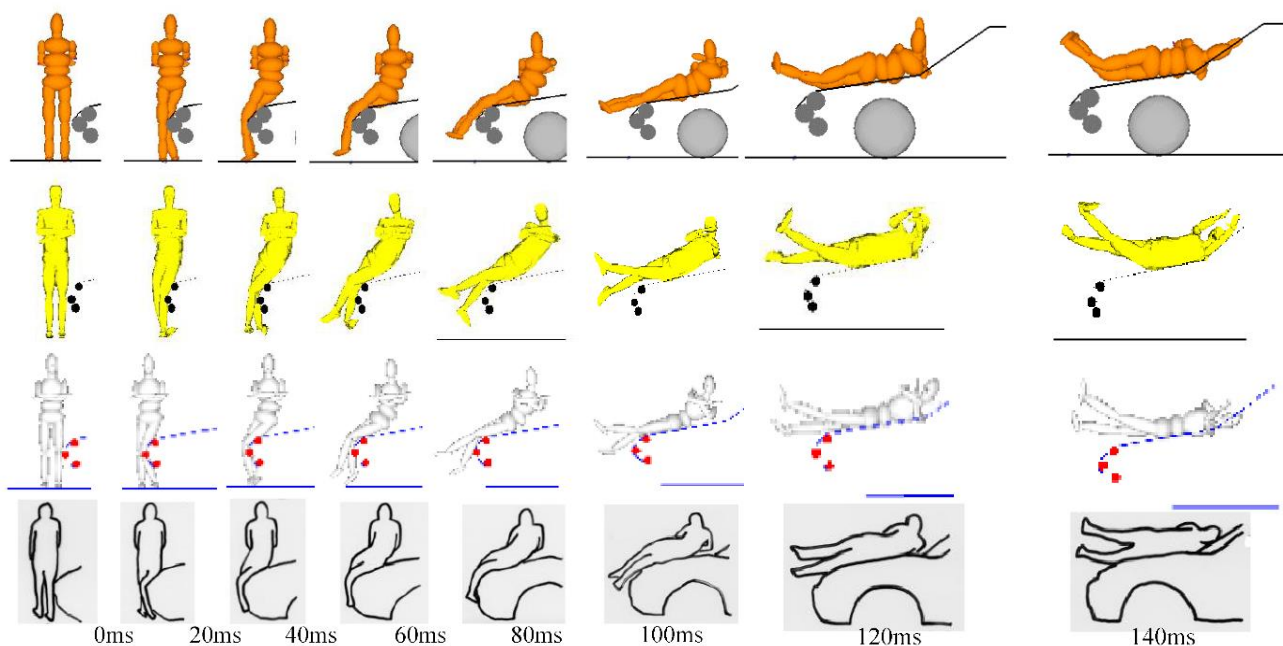


Abb. 33: Vergleich der Simulationen der an der IHRA-AG Pedestrian Safety beteiligten Forschungsinstitute mit einem PMTO-Test zum Zwecke der Validierung der Simulationsmodelle: Simulationen von (obere Reihe) JARI, (obere mittlere Reihe) NHTSA, (untere mittlere Reihe) Road Accident Research Unit⁴⁴ (RARU) der Universität Adelaide im Vergleich zum (untere Reihe) PMTO-Test (IHRA PS 2002, S. 15f.).

Ziel der Aktivitäten war es, zukünftig verstärkt Simulationen für die Unfallrekonstruktion und die Ableitung biomechanischer Kenngrößen verwenden zu können – speziell auch vor dem Hintergrund, dass PMTO-Tests aus ethischen Gründen zumindest fraglich sind.

Mit Hilfe der validierten Simulationsmodelle untersuchte die IHRA-AG „Pedestrian Safety“ dann auch Parameter wie die Abwickellänge des Fußgängers entlang der Fahrzeugkontur, den Einfluß der Fahrzeugkontur auf das Unfallszenario (siehe Abbildung 34), die Aufprallpositionen des Kopfes sowie die Aufprallgeschwindigkeiten und –richtungen jeweils in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit etc. Die Erkenntnisse wurden dann in die IHRA-Arbeit eingebracht und später auch in die Diskussionen zur Globalen Technischen Regelung im Rahmen der UNECE.

⁴⁴ Straßenunfall-Forschungsreferat

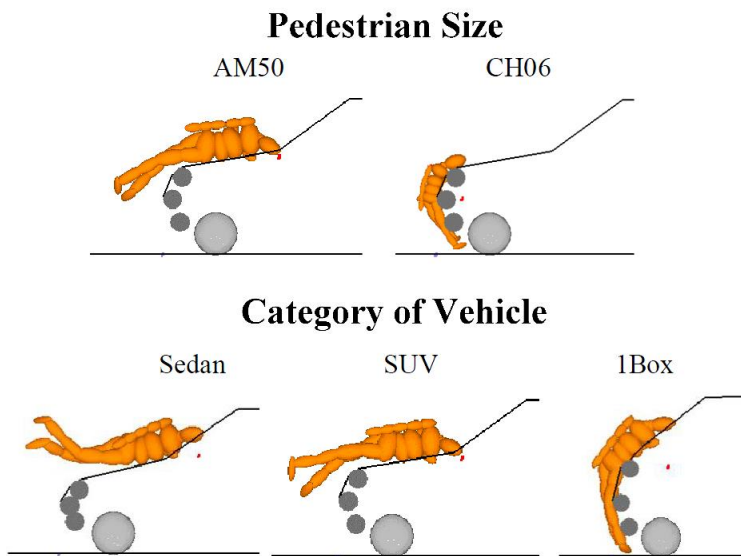


Abb. 34:
Einfluss von Fußgängergröße und Fahrzeugkontur auf die Kinematik des Fußgängers beim Fußgänger-Fahrzeug-Unfall (IHRA PS 2002, S. 39)

Auch Schmitt zeigte in seiner Präsentation – neben einer Reihe anderer Themen zu „Biomechanik und Computersimulationen von Fußgänger-Kollisionen“ – den Einfluss der Kontur der Fahrzeugfront auf die Kinematik des Fußgängerunfalls (siehe Abbildung 35). Vor allem für das Risiko von schweren und tödlichen Kopfverletzungen besteht ein klarer Zusammenhang. Schmitt erläuterte auch, dass die größere Varianz der Fahrzeugfronten eine Anpassung der Testverfahren notwendig erscheinen lässt (vgl. Schmitt 2008).

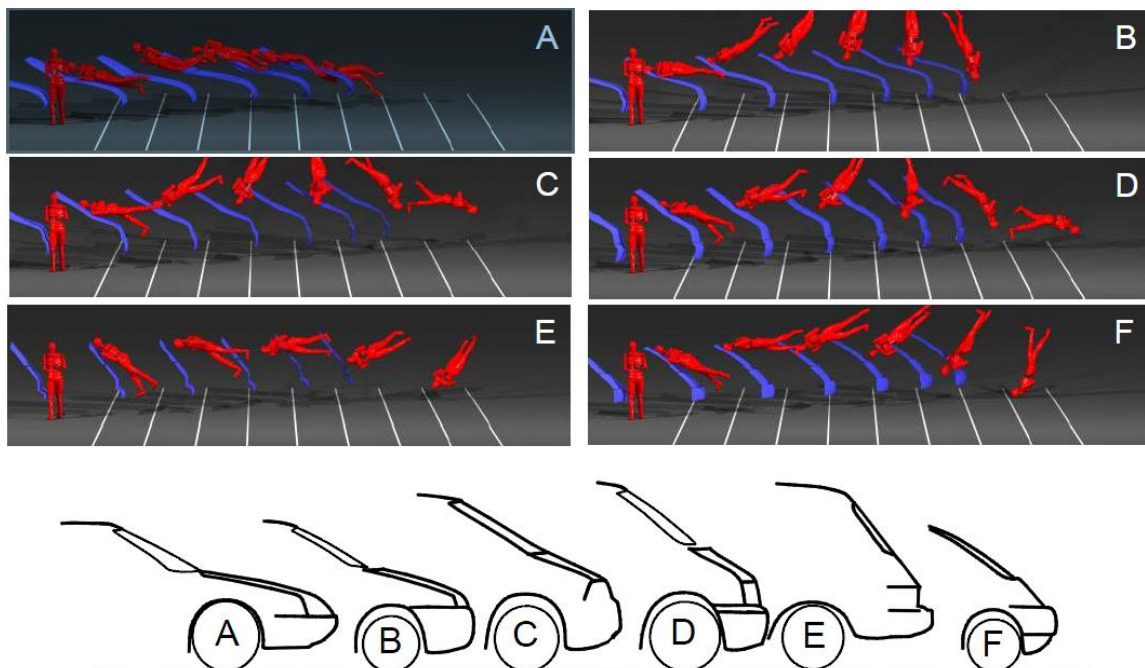


Abb. 35: Kinematik des Fußgängers bei einem Unfall in Abhängigkeit von der Kontur der Fahrzeugfront (Schmitt 2008, S. 15)

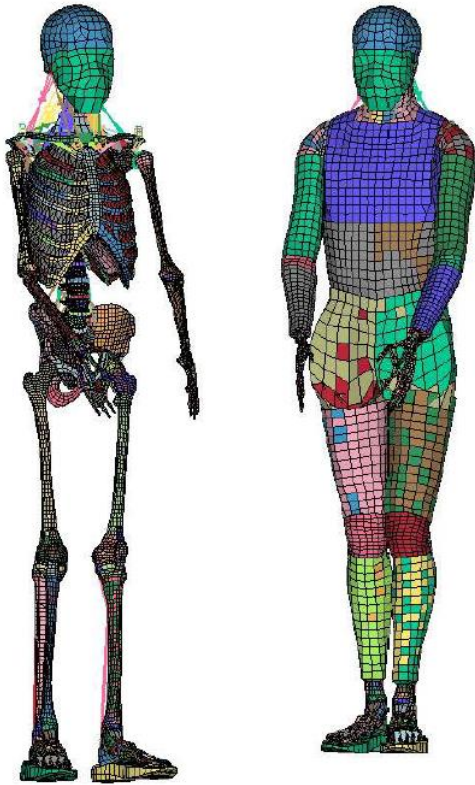


Abb. 36: Total Human Body Model for Safety (THUMS)
(Schmitt 2008, S. 22)

Schmitt erläuterte auch die Fortschritte, die die Entwicklung von Menschmodellen für die Simulation gemacht hat. Das so genannte „Total Human Body Model for Safety“⁴⁵ (THUMS) (siehe Abbildung 36) als eines der heute gebräuchlichsten Menschmodelle wurde inzwischen für zahlreiche Einsatzfälle validiert und könnte beispielsweise auch für Fußgängerunfälle die Verwendung von PMTO in Zukunft unnötig machen.

Außerdem ging Schmitt auch noch einmal im Detail auf Beinverletzungen beim Fußgängerunfall ein: Neben den typischen Bruchverletzungsbildern zeigte er den typischen Mechanismus von Beinverletzungen (siehe Abbildung 37) und erläuterte auch, dass speziell das Bruchverhalten der langen menschlichen Knochen sowie der Abriss der Kniebänder inzwischen recht zuverlässig simuliert werden können (siehe Abbildungen 38 und 39).

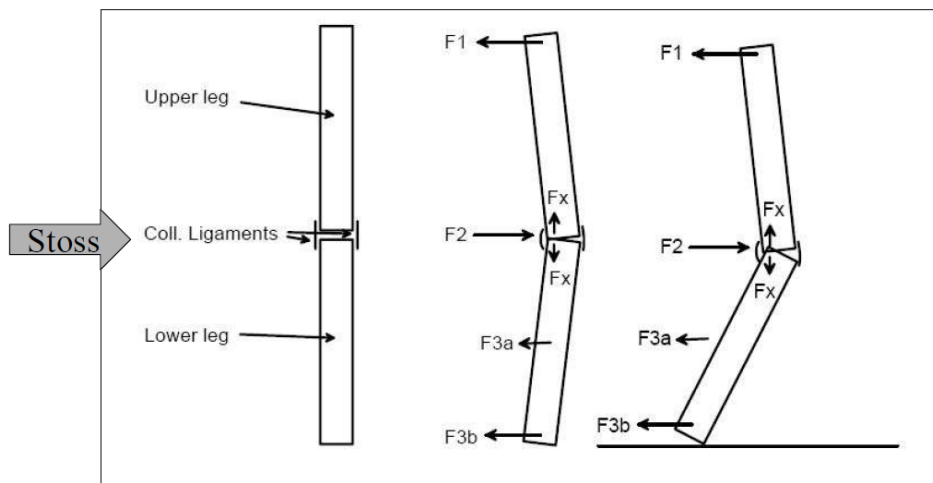


Abb. 37: Schematische Darstellung des Mechanismus für Beinverletzungen (Schmitt 2008, S. 26) mit den auf die langen Knochen und die Kniebänder wirkenden Kräften

⁴⁵ Vollständiges menschliches Körpermodell für die [Anm. d. Verf.: Fahrzeug-] Sicherheit

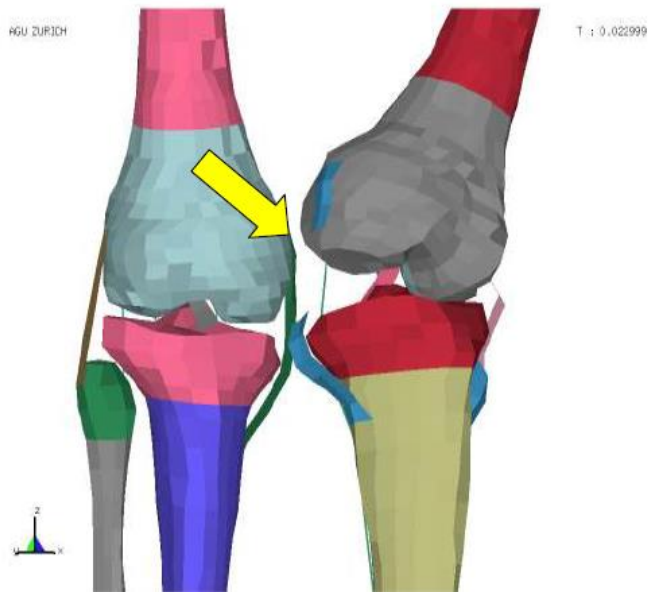
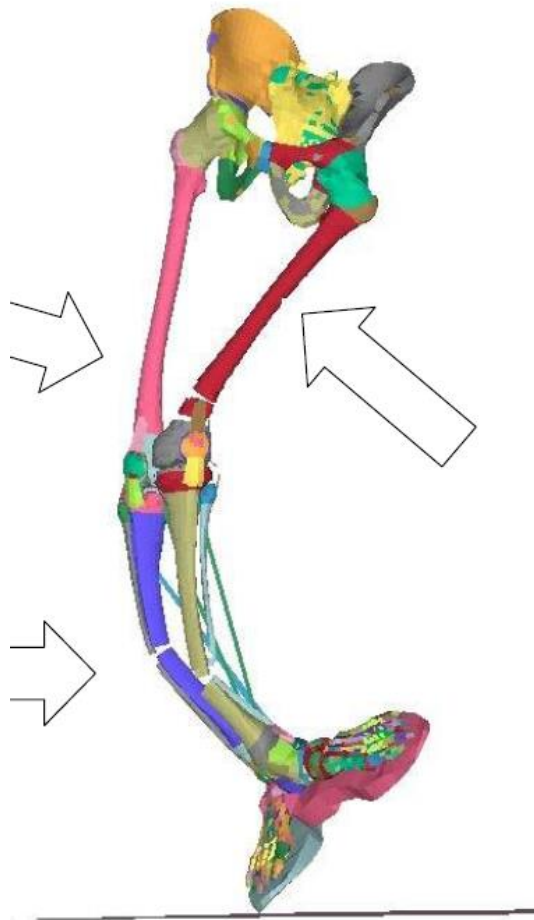


Abb. 38 (links) und 39 (oben): Vorhersage von Knochenbrüchen und Verletzungen der Kniebänder mit Hilfe der Simulation (Schmitt 2008, S. 31 bzw. S. 29)

Die Erkenntnisse aus den hier beispielhaft genannten biomechanischen Untersuchungen wurden bei der Entwicklung und werden bei der Weiterentwicklung der Testverfahren zum Fußgängerschutz genutzt. Gemeinsam mit den Detailanalysen aus dem Unfallgeschehen erlauben sie, gezielte Maßnahmen zur Verringerung von Verletzungsschweren zu entwickeln und deren Effektivität zu bewerten. Ein wichtiges Instrument dabei sind auch Betrachtungen, ob und wann Verletzungen auftreten. Üblich sind hier mathematische Betrachtungen, aus denen Verletzungsrisikofunktionen resultieren, die als Kurvenverläufe dargestellt werden. Reßle, Schramm und Kölzow erläuterten verschiedene Ansätze für die Ableitung von Verletzungsrisikofunktionen und die Generierung von Verletzungsrisikokurven. Abbildung 40 zeigt beispielhaft die Vorgehensweise für das Erzeugen einer Verletzungsrisikokurve für die Verletzungsschwere in Abhängigkeit von der Kollisionsgeschwindigkeit.

Abb. 40:
Ableitung von
Verletzungsrisikokurven nach
Reßle/Schramm/Kölzow 2010).

Annahme:
Die Verletzungsschwere (hier:
Maximum AIS2+) hängt direkt
mit der Kollisions-
geschwindigkeit VK zusammen.

1. Schritt (oben):

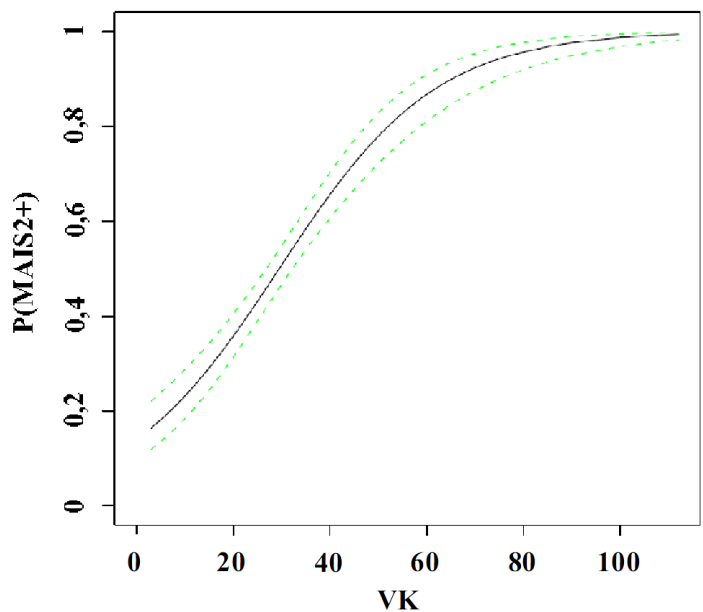
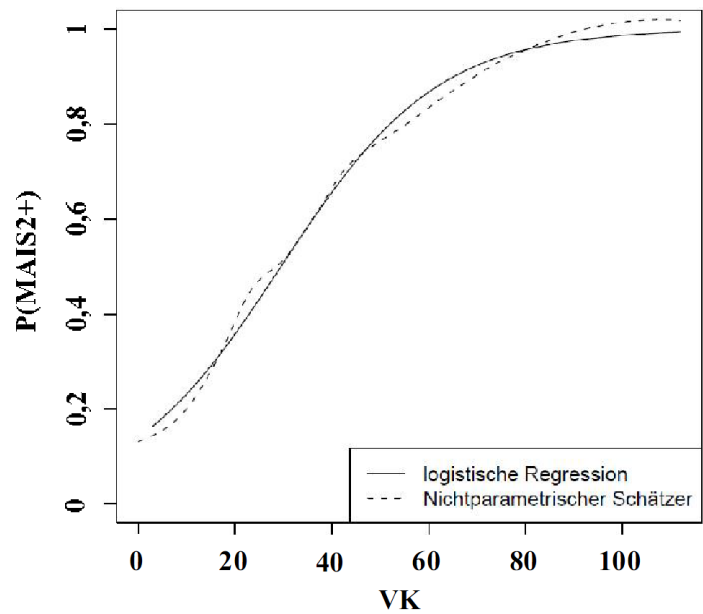
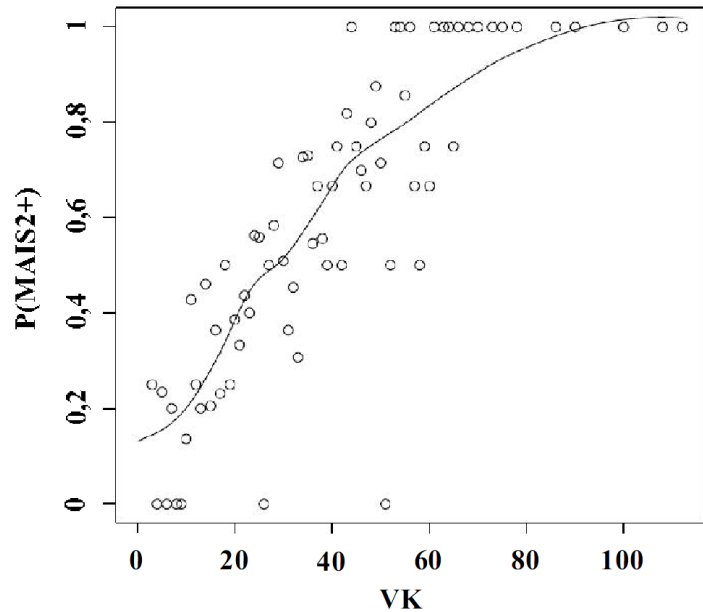
Die relative Häufigkeit der
Verletzungsschwere wird den
entsprechenden
Geschwindigkeiten zugeordnet
und ergibt so eine
Verlaufskurve.

2. Schritt (Mitte):

Auf Grund des Kurvenverlaufs
wird das Verfahren der
logistischen Regression gewählt,
um einen homogenen
Kurvenverlauf zu erzeugen.

3. Schritt:

Über den Vergleich mit
Konfidenzintervallen (hier 95 %)
kann eine Aussage zur Güte des
Kurvenverlaufs getroffen
werden.



3.2. Der EEVC-Beinprüfkörper

Bereits in Kapitel 2.2 wurde erläutert, dass ursprünglich die ab 1987 aktive EEVC-AG 10 die Aufgabe bekommen hatte, detaillierte Testverfahren für den Fußgängerschutz zu entwickeln, und dass innerhalb der AG 10 das französische Labor INRETS die Aufgabe übernommen hatte, einen Prüfkörper und ein Testverfahren für den Beinanprall gegen den Stoßfänger zu entwickeln.

Im Jahr 1991 stellten Cesari, Alonso und Matyjewski auf der ESV-Konferenz in Paris beides vor, auch Harris erwähnte die Entwicklungen in seinem Bericht über die EEVC-AG 10. Das Hauptaugenmerk bei der Entwicklung hatte auf dem Knie gelegen, das in der Lage war, sowohl die Biegung als auch die Scherung des Prüfkörpers beim Test zu bestimmen. Das Knie bestand aus einem Gelenk, das durch zwei verformbare Metallstreifen an seiner Bewegung gehindert wurde (siehe Abbildung 41). Beim Testen verformten sich diese Streifen; sie mussten daher nach jedem Test gewechselt werden. Messfühler konnten direkt am Gelenk den Biegewinkel messen, über die Verformung der Metallstreifen wurde die Scherung – der Versatz zwischen Ober- und Unterschenkel – bestimmt (siehe Abbildung 42).

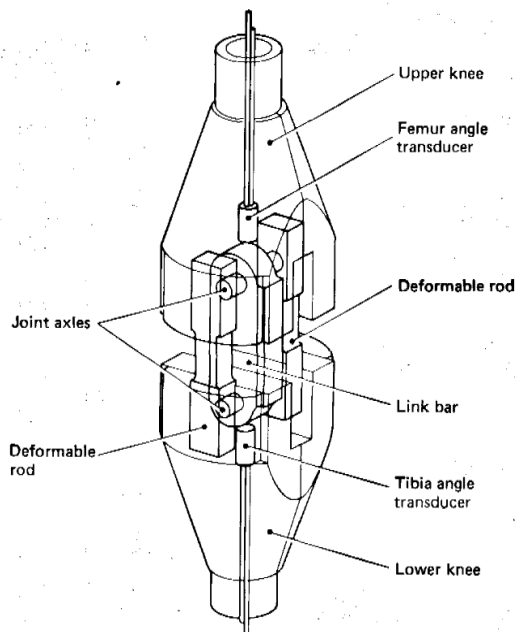
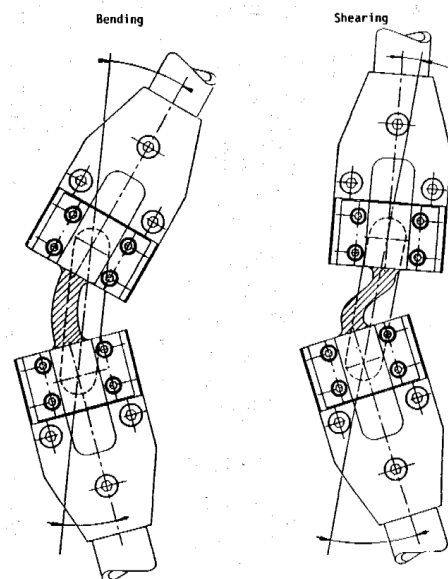


Abb. 42:
Bestimmung von Biegung und Scherung
im Knieelement des INRETS-Prüfkörpers
(Cesari/Allonso/Matyjewski 1991, S. 312)

Abb. 41:
Aufbau des Knieelements des von INRETS
im Rahmen der EEVC-AG 10 entwickelten
Beinprüfkörpers (Harris 1991, S. 295)



Ober- und Unterschenkel des Beinprüfkörpers wurden durch Aluminiumstäbe mit einem Stahlkern dargestellt, über deren Verformung man die im Test auftretenden Belastungskräfte und Biegewinkel für das Bein bestimmen konnte. Diese Stäbe waren in Schaum gehüllt, der Unterschenkel war so ausgelegt, dass der menschliche Fuß ebenfalls repräsentiert wurde. Der Prüfkörper wog 13,4 kg und war insgesamt 841 mm lang. Für die Testdurchführung war ursprünglich vorgesehen, den Prüfkörper mit einem kleinen Schlitten zu beschleunigen und dann im Freiflug auf das zu bewertende Fahrzeug prallen zu lassen. (vgl. Cesari/Alonso/Matyjewski 1991, S. 311f. bzw. Harris 1991, S. 294f.). Als biomechanische Limits schlugen Cesari, Alonso und Matyjewski maximal 15° Biegung und maximal 5 mm Scherung zwischen Ober- und Unterschenkel sowie maximal 150 g Beschleunigung im Bereich des oberen Schienbeines vor; diese Limits basierten auf PMTO-Tests und verfügbaren biomechanischen Testergebnissen.

Janssen berichtete, dass erste Tests keine Probleme mit der Haltbarkeit des Prüfkörpers und der Wiederholbarkeit der Tests zeigten, die an der Bewertung beteiligten Labore waren mit der Handhabung und dem Testverfahren zufrieden (vgl. Janssen 1996, S. 5f.). Der Prüfkörper war weiter verbessert worden, vor allem, um bezüglich seines Gewichtes, seiner Abmessungen sowie seiner Massenträgheitsmomente besser dem Bein eines 50-Perzentil-Mannes zu entsprechen. Außerdem hatte TRL ein alternatives Design des Knieelementes entworfen, das von der EEVC-AG 10 favorisiert wurde. Die Scherung im Knie wurde bei dem neuen Knieelement durch eine Blattfeder bestimmt. Auch der modifizierte, jetzt als „TRL-Beinprüfkörper“⁴⁶ (siehe Abbildung 43) bezeichnete Prüfkörper erfüllte im Prinzip die Anforderungen der Labore. Allerdings gab es von mehreren der Prüflabore Hinweise, dass im Testbetrieb deutliche Oszillationen auftraten, deren Dämpfung notwendig erschien. Außerdem waren statische und dynamische Zertifizierungsprozeduren für den Prüfkörper entwickelt worden.

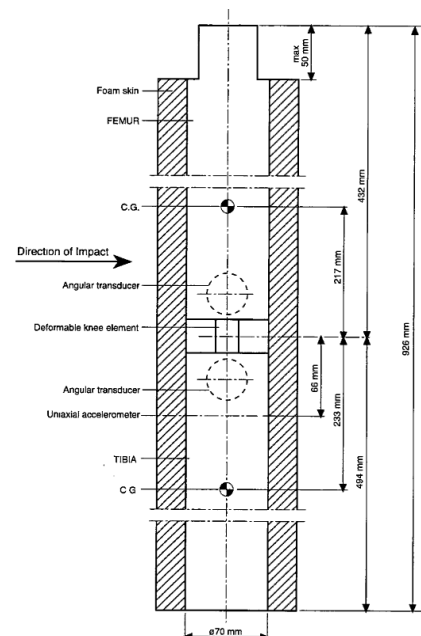


Abb. 43:
TRL-Beinprüfkörper
(Entwicklungsstand
der EEVC-AG 10)
(Janssen 1996, S. 6)

Um die Probleme mit der Oszillation abzustellen, wurde der Prüfkörper von TRL noch einmal verbessert und im Rahmen der Arbeit der EEVC-AG 17 ab 1997 in die Diskussion eingebracht bzw. später auch verwendet. Bezeichnet wird der Prüfkörper

⁴⁶ Dieser Prüfkörper wird oft auch als (EEVC-) WG-10-Bein (nach dem englischen Begriff Working Group für Arbeitsgruppe) bzw. –Beinprüfkörper bezeichnet. Zur besseren Unterscheidung von dem ebenfalls in der AG 10 entwickelten, so genannten INRETS-Beinprüfkörper wird hier der Begriff TRL-Beinprüfkörper beibehalten; Anm. d. Verf.

heute üblicherweise als „EEVC Legform Impactor“^{47, 48} (EEVC LFI) oder oft auch nur als „Lower Leg“; Abbildung 44 zeigt die endgültige Version des Prüfkörpers.

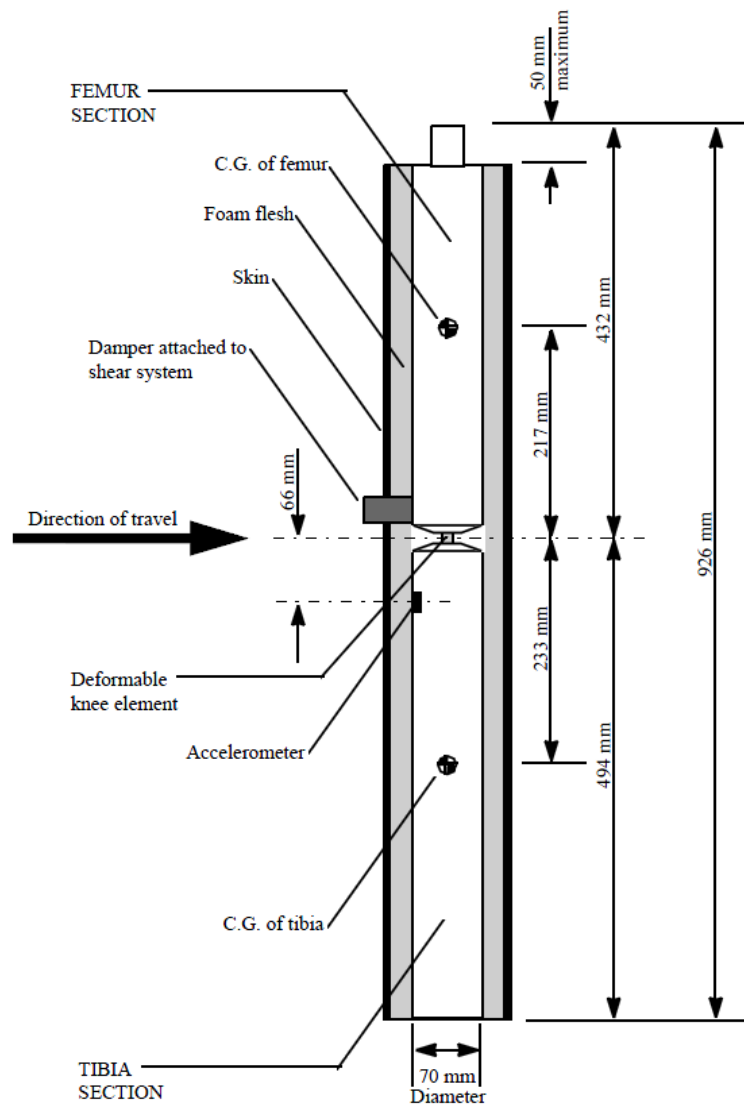


Abb. 44: Prinzipieller Aufbau der endgültigen Version des EEVC-Beinprüfkörpers, wie er im späteren EEVC-AG-17 Protokoll beschrieben wird (EEVC 2002, S. A14)

Wesentlichstes neues Merkmal dieses Prüfkörpers ist ein hydraulischer Dämpfer oberhalb des Knieelements, der das Schwingen des Scherungsfedersystems

⁴⁷ Beinform-Prüfkörper [Im deutschen Sprachgebrauch hat sich aber die vereinfachte Bezeichnung Beinprüfkörper durchgesetzt, diesem wird in dieser Arbeit gefolgt; Anm. d. Verf.]

⁴⁸ Tatsächlich gibt es verschiedene Bezeichnungen für den Prüfkörper: EEVC-Beinprüfkörper, TRL-Beinprüfkörper, (EEVC-) WG-17-Beinprüfkörper (nach dem englischen Begriff Working Group für Arbeitsgruppe). In den Diskussionen zur Gesetzgebung zum Fußgängerschutz, an denen der Verfasser beteiligt war, wurde vereinbart, den Prüfkörper als EEVC-Beinprüfkörper (englisch: EEVC Legform Impactor (EEVC LFI)) zu bezeichnen, der Verfasser folgt diesem Ansatz. Anm. d. Verf.

während des Testens verhindert. Das weitere Aussehen des Prüfkörpers folgt der vorhergehenden Entwicklungsstufe: Zwei Rohre repräsentieren die langen Knochen des menschlichen Beines, zwei Stahl-Kniebänder bilden die Verformung des menschlichen Knies bei einem Unfall nach. Der gesamte Prüfkörper wird für das Testen in Schaum sowie Neopren gehüllt, die das menschliche Fleisch sowie die Haut simulieren. Sowohl die Kniebänder als auch der Schaum müssen nach jedem Test ersetzt werden. Insgesamt wiegt der Prüfkörper 13,4 kg und ist 926 mm hoch. Damit repräsentiert er das Bein eines 50-Perzentil-Mannes. Gemessen werden mit dem Prüfkörper die Biegung und die Scherung im Knie als Gradmesser für zu erwartende Kniebänderverletzungen sowie die (negative) Beschleunigung des Beines, die einen Gradmesser für das Risiko von Knochenbrüchen darstellt. Als Prüfkörper-Grenzwerte schlug die EEVC-AG 17 später maximal 15° Biegung und maximal 6 mm Scherung zwischen Ober- und Unterschenkel sowie maximal 150 g Beschleunigung vor (vgl. EEVC 2002, S. 35); für die späteren Einsatzzwecke in der Gesetzgebung bzw. im Verbraucherschutz wurden diese Grenzwerte entsprechend den gewünschten Schutzziele angepasst.

Obwohl die in die EEVC-Aktivitäten eingebundenen Labore offensichtlich mit dem Testverfahren des Beinprüfkörpers gegen den Stoßfänger und speziell auch mit dem EEVC-Beinprüfkörper zurechtkamen, gab es doch immer wieder offene Fragen. Um diese möglichst endgültig für sich zu lösen, führte eine Gruppe deutscher Automobilhersteller gemeinsam mit dem Testlabor der BAST Vergleichstests mit ihren Prüfkörpern durch. Siems und Kollegen berichteten über die Ergebnisse dieser Tests (vgl. Siems u.a. 2007):

Ziel der Tests war es, das Verhalten verschiedener Prüfkörper unter gleichen Testbedingungen zu untersuchen. Die Prüfkörper wurden bei der Firma BGS Böhme und Gehring, dem Betreiber des Fußgängerschutzlabors der Bundesanstalt für Straßenwesen, zuerst inspiziert und auf einen ordnungsgemäßen Ausgangszustand gebracht. Danach wurden die Prüfkörper unter gleichen Umgebungsbedingungen im BAST-Prüflabor invers getestet, d.h. die Prüfkörper hingen in einem Rahmen und wurden von einer Wabenstruktur angestoßen, die auf einem Beschleunigungsschlitten angebracht war und durch ein hydraulisches Antriebssystem auf eine gleichförmige Geschwindigkeit gebracht worden war. Unter derart kontrollierten Randbedingungen waren Tests mit sehr hoher Wiederholgenauigkeit und Nachvollziehbarkeit möglich.

Siems und Kollegen berichteten, dass die Ergebnisse der Tests für die Prüfkörper-Grenzwerte jedes Prüfkörpers gute Abweichungskoeffizienten ergaben, die darauf schließen ließen, dass mit jedem der Prüfkörper wiederholgenaue und nachvollziehbare Tests möglich waren. Allerdings wurden für einzelne Prüfkörper systematische Abweichungen von der Gesamtheit aller Testergebnisse festgestellt, deren Ursachen sich nicht ermitteln ließen (vgl. Siems u.a. 2007, S. 3ff.). Das lässt darauf schließen, dass jeder der verwendeten Prüfkörper individuelle

Betriebseigenschaften hatte – was natürlich nicht gewünscht war. Im realen Testbetrieb könnte das beispielsweise für einen Fahrzeughersteller bedeuten, dass die Tests in seinem eigenen Prüflabor bestanden werden, in einem Fremdlabor aber eventuell nicht. Berücksichtigt man, dass Tests in Fremdlaboren üblicherweise zum Nachweis der Gesetzeserfüllung oder für den Verbraucherschutz durchgeführt werden, sind individuelle Betriebseigenschaften von Prüfkörpern natürlich nicht akzeptabel.

Über die Ergebnisse gleichzeitig durchgeführter Parameter-Untersuchungen mit einem einzelnen Prüfkörper berichteten Siems und Kollegen, dass der EEVC LFI unempfindlich gegen geringe Temperaturschwankungen, moderate Schwankungen der Luftfeuchtigkeit oder geringe Trefferabweichungen war. Als Parameter mit dem höchsten Einfluss auf das Testergebnis wurde – wenig überraschend – die Geschwindigkeit im Auftreffpunkt ermittelt. Allerdings wurde auch festgestellt, dass die Messwertabweichungen nicht mehr akzeptabel wären, wenn die volle Bandbreite der in der Testprozedur erlaubten Parameterabweichungen ausgenutzt worden wäre (vgl. Siems u.a. 2007, S. 5f.).

Wohl auch als Konsequenz aus solchen Tests stellte die BASt bereits 2006 einen „Handling Guideline for the EEVC WG 17 Legform Imapctor“⁴⁹ vor (vgl. BASt 2006). Darin werden sehr deutlich die Bedingungen beschrieben, die beim Umgang mit dem EEVC LFI eingehalten werden sollten.

Nach Einschätzung des Verfassers ist das Design des EEVC LFI robust und für den Einsatz im Labor gut geeignet. Allerdings hat der Prüfkörper schon seit seiner ersten Entwicklungsstufe ein entscheidendes Manko: Durch die parallele Anordnung der Stahlstreifen, die die Kniebänder repräsentieren, sowie durch deren Gestaltung, die eine Verformung im Wesentlichen nur in eine Richtung zulässt, ist der Prüfkörper ganz klar ein zweidimensionales Prüfwerkzeug. Eine zuverlässige Funktion ist nur gewährleistet, wenn die Prüfkörper-Längsmittlebene, die parallel zu den beiden Kniebändern verläuft und die der Flugrichtung des Prüfkörpers entsprechen soll, im rechten Winkel zu der Querebene liegt, in der sich die zu testende Fläche befindet. Beim Auftreffen auf Oberflächen, die nicht rechtwinklig zur Flugrichtung des Prüfkörpers ausgerichtet sind, zeigt der Prüfkörper schon bei geringen Winkelabweichungen eine Tendenz, sich so zu drehen, dass sich die Kniebänder in der vorgesehenen Richtung dynamisch verformen können. Bei größeren Winkelabweichungen führt das sehr schnell zu einer deutlichen Rotation des EEVC LFI, so dass eine saubere Messwernerfassung sowie eine wiederholbare und nachvollziehbare Testdurchführung nach Ansicht des Verfassers nur begrenzt möglich erscheinen. Das Testverfahren mit dem Prüfkörper berücksichtigt das, indem für das Gieren um die Hochachse Abweichungen von lediglich $\pm 5^\circ$ von der Prüfkörper-Längsmittlebene zugelassen werden (EEVC 2002, S. A15).

⁴⁹ Handhabungsleitfaden für den EEVC-WG-17-Beinprüfkörper

Schmitt hatte das Rotationsverhalten des Prüfkörpers ebenfalls untersucht (vgl. Schmitt 2013a). Er kam zu dem Schluss, dass die Definition der Stoßfängerecken, die heute durch Ebenen bestimmt werden, die einen Winkel von 30° zur Fahrzeugquerebene haben (bzw. 60° zur Fahrzeuglängsebene), schon heute den eingeschränkten Fähigkeiten des Prüfkörpers zu wenig Rechnung trägt (siehe Abbildung 45). Allerdings haben sowohl die Fahrzeugentwickler als auch die Prüflabore offensichtlich gelernt, mit dieser Schwäche des Prüfkörpers umzugehen.

Lower Leg Impact

$Y = 628, \alpha = 25^\circ$ / $Y = 756, \alpha = 35^\circ$

III. Vehicle impacted by EEVC Legform impactor in top down view

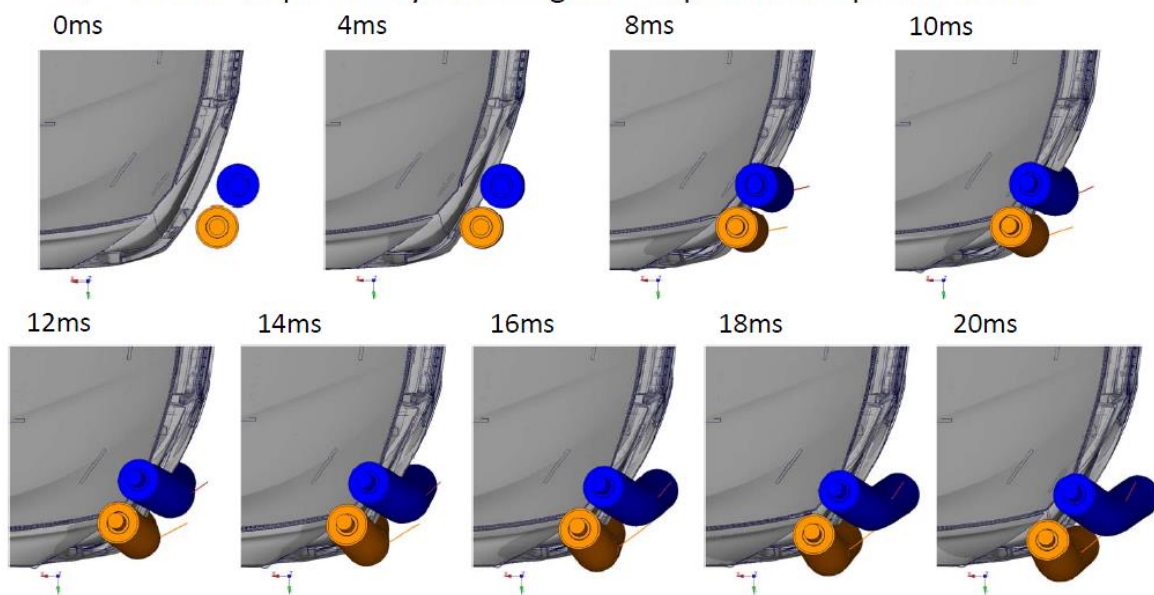


Abb. 45: Rotation des EEVC LFI beim Auftreffen auf Oberflächen, die nicht rechtwinklig zur Flugrichtung des Prüfkörpers ausgerichtet sind (Schmitt 2013a, S. 7). An den Bewegungsmarkern ist deutlich erkennbar, dass die Rotation des Prüfkörpers auch von der Neigung der Oberfläche abhängt.

Auch sonst haben die Prüflabore nach den Erfahrungen des Verfassers heute kaum Probleme, mit dem EEVC LFI umzugehen – das Testen mit dem Prüfkörper ist ein mehr oder weniger standardisierter Vorgang; Probleme tauchen üblicherweise nicht mehr auf. Allerdings wurde im Rahmen der in Kapitel 2.4 erwähnten Diskussionen um eine GTR zur Fußgängersicherheit ein neuer Prüfkörper vorgestellt, der für die Prüflabore neue Herausforderungen bereithält. Dieser Prüfkörper wird in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

3.3. Der neue flexible Beinprüfkörper FlexPLI

3.3.1. Übersicht über die Entwicklungsschritte des FlexPLI

Bereits in der Einleitung zu Kapitel 3 wurden Lawrence und Hardy mit der Feststellung zitiert, dass Verletzungen der unteren Extremitäten durch den Stoßfänger die häufigsten durch das Fahrzeug verursachten Verletzungen sind (vgl. Lawrence/Hardy 1998). Außerdem wurde gezeigt, dass dabei Verletzungen des Unterschenkels den absolut größten Anteil an den Verletzungen in dieser Körperregion haben (vgl. auch Abbildungen 11 – 13). Für zahlreiche Experten war es daher wohl unverständlich, sich mit dem Beinprüfkörper lediglich auf die detaillierte Bewertung der Verletzungen der Bänder im Knie zu konzentrieren und das Risiko von Knochenbrüchen nur über die recht allgemeine Ermittlung der Beschleunigung zu bewerten. In Japan hatte man konsequenterweise bereits 1999 – nahezu parallel zur Vorstellung des endgültigen Entwicklungsstandes des EEVC-Beinprüfkörpers – am „Japan Automobile Research Institute“⁵⁰ (JARI) einen neuen Beinprüfkörper entwickelt (vgl. Matsui u.a. 1999), der auch Verletzungen der langen Knochen bewerten können sollte. Dieser Beinprüfkörper wurde nach seinen Entwicklern auch als JARI-Prüfkörper⁵¹ bezeichnet.

Matsui und Kollegen verglichen in ihrer Studie das Verhalten des EEVC- sowie des JARI-Prüfkörpers mit den Testergebnissen aus PMTO-Versuchen (vgl. Matsui u.a. 1999). Leider wird dafür keine Abbildung des JARI-Prüfkörpers gezeigt. Aus den Erläuterungen wird aber deutlich, dass mit Hilfe von je einer Kraftmessdose am Ober- und Unterschenkel des JARI-Beinprüfkörpers zumindest Aussagen über die genauen Belastungen der langen Knochen getroffen werden konnten. Die Belastungswerte für das Knie konnte man wie beim EEVC-Prüfkörper über Verformungselemente messen, die Aussagen zu den Scherkräften, den Biegemomenten und dem Biegewinkel im Knie zuließen. Im Gegensatz zum EEVC-Beinprüfkörper konnte man jedoch am JARI-Prüfkörper den Scherversatz zwischen Ober- und Unterschenkel nicht messen. Ansonsten war der Prüfkörper in seinem prinzipiellen Aufbau dem EEVC-Prüfkörper wohl auch dahingehend ähnlich, dass ein Schaum sowie eine Neopren-Außenhaut das menschliche Fleisch und die menschliche Haut simulierten. In ihren Untersuchungen kommen Matsui und Kollegen dann allerdings zu dem Schluss, dass für beide Prüfkörper die Biofidelität besonders bei Tests mit hohen Geschwindigkeiten nicht befriedigend ist.

Wittek und Kollegen nahmen das Ergebnis der Studie von Matsui und Kollegen zum Anlass, weitere Verbesserungen an dem JARI-Prüfkörper vorzunehmen (vgl. Wittek u.a. 2001). Sie schlugen vor, anstelle der Verformungselemente im Kniebereich das

⁵⁰ Japanisches Automobil-Forschungsinstitut

⁵¹ Später wurde auch die Bezeichnung „JARI-1-Prüfkörper“ [für „erste Generation des JARI-Prüfkörpers“; Anm. d. Verf.] verwendet (vgl. Wittek u.a. 2001)

Kniegelenk des kurz zuvor vorgestellten, so genannten Polar-2-Dummys⁵² zu verwenden. Bei diesem Kniegelenk wurde der Gelenkkörper auf der Oberschenkelseite durch vereinfachte und symmetrische elliptische Oberflächen dargestellt sowie der Meniskus auf der Unterschenkelseite durch eine Polyurethan-Unterlage. Die Bänder, die das menschliche Kniegelenk zusammenhalten, wurden durch federbelastete Stahlseile dargestellt. Dadurch wurde eine Bewegung des Prüfkörper-Kniegelenkes ermöglicht, die der des menschlichen Kniegelenkes sehr nahe kam. Gleichzeitig gab es – im Gegensatz zum EEVC- und dem ersten JARI-Prüfkörper – im Knie keine Verformungselemente mehr, die nach jedem Test ersetzt werden mussten (vgl. Wittek u.a. 2001, S. 2). Der so entstandene Prüfkörper wurde jetzt „New JARI impactor“, also neuer JARI-Prüfkörper, genannt (siehe Abbildungen 46 und 47).

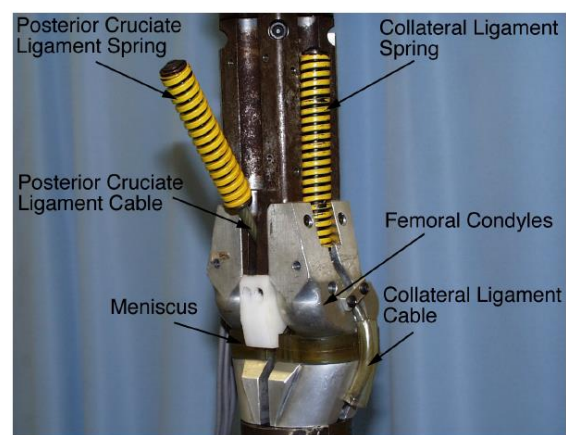
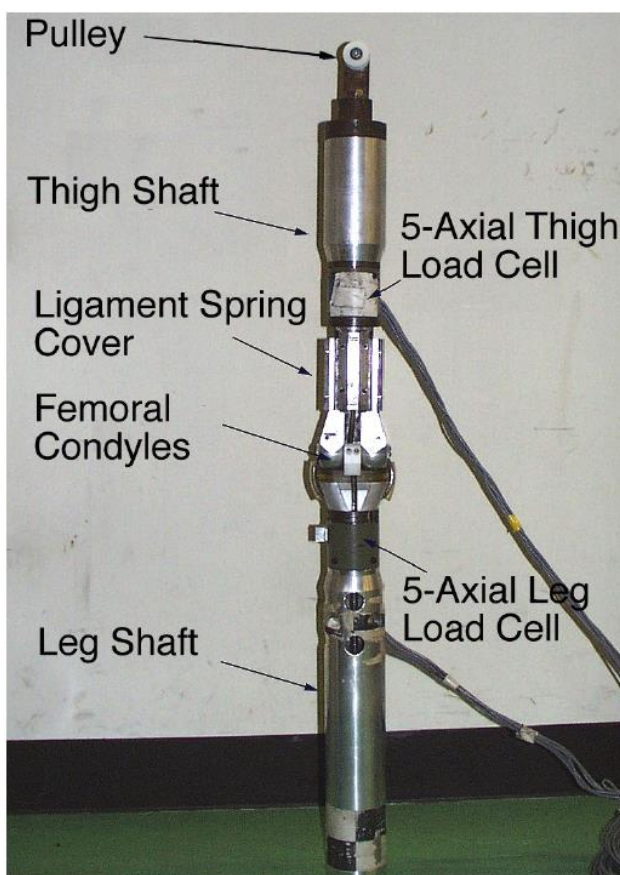


Abb. 46 (links) und 47 (oben): Der New-JARI-Beinprüfkörper ohne Fleisch- und Außenhaut-Ersatz (links) sowie das neue Kniegelenk des Polar-2-Dummys (oben) nach Wittek u.a. 2001, S. 2.

Jedoch stellten auch Wittek und Kollegen abschließend fest, dass selbst mit dem verbesserten Design des New-JARI-Prüfkörpers die Belastungen am menschlichen Bein, die aus veröffentlichten PMTO-Versuchen als Referenzwerte zur Verfügung standen, nicht vollständig nachgebildet werden konnten (vgl. Wittek u.a. 2001, S. 8 - 9).

⁵² Der Polar-Dummy ist ein spezieller Fußgängerdummy, der von den Firmen Honda und GESAC sowie von JARI seit 1998 entwickelt wurde (vgl. Akiyama/Okamoto/Rangarajan 2001). Polar-2 bezeichnet die zweite Generation dieses Dummys.

Als wesentliche Ursache für dieses Problem wurde die Darstellung des Ober- sowie des Unterschenkelknochens durch nahezu biegesteife Rohre erkannt: Menschliche Knochen weisen eine gewisse Biegsamkeit auf und die Durchbiegung der langen Knochen im menschlichen Bein bei Belastung konnte mit biegesteifen Rohren nicht adäquat erreicht werden. Diese Durchbiegung hat jedoch einen Einfluss auf die Verletzungsmechanismen. Die Abbildung 48 (siehe Konosu/Ishikawa/Tanahashi 2001, S. 5) zeigt, dass die Biegsamkeit der Knochen dabei nicht nur Verletzungen der Knochen selbst beeinflusst, sondern auch mögliche Verletzungen der Bänder, welche die Knochen im menschlichen Bein miteinander verbinden. Speziell japanische Experten forderten daher einen Prüfkörper, der diese Biegung der Knochen auch simulieren kann (vgl. Konosu/Ishikawa/Tanahashi 2001).

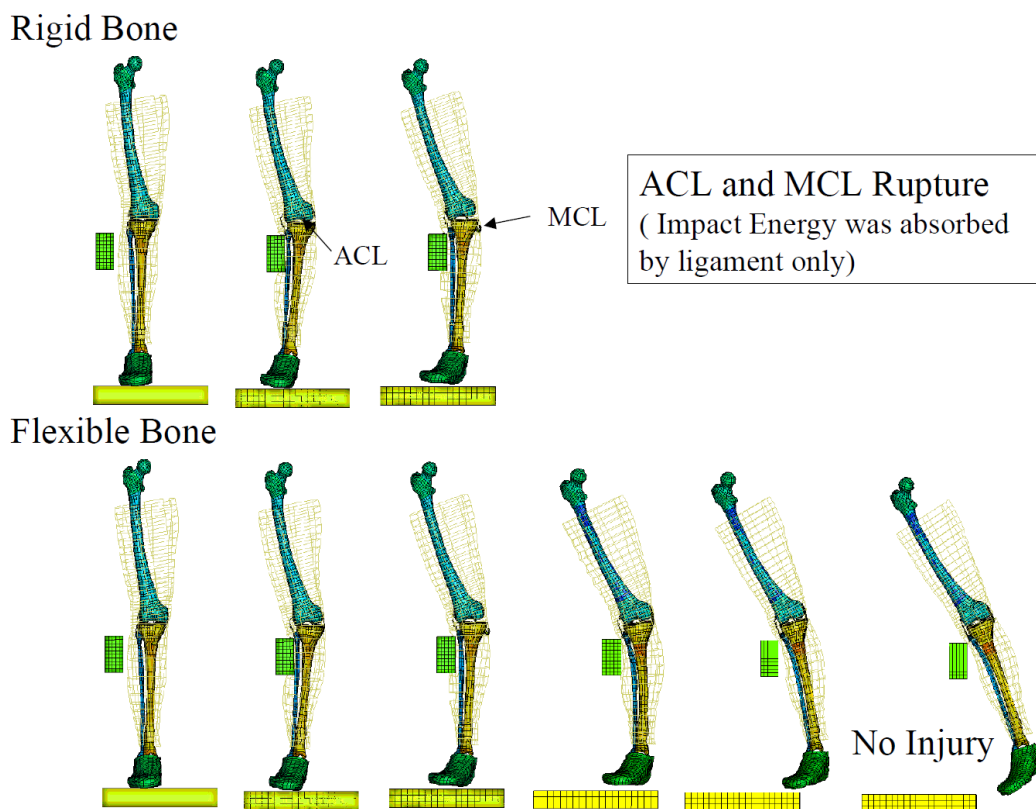


Abb. 48: Simulierter Vergleich der Verletzungsabläufe für biegesteife Knochen (oben), wie sie durch den EEVC-Prüfkörper simuliert werden, sowie für biegbare Knochen (unten) nach Konosu/Ishikawa/Tanahashi 2001, S. 5. Bei einem biegesteifen Knochen wird die Aufprallenergie nur durch die Kniebänder absorbiert (obere Reihe), während bei einem flexiblen Knochen Energie auch durch die Biegung des Knochens abgebaut wird (untere Reihe).

JARI entwickelte deshalb gemeinsam mit der „Japan Automobile Manufacturers Association“⁵³ (JAMA) den JARI-Beinprüfkörper weiter. Diese Weiterentwicklung

⁵³ Japanische Automobilhersteller-Vereinigung

wurde als JAMA-JARI-Beinprüfkörper Version 2002 der Öffentlichkeit vorgestellt (vgl. Konosu/Tanahashi 2003a). Als entscheidendste Neuerung wurden bei diesem Prüfkörper erstmals flexible Elemente für den Ober- sowie den Unterschenkel verwendet, die eine gewisse Durchbiegung bei Belastung erlaubten. Dazu wurden glasfaserverstärkte Kunststoffstäbe verwendet. Diese waren zwar elastischer als ein menschlicher Knochen, aber Konosu und Tanahashi erläuterten, dass die Durchbiegung bis zu dem Bereich, in dem ein menschlicher Knochen brechen würde, vergleichbar sei und dass durch die höhere Elastizität über diesen Bereich hinaus eine bessere Haltbarkeit des Prüfkörpers gegeben sei.

Auch das Kniegelenk des JAMA-JARI-Prüfkörpers war noch einmal verändert worden: Es wurde deutlich kompakter. Ansonsten hatte man sich bei den Abmessungen und Gewichten des Prüfkörpers aber an denen des EEVC-Prüfkörpers orientiert. Die Abbildung 49 zeigt den JAMA-JARI-Prüfkörper Version 2002.

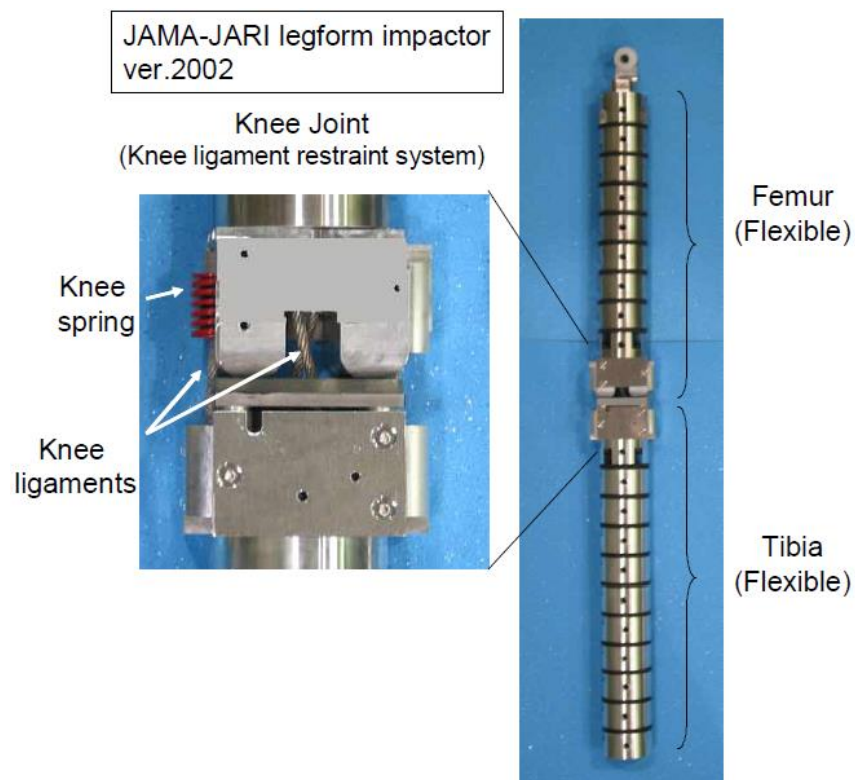


Abb. 49: JAMA-JARI-Beinprüfkörper Version 2002 nach Konosu/Tanahashi 2003a, S. 1

Zur Darstellung des Muskelfleisches im menschlichen Bein sowie der menschlichen Haut wurden weiterhin, so wie beim EEVC-Prüfkörper und auch bei den ersten JARI-Prüfkörpern, Schaumteile und eine Neopren-Außenhaut verwendet.

Der JAMA-JARI-Prüfkörper Version 2002 wurde im Wesentlichen für die Validierung des Konzepts eines flexiblen Beinprüfkörpers genutzt: Beide langen Knochen sowie das Kniegelenk wurden zuerst in quasistatischen Tests einer Durchbiegung unterzogen und danach als Baugruppe dynamisch getestet. Als Referenz führte man für das Kniegelenk auch Tests mit dem EEVC-Bein durch. Die Ergebnisse der Tests ließen sich dann direkt mit veröffentlichten PMTO-Testergebnissen aus der Fachliteratur vergleichen. Konosu und Tanahashi schlussfolgerten, dass die Biofidelität des neuen Prüfkörpers sowohl auf Komponentenlevel als auch im Zusammenbau hoch war und dass Tests mit dem neuen Prüfkörper daher gute Aussagen zu den Verletzungsrisiken für das menschliche Bein erwarten lassen würden (vgl. Konosu/Tanahashi 2003a, S. 7).

In den Veröffentlichungen zu der Version 2002 des Beinprüfkörpers wurden noch keine Angaben zu einer messtechnischen Ausrüstung gemacht, mit der man die Belastungen der einzelnen Baugruppen – also des Oberschenkels, des Unterschenkels sowie des Kniegelenks – hätte messen und bewerten können. Es bleibt unklar, ob eine Messtechnik überhaupt vorhanden war oder ob lediglich keine Messungen vorgenommen bzw. keine Versuchsauswertungen durchgeführt wurden. Kurz nach der Vorstellung des JAMA-JARI-Beins Version 2002 wurde aber auch schon eine Version 2003 gezeigt (vgl. Konosu/Tanahashi 2003b). Diese Version wurde speziell für die Auslegung der Messtechnik genutzt. Die Abbildung 50 zeigt die Position der in dem Prüfkörper vorgesehenen Sensoren.

Die genaue Funktionsweise der messtechnischen Ausrüstungen sowie den Aufbau des Prüfkörpers im Detail erläuterten Konosu und Tanahashi in den Diskussionen der Expertenarbeitsgruppen (vgl. Konosu/Tanahashi 2003c). Dabei konnte man auch vermuten, dass die Messtechnik des Prüfkörpers selbst ein Problem darstellen würde: Die hohe Anzahl der Sensoren stellte für die Verkabelung des Prüfkörpers sicherlich eine größere Herausforderung dar (siehe Abbildung 51).

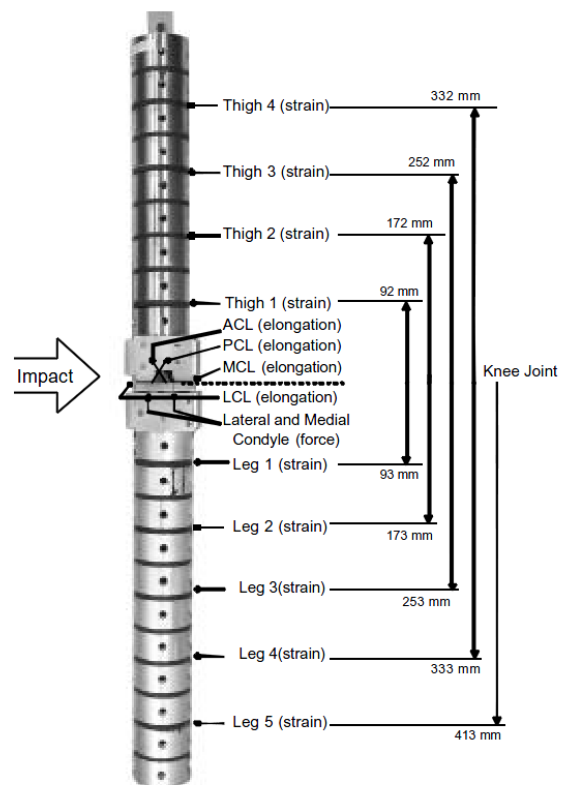


Abb. 50: Vorgesehene Messstellen im FlexPLI 2003 (Konosu/Tanahashi 2003b, S. 471)

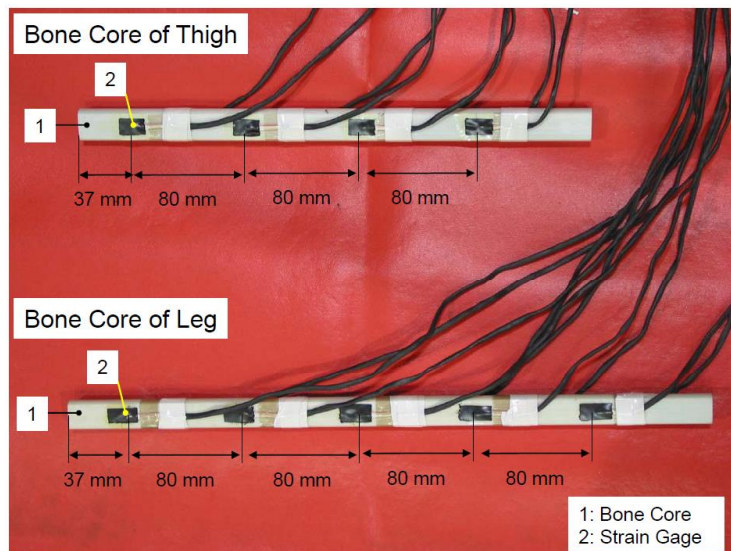


Abb. 51:
Verkabelung der GFK-Stäbe⁵⁴, die den Ober- und den Unterschenkelknochen eines menschlichen Beines darstellen (Konosu/Tanahashi 2003c, S. 17): Pro Messstelle ist sowohl auf der Vorderseite als auch auf der Rückseite ein Dehnmessstreifen angebracht, von denen jeder ein eigenes Anschlusskabel benötigt.

Auch die genaue Funktionsweise der Messwerterfassung im Knieelement wurde erläutert: Die von außen sichtbaren Stahlkabel, die die menschlichen Kniebänder darstellen, halten das Knie lediglich zusammen. Die Dehnung der Kniebänder wird über im Knieelement angebrachte Potentiometer gemessen (siehe Abbildung 52).

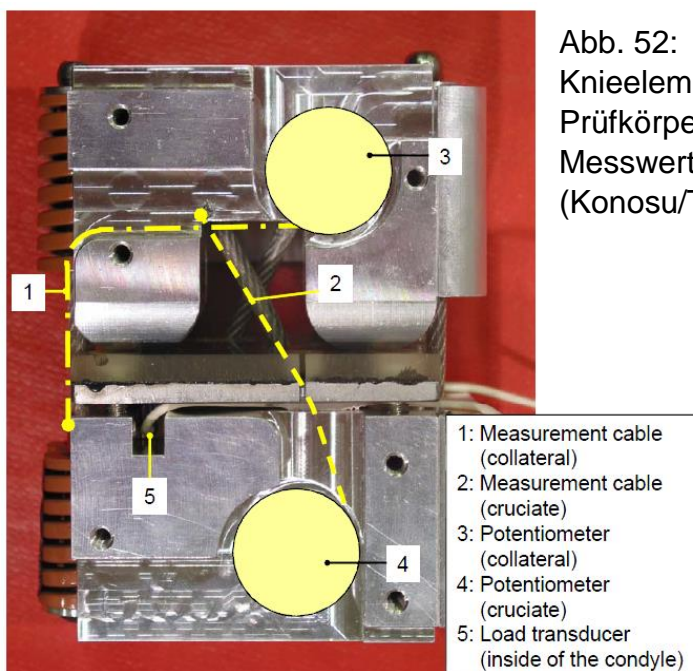


Abb. 52:
Knieelement der Version 2003 des neuen Prüfkörpers mit der Prinzipdarstellung der Messwerterfassung im Knie (Konosu/Tanahashi 2003c, S. 19)

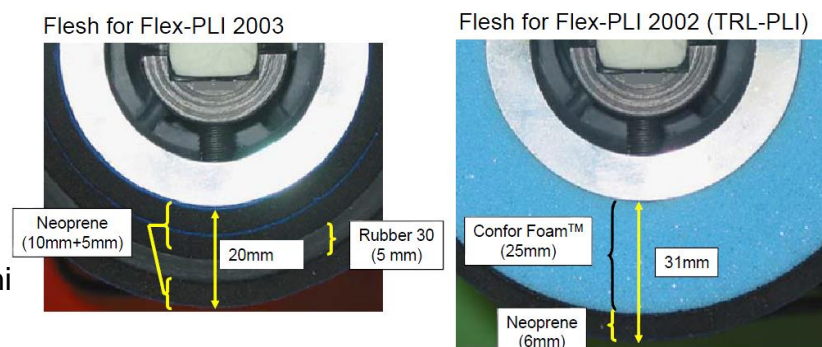
⁵⁴ glasfaserverstärkter Kunststoff

Etwa zum Zeitpunkt der Vorstellung der Version 2003 des JAMA-JARI-Prüfkörpers wurde auch begonnen, die Bezeichnung „Flexible Pedestrian Legform Impactor“, also auf Deutsch „Flexibler Fußgänger-Beinform-Prüfkörper“, zu benutzen. Sehr schnell setzte sich jedoch die handlichere Abkürzung FlexPLI als Bezeichnung für den Prüfkörper durch⁵⁵. Das Gesamtkonzept des Beinprüfkörpers wurde aber beibehalten: Wie alle vorher vom EEVC bzw. von JARI bzw. JAMA vorgestellten Prüfkörper repräsentierte auch das FlexPLI 2003 mit seinen Abmessungen, seinem Gewicht sowie der Lage der Massenschwerpunkte für den gesamten Prüfkörper sowie für Ober- und Unterschenkel das Bein des 50-Perzentil-Mannes (vgl. Konosu/Tanahashi 2003b, S. 460ff.).

Gegenüber der Version 2002 wurden beim FlexPLI 2003 alle Teile noch einmal optimiert, besonders auf eine weiter verbesserte Biofidelität der einzelnen Teile wurde nach Darstellung von Konosu und Tanahashi Wert gelegt (vgl. Konosu/Tanahashi 2003b, S. 460). Durch die in den Abbildungen 51 und 52 gezeigte Anordnung der Messwertaufnehmer waren die Entwickler des FlexPLI 2003 in der Lage, in der Fachliteratur vorhandene Angaben zu Oberschenkel-, Unterschenkel- und Kniegelenkbelastungen als Referenzwerte für die Validierung des Prüfkörpers zu verwenden. Die bereits erzielte hohe Biofidelität des JAMA-JARI-Beinprüfkörpers in der Version 2002 konnte so nach Angaben von Konosu und Tanahashi mit dem FlexPLI 2003 für den Ober- und den Unterschenkel sowie das Kniegelenk noch einmal verbessert werden (vgl. Konosu/Tanahashi 2003b, S. 471). Weiteren Klärungsbedarf sah man allerdings für die Biofidelität des gesamten zusammengebauten Prüfkörpers.

Neben zahlreichen anderen gab es beim FlexPLI 2003 auch eine sehr offensichtliche Veränderung: Im Gegensatz zum EEVC-Prüfkörper und den ersten Versionen des JAMA-JARI-Prüfkörpers wurde jetzt kein Schaum mehr verwendet, der nach jedem Test ersetzt werden musste, sondern verschiedene Lagen Neopren und Gummi simulierten gemeinsam das Muskelfleisch und die Hautoberfläche des Menschen (siehe Abbildung 52).

Abb. 52:
Haut- und
Fleischsimulation
des FlexPLI 2003
im Vergleich zum
EEVC LFI
(Konosu/Tanahashi
2003c, S. 15)



⁵⁵ Entsprechend der deutschen Übersetzung müsste man im Sprachgebrauch eigentlich „der FlexPLI“ („der ...-Prüfkörper“) verwenden, durchgesetzt hat sich aber eher „das FlexPLI“ (für „das Bein“). Diesem Sprachgebrauch wird in dieser Arbeit gefolgt. Anm. d. Verf.

In den Veröffentlichungen zum FlexPLI Version 2003 hatten die Autoren schon zusammenfassend festgestellt, dass weitere Entwicklungsarbeit nötig wäre. Neben der bereits erwähnten notwendigen Validierung des Gesamprüfkörpers warfen Konosu und Tanahashi auch die Frage auf, ob ein Beinprüfkörper auch ein Wadenbein benötigen würde und wie dieses für die Verletzungsbewertung berücksichtigt werden müsste (vgl. Konosu/Tanahashi 2003c, S. 32).

Um die offenen Probleme zu klären, stellten JAMA und JARI bereits 2004 eine weitere Version des FlexPLI vor (siehe Abbildung 53; vgl. Konosu/Issiki/Tanahashi 2005). Bei dieser wurden nur noch sehr begrenzt Änderungen an den einzelnen Bauteilen vorgenommen. Besonders aber beim Zusammenbau des Prüfkörpers wurde versucht, einerseits die Belastungen des menschlichen Beines bei einer Kollision mit einem Fahrzeug noch besser zu berücksichtigen und andererseits den Anforderungen an einen Prüfkörper Rechnung zu tragen. So wurden für einzelne Teile des FlexPLI 2004 beispielsweise andere Materialien verwendet, die Biegefähigkeit im Knie sowie der langen Knochen wurde erhöht, man verzichtete im Vergleich zum FlexPLI 2003 auf vier der fünfzehn Messstellen, um das Gewicht der Verkabelung einzusparen. Diese und weitere Maßnahmen führten nach Einschätzung von Konosu, Issiki und Tanahashi zu einer deutlichen Verbesserung der Handhabbarkeit sowie zu einer Erhöhung der Haltbarkeit des Prüfkörpers. Gleichzeitig führten die Veränderungen noch einmal zu einer Verbesserung der Biofidelität, die für die Darstellung der Belastungen am Bein als sehr gut bis gut eingeschätzt wurde. Allerdings entsprach der zeitliche Belastungsverlauf noch nicht ganz dem Verletzungsverlauf bei einem Menschen. Die Autoren kündigten daher auch weitere Untersuchungen zu einzelnen Themen an; besonders der mögliche Einfluss der Muskelspannung auf die Steifigkeit des Knies wurde dabei hervorgehoben.

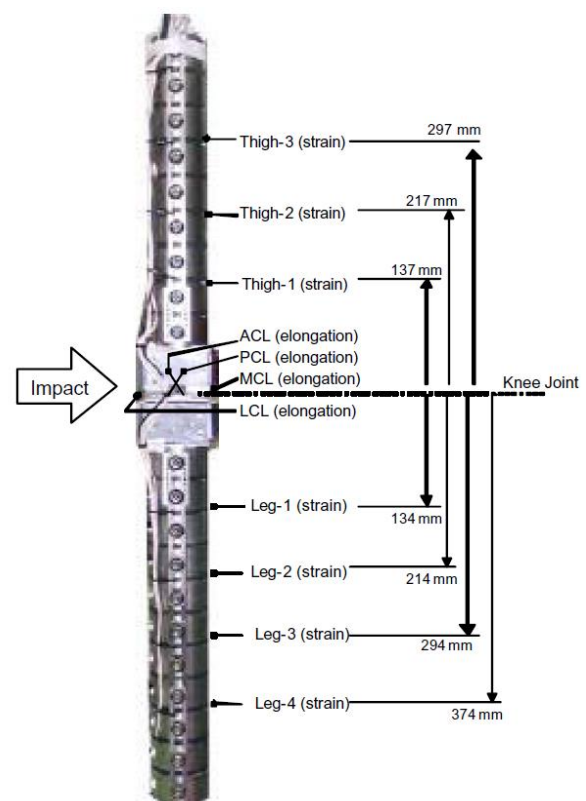
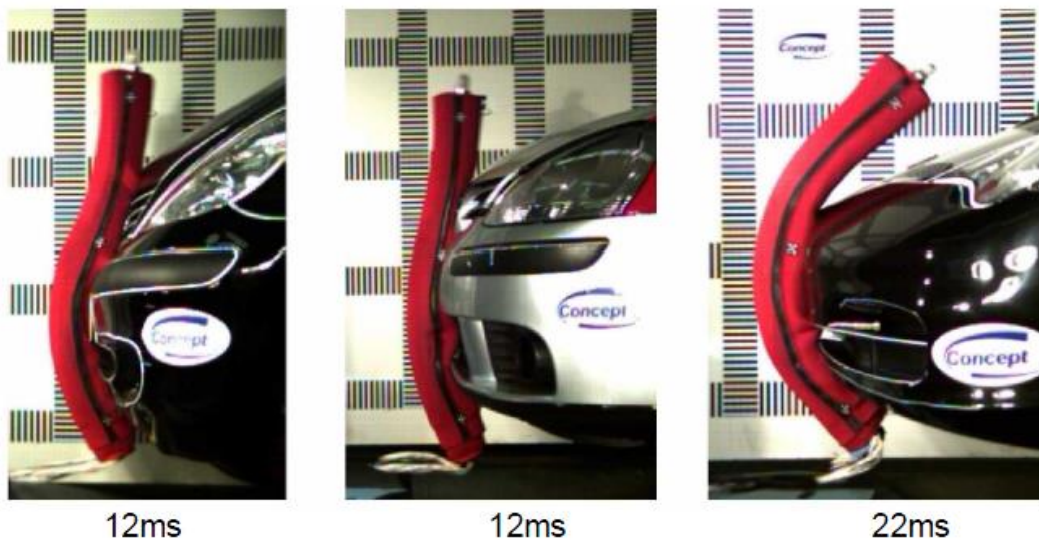


Abb. 53:
FlexPLI Version 2004 mit vor-
gesehenen Messstellen
(Konosu/Issiki/Tanahashi 2005,
S. 4)

Mit der Verfügbarkeit der Versionen 2003 und 2004 des FlexPLI stellten JAMA und JARI erstmals auch anderen Testinstituten Prüfkörper für Tests zur Verfügung. Der Europäische Automobilhersteller-Verband ACEA konnte so Tests mit dem

FlexPLI 2003 bei der Firma Concept Technologie in Gratkorn durchführen lassen. In seinem Bericht über diese Tests schien Knotz im Gegensatz zu den Entwicklern des FlexPLI weniger überzeugt von dem neuen Prüfkörper zu sein (vgl. Knotz 2004). Er berichtete, dass der Beinprüfkörper sich auf Grund seiner Flexibilität sehr stark an die Kontur von verschiedenen getesteten Fahrzeugen anlegte (siehe Abbildung 54) und eine Bewertung des Deformationsverhaltens der Fahrzeugfront so eher nicht erfolgte (Knotz 2004, S. 13). Im Einzelfall führte das starke Durchbiegen sogar zu Beschädigungen des Prüfkörpers.

Time of maximum bending of the tibia:



Time of maximum knee bending (Pot MCL):

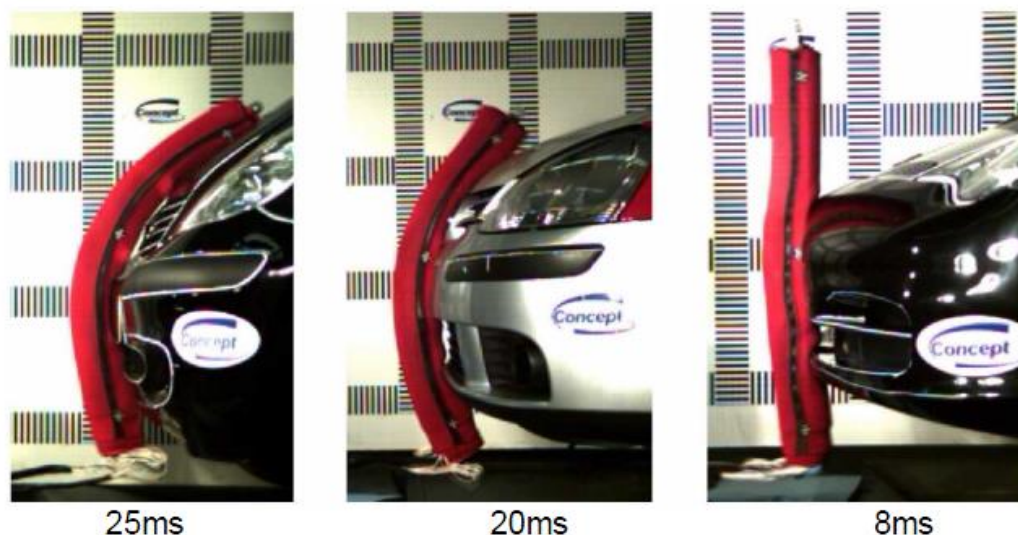


Abb. 54: Typisches Deformationsverhalten des FlexPLI 2003: Der Prüfkörper neigte dazu, sich eher an die Fahrzeugaußenkontur anzulegen als sie zu verformen (Knotz 2004, S. 25)

Knotz stellte auch fest, dass selbst deutliche Veränderungen der Testgeschwindigkeiten zu kaum veränderten Testergebnissen für die Belastungswerte des Beines führten. Außerdem kam er zu dem Schluss, dass vor allem große Geländewagen und so genannte Pick-ups die besten Testergebnisse erwarten ließen (vgl. Knotz 2004, S. 13), vermutlich weil hier eine flächige Abstützung des Prüfkörpers zu erwarten wäre.

Außerdem berichtete Knotz von zahlreichen Problemen bei der Handhabung des Prüfkörpers im Testbetrieb (vgl. Knotz 2004, S. 11 – 12). Besonders die Eigenschwingungen des Beines in der Freiflugphase eines Tests stellten ein deutliches Problem dar. Diese Eigenschwingungen beeinflussten die korrekte Geschwindigkeitsbestimmung negativ, unabhängig vom verwendeten Messsystem. Darüber hinaus wurde regelmäßig ein Verdrehen bzw. ein Versatz des Oberschenkels gegenüber dem Unterschenkel des Prüfkörpers beobachtet, der im Testbetrieb regelmäßig ausgeglichen werden musste. Zu guter Letzt stellte Knotz fest, dass die hohe Anzahl von Messstellen im Prüfkörper und die damit verbundene Handhabung der Verkabelung den Testbetrieb behinderten. Dieses war vor allem auch deshalb ein Problem, weil eventuelle Beschädigungen nicht immer offensichtlich waren und ihre Erkennung teilweise erst ein aufwändiges Zerlegen des Prüfkörpers voraussetzte.

Auch in Nordamerika waren Tests mit dem FlexPLI durchgeführt worden, dort mit Version 2004. Mallory, Stammen und Legault berichteten, dass bei drei von fünf Tests die Knochenelemente des FlexPLI brachen. Auch bei diesen Tests stellte die Verkabelung der Messtechnik ein großes Problem bei der Testdurchführung dar (vgl. Mallory/Stammen/Legault 2005, S. 11). Zur Lösung des letzteren Problems schlugen Mallory, Stammen und Legault vor, ein so genanntes „Onboard Data Acquisition System“⁵⁶ zu verwenden.

Zwischenzeitlich war das FlexPLI auch in die Diskussion über eine zukünftige GTR zur Fußgängersicherheit eingebracht worden. In der 7. Sitzung der Arbeitsgruppe, die diese GTR vorbereiten sollte, schlug der japanische Vertreter vor, das FlexPLI als einzigen zukünftigen Beinprüfkörper zu berücksichtigen. In Anbetracht der zahlreichen offenen Probleme sollte eine spezielle Arbeitsgruppe die letzten Entwicklungsschritte sowie die Einführung des FlexPLI begleiten (vgl. INF GR PS 2004). Diese Arbeitsgruppe wurde später auch ins Leben gerufen und war von 2005 bis 2010 mit der Weiterentwicklung des FlexPLI beschäftigt.

⁵⁶ Bordeigenes Datenerfassungssystem [gemeint ist ein im Prüfkörper installiertes System, das Daten über einen gewissen Zeitraum aufzeichnet, die dann später ausgelesen werden; Anm. d. Verf.]

Bereits in der 1. Sitzung der neuen Arbeitsgruppe, die als „Technical Evaluation Group“⁵⁷ (TEG) bezeichnet wurde, stellte Konosu eine neue Version des FlexPLI vor. Diese wurde nicht mehr nach dem Jahr der Vorstellung bezeichnet, sondern als Version G – ein Wortspiel, denn als weitere Entwicklungsschritte waren die Versionen GT und GTR geplant, letztere sollte dann den finalen Entwicklungsstand für die Verwendung in der GTR darstellen.

Konosu stellte zahlreiche erneute Detailänderungen des Prüfkörpers vor (vgl. Konosu 2005). Am augenscheinlichsten war die Änderung der Ober- und Unterschenkelsegmente von einem früher runden Querschnitt zu einem nun eckigen Querschnitt, auf der Anstoßseite waren abgerundete Kunststoffelemente, um eine Ähnlichkeit mit dem menschlichen Bein zu erreichen (siehe Abbildung 55). In die äußeren Ecken der Segmente waren jetzt Stahlkabel eingebracht, die die Durchbiegung des Beinprüfkörpers bei einem Test begrenzen und so eine Beschädigung vor allem der Knochenelemente verhinderten.

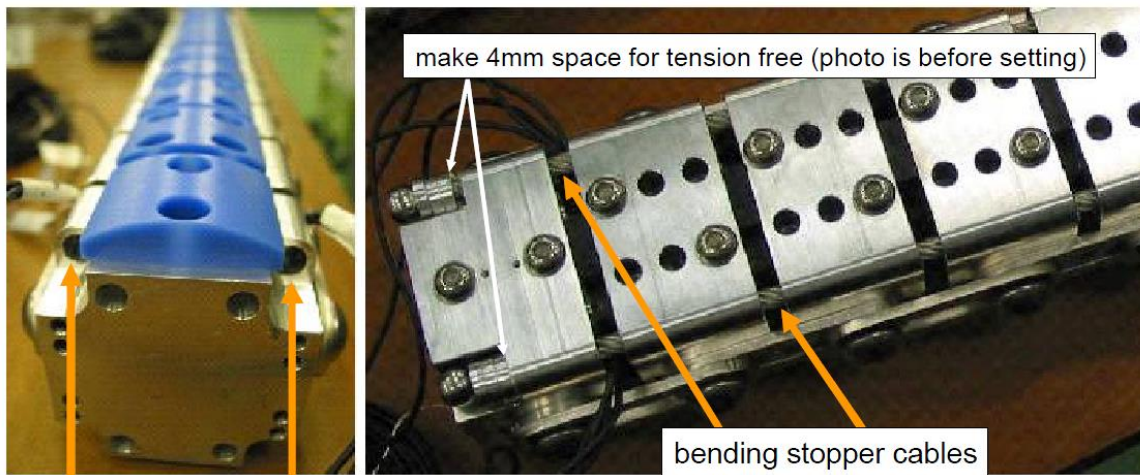


Abb. 55: Neuer, mehr eckiger Querschnitt des FlexPLI Version G mit den Kabeln, die die Biegung des Prüfkörpers beim Test begrenzen (Konosu 2005, S 8)

Der grundlegende Aufbau des FlexPLI war in der Version G weiter beibehalten worden (siehe Abbildung 56). Die Abmessungen entsprachen immer noch denen des (amerikanischen) 50-Perzentil-Mannes (vgl. Konosu 2005, S. 4f.). Auch die Position aller Messstellen war nicht verändert worden. Ansonsten gab es Detailänderungen, vor allem um die Haltbarkeit sowie die Biofidelität zu verbessern.

Neu war auch ein Zertifizierungstest für den Prüfkörper: Dieser wurde an einem Gestell aufgehängt und der Prüfkörper wurde dann aus einem Winkel von 15° über der Horizontalen gegen das Gestell fallengelassen. So konnte ermittelt werden, ob

⁵⁷ Technische Bewertungsgruppe

alle Messkanäle ein ordnungsgemäßes Signal lieferten. Last but not least wurden eine Anschlagabstützung sowie Hinweise für die Testdurchführung vorgestellt – verbunden mit der Einladung an andere Labore, den Prüfkörper auch zu testen.

Weniger als ein Jahr später präsentierte Konosu bereits den Prototypen der Version GT des FlexPLI, zur möglichen Unterscheidung von nachfolgenden Baumustern GT α genannt (siehe Abbildung 56). Auch hier gab es wieder zahlreiche Detailänderungen, vor allem war der Prüfkörper durch eine veränderte Materialauswahl etwas leichter geworden. Durch die Verwendung höherer Kunststoffelemente auf der Anstoßseite wurde nun eine fast ebene Anstoßfläche erzeugt, verlängerte Federn, die die Stahlseile im Knie fixierten, erlaubten einen größeren Biegewinkel, veränderte Knochenelemente setzten die Biegesteifigkeit etwas herab, so dass eine verbesserte Vorhersagemöglichkeit für Verletzungsrisiken erwartet wurde (vgl. Konosu 2006).

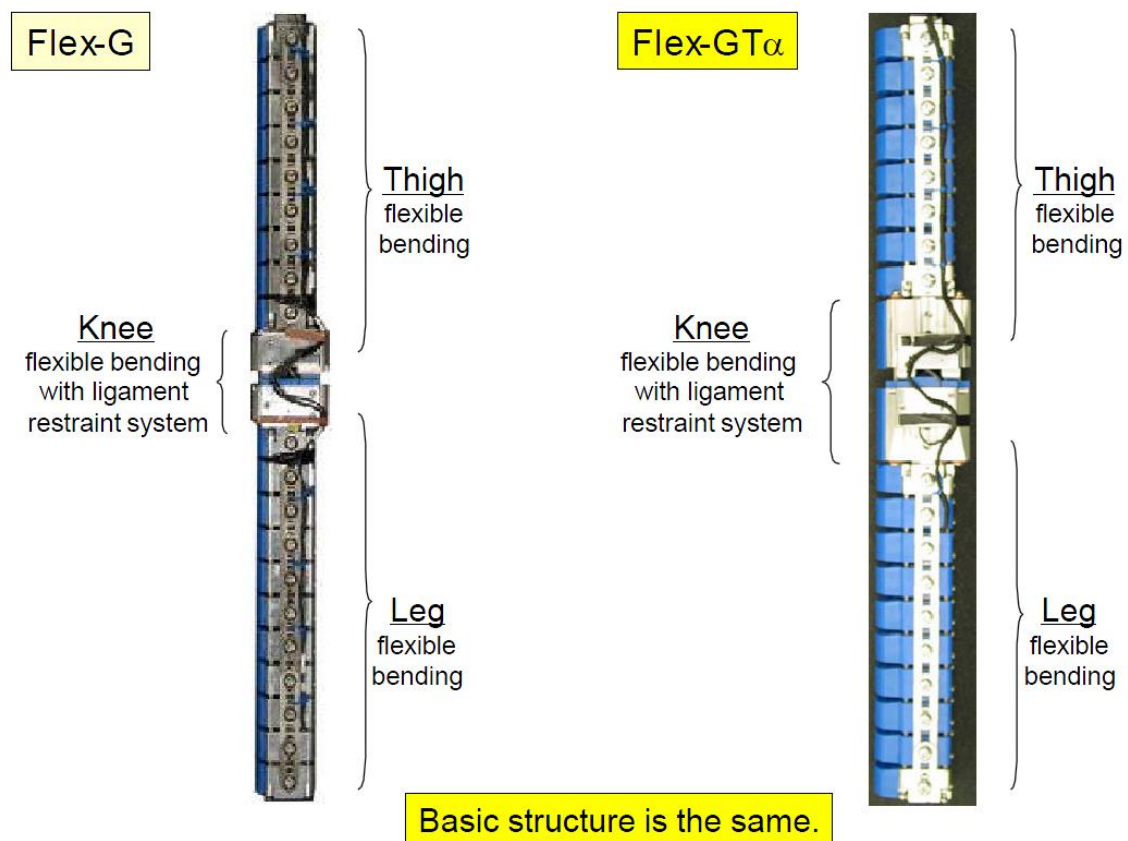


Abb. 56: Die Versionen G und GT α des FlexPLI (Konosu 2006, S. 4)

Konosu zeigte auch erste Testergebnisse von vier Beinprüfkörpern der Version GT α , die dann auch anderen Laboren zum Testen zur Verfügung gestellt wurden.

Etwa ein Jahr nach der Prototypenversion wurde eine Serienversion des FlexPLI GT präsentiert. Äußerlich waren beide kaum voneinander zu unterscheiden, außer dass

die äußerste Neoprenhaut jetzt einteilig ausgeführt war. Die Außenhautteile hatten sich bei Tests mit den Prototypen vor allem im Kniebereich immer wieder verschoben, so dass der Kniebereich nicht mehr abgedeckt war. Außerdem verbesserte das die Handhabung des FlexPLI. Konosu, Issiki und Suzuki erläuterten, dass der wesentliche Unterschied zwischen beiden Prüfkörperversionen jedoch darin bestand, dass für die Serienversion das Material der Knochenelemente rundum bearbeitet wurde, während es bei der Prototypenversion nur von 3 Seiten bearbeitet worden war (vgl. Konosu/Issiki/Suzuki 2007). In den mündlichen Erklärungen wurde erläutert, dass das Material aus einem größeren GFK-Block herausgearbeitet wurde. Für die Prototypen hatte man ohne Bedenken Material aus den Randbereichen verwendet. Dessen Oberfläche war auf der unbearbeiteten Seite jedoch durch den Herstellungsprozess verglast, weshalb man sich für die Serienversion für eine Rundumbearbeitung entschieden hatte. Gleichzeitig wurde die Dicke des Knochenmaterials geringfügig verringert. So erzeugte man ein Knochenmaterial mit noch besser definierten Eigenschaften, dessen Verformungseigenschaften aber nahezu identisch mit dem der Prototypenversion waren. Gehring erläuterte diese Details noch einmal näher auf der Basis von Informationen von Konosu, die bilateral ausgetauscht worden waren (vgl. Gehring 2007, S. 11ff.).

Im Labor der BASt wurden durch die Firma BGS Böhme und Gehring Tests mit den Versionen GT α und GT des FlexPLI durchgeführt, über die Gehring berichtete (vgl. Gehring 2007). Fahrzeugtests sollten erste Aussagen zur Erfüllbarkeit der vorgeschlagenen Testanforderungen sowie zur Handhabbarkeit der Prüfkörper liefern. Gehring berichtete über zahlreiche kleinere Probleme, die vor allem das Prüfkörperdesign sowie die Handhabung betreffen. In der Summe bescheinigte Gehring dem Prüfkörper jedoch, ein robustes Testwerkzeug zu sein und eine gute Handhabbarkeit zu besitzen, die mit der des EEVC LFI vergleichbar war. Aus den Ergebnissen der Fahrzeugtests leitete Gehring ab, dass Fahrzeuge die damals diskutierten Anforderungen für das FlexPLI prinzipiell erfüllen könnten und dass die Designelemente, die für die Erfüllung der Vorgaben für den EEVC-Beinprüfkörper entwickelt worden waren, auch bei der Erfüllung der Vorgaben für das FlexPLI hilfreich sein würden.

Bereits im Dezember 2007 stellte Been dann das erste Konzept für die finale Version des FlexPLI, die Version GTR⁵⁸ vor (vgl. Been 2007). Die Entwicklungsverantwortung war inzwischen von JARI als einem Forschungsinstitut an die Firma First Technology Safety Systems (FTSS), einen Dummyhersteller, übertragen worden, und Been erläuterte, dass eine der wesentlichen Aufgaben jetzt darin gesehen wurde, den Prüfkörper endgültig für einen serienmäßigen Einsatz in unterschiedlichen Laborumgebungen vorzubereiten. Innerhalb eines Jahres sollten erste Prototypen verfügbar sein. Als eine der wesentlichen Schwächen des FlexPLI hatte FTSS ausgemacht, dass der Prüfkörper um asymmetrisches Design aufwies: Das FlexPLI war als Abbild eines rechten menschlichen Beines ausgelegt (siehe Abbildung 57).

⁵⁸ Vereinfachend wird auch oft die Bezeichnung Flex-GTR verwendet; Anm. d. Verf.

Been verwies unter anderem auf den ACEA, dessen Mitglieder bei ersten Tests mit den vorherigen Versionen des FlexPLI auf der rechten bzw. der linken Seite eines Fahrzeuges unterschiedliche Testergebnisse für die Kreuzbänder im Knie festgestellt hatten.

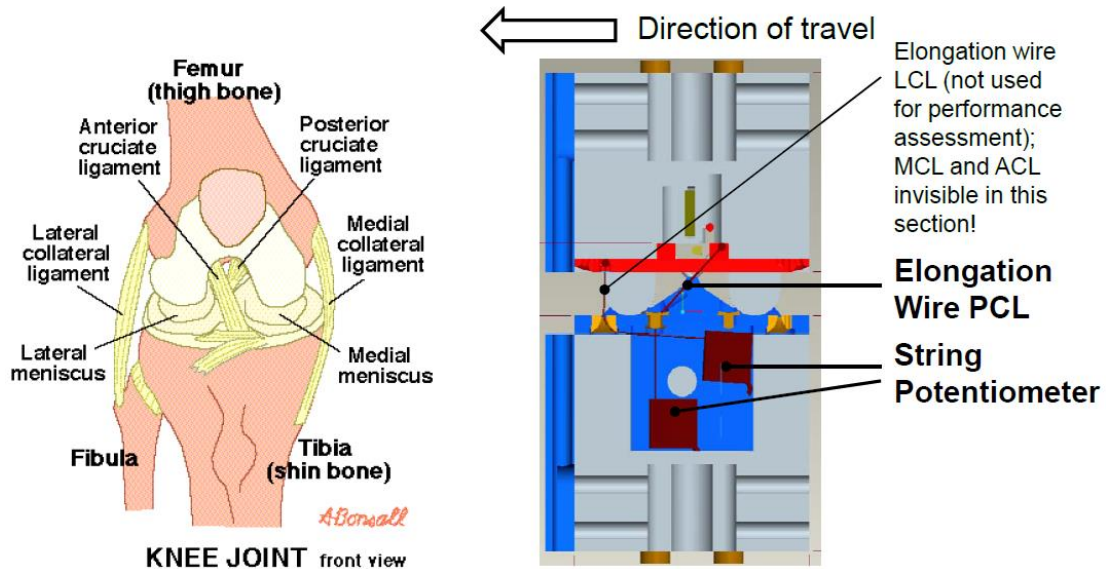


Abb. 57: Vergleich des Kniegelenkes für ein rechtes menschliches Bein mit dem Außenband (englisch: Lateral Collateral Ligament – LCL), dem Innenband (englisch: Medial Collateral Ligament – MCL) sowie dem vorderen Kreuzband (englisch: Anterior Cruciate Ligament – ACL) und hinteren Kreuzband (englisch: Posterior Cruciate Ligament – PCL) mit dem Aufbau des Knieelements des FlexPLI Version GTR (MedicineNet.com 2011 (links) sowie Been 2008 (rechts), zit.n. Kinsky/Friesen/Buenger 2011, S. 3)

Um dieses Problem zu lösen, schlug Been vor, die Fadenpotentiometer für die Aufnahme der Längenänderungen der Kniebänder möglichst nah an der vertikalen Mittelebene des Knies zu positionieren, die der Testrichtung des Prüfkörpers entspricht (vgl. Been 2007, S. 21ff.). Das Fadenpotentiometer für das Außen- sowie das Innenband (LCL und MCL) wurden auf der vertikalen Mittelebene des Knieelementes positioniert, die beiden Fadenpotentiometer für die Kreuzbänder ganz nah rechts bzw. links davon, um eine ungehinderte Bewegung beizubehalten. Außerdem wurden die Stahlseile, die die eigentliche Bewegung der Kreuzbänder im Knie simulieren, auf beiden Seiten des Knies angebracht (siehe Abbildung 58). Zwar war damit noch kein exakt symmetrisches Kniedesign zu erreichen, allerdings konnten so vernachlässigbare Abweichungen erwartet werden. Auch der Verfasser und seine Kollegen wiesen später darauf hin, dass diese Änderung dringend notwendig war, damit ein einzelner Prüfkörper für die Beinprüfkörpertests verwendet werden konnte und nicht ein rechter und ein linker Beinprüfkörper notwendig waren (vgl. Kinsky/Friesen/Buenger 2011, S. 3).

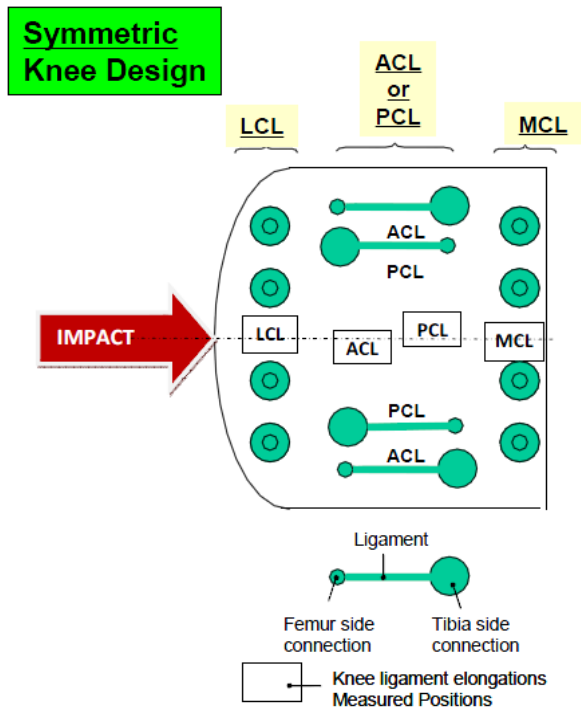


Abb. 58:
Anordnung der Stahlseile, die die menschlichen Kniebänder simulieren, sowie der dazugehörigen Fadenpotentiometer im Knieelement des FlexPLI Version GTR (Konosu u.a. 2011, S. 11)

Als eine weitere wesentliche Änderung schlug Been außerdem vor, neben dem verkabelten Datenerfassungssystem auch ein bordeigenes vorzusehen. So sollte die von verschiedenen Laboren kritisierte schwierige Handhabung des Kabelstranges beim Testen entfallen (vgl. Been 2007, S. 25 ff.).

Detailliertere Ausarbeitungen zum Konzept der Version GTR des FlexPLI stellte Been dann im Frühjahr 2008 vor (vgl. Been 2008). Neben den bereits beschriebenen Konzeptideen für zukünftige Änderungen wurde erstmals auch ein genauer Plan der möglichen Messsensoren vorgestellt. Es wurde vorgesehen, das FlexPLI mit bis zu 44 Sensoren auszustatten, wobei ein Teil dieser Sensoren speziell für Forschungszwecke im jeweiligen Labor zur Verfügung stehen sollte. Die Abbildung 59 zeigt den genauen Plan der vorgesehenen Sensoren.

Darüber hinaus sah Been zahlreiche kleinere Änderungen an den Bauteilen vor: Materialänderungen sowie Geometrieänderungen der einzelnen Bauteile, aber auch andere technische Lösungen. Verfügbar sollten die ersten Prototypen des neuen Prüfkörpers bis Ende des Jahres 2008 sein (vgl. Been 2008, S. 35). Bis dahin wurden durch Been und auch andere Teilnehmer noch zahlreiche kleinere und größere Änderungswünsche in die Diskussionen der TEG eingebracht. Besonders hervorzuheben sind dabei die Aktivitäten der BAST mit ihrem Laborbetreiber BGS Böhme und Gehring, die ab der Version GT α alle Versionen des FlexPLI testeten und ihre umfangreichen Erfahrungen in die Diskussionen einbrachten.

Channel	Purpose	Standard	Option	DAS
Femur moment 1, 2 and 3	Calibration	3	0	Standard option i-dummy
Tibia moment 1, 2, 3 and 4	Injury	4	0	
Tibia top acceln ax	Calibration	1	-1	
MCL elongation	Injury	1	0	
ACL elongation	Calibration	1	0	
PCL elongation	Calibration	1	0	
LCL elongation	Calibration	1	0	
Femur top acceln ax, ay, az	Motion	0	3	Lab
Femur bottom acceln ax, ay, az	Motion	0	3	Lab and optional i-dummy if feasible
Tibia top acceln ax, ay, az	Motion	0	3	
Tibia angular rate $\omega_x, \omega_y, \omega_z$	Motion	0	3	
Femur angular rate $\omega_x, \omega_y, \omega_z$	Motion	0	3	
Tibia bottom acceln ax, ay, az	Motion	0	3	Lab
Segment acceln ax	Research	0	15	Lab
Total			12	32

Abb. 59: Gesamtüberblick über die standardmäßig sowie die wahlweise vorhandenen Messsensoren im FlexPLI (Been 2008, S. 4). Der Prüfkörperhersteller FTSS plante allerdings nur für einen Teil der möglichen Sensoren die Berücksichtigung im Datenerfassungssystem, für alle anderen Sensoren sollte das jeweilige Labor selbst entsprechende Lösungen erarbeiten.

Über die abschließende Entwicklung der Prototypen des FlexPLI Version GTR berichteten Been sowie die japanischen Vertreter in der TEG bereits Ende 2008 (vgl. Been u.a. 2008), die japanischen Vertreter stellten auch die Ergebnisse erster Tests mit den ersten drei verfügbaren Prototypen vor. Die endgültige Version der japanischen Präsentation wurde aber erst Mitte 2009 zur Verfügung gestellt (vgl. o.N. 2009).

Been und Kollegen berichteten vor allem über den jeweiligen Ausrüstungsstand der drei Prototypen – es wurden unterschiedliche Datenerfassungssysteme verwendet – sowie über die Kalibrierung der einzelnen Prüfkörperkomponenten. Auch der als „dynamische Kalibrierung“⁵⁹ bezeichnete Zertifizierungstest für den

⁵⁹ Für den Test mit dem zusammengebauten Prüfkörper ist die Bezeichnung „Kalibrierung“ nach Ansicht des Verfassers unzutreffend: Es werden keine Messabweichungen bzw. Messunsicherheiten ermittelt, sondern es wird überprüft, ob der der Prüfkörper innerhalb vorgegebener Toleranzen arbeitet. Der Test ist also eher eine Zertifizierung.

zusammengebauten Prüfkörper wurde noch einmal überarbeitet und die ordnungsgemäße Funktion der Prototypen wurde überprüft. (vgl. Been u.a. 2008). JAMA und JARI erläuterten in den Anhängen zu dem Dokument, dass für zukünftige Anwendungen ein geändertes, höher beanspruchbares Knochenmaterial zur Verfügung stehen würde (vgl. Been u.a. 2008, S. 34ff.) sowie wie der geänderte Zertifizierungstest für das zusammengebaute FlexPLI – mit Hilfe von Simulationen – entwickelt worden war (vgl. Been u.a. 2009, S. 49ff.).

Die drei Prototypen mit den Bezeichnungen SN (für Serial Number⁶⁰) 01 bis 03 wurden kurz nach ihrer Vorstellung den an den Diskussionen beteiligten Parteien zur Verfügung gestellt, um Erfahrungen mit dem FlexPLI Version GTR sammeln zu können und mit diesen Erfahrungen zur Arbeit der TEG und besonders zur endgültigen Fertigstellung des Testverfahrens mit dem FlexPLI beitragen zu können. In diese Aktivitäten war der Verfasser aktiv eingebunden. Die Abbildung 60 zeigt ein Foto der drei Prototypen des FlexPLI Version GTR, die Abbildung 61 eine Zeichnung des endgültigen Prüfkörpers.

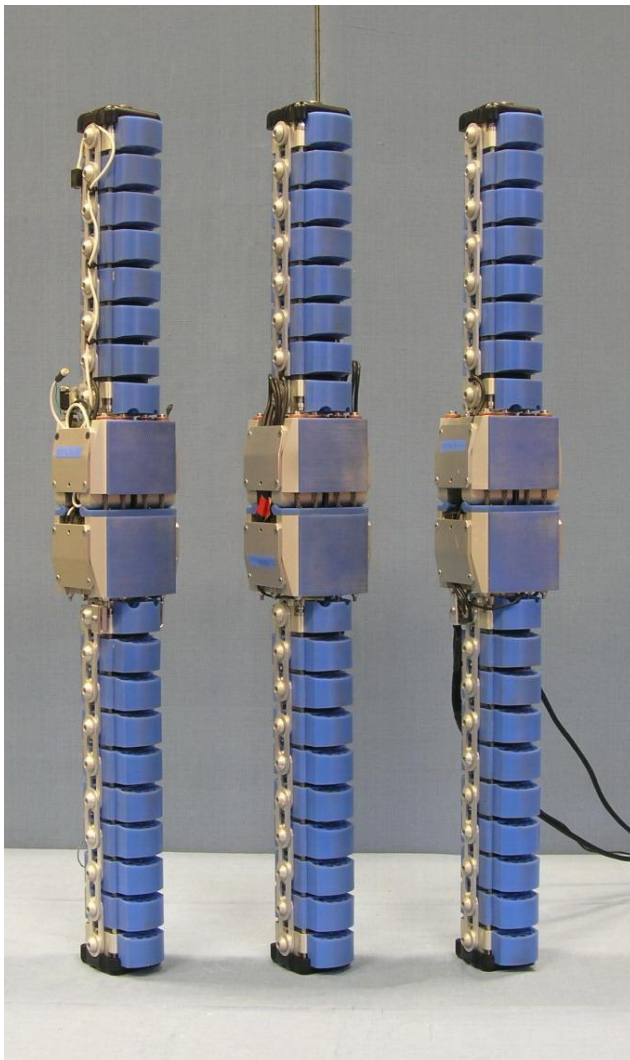


Abb. 60:
Die drei Prototypen der Version GTR des FlexPLI: Blick auf die stoßzugewandte Seite. Anhand der unterschiedlichen Verkabelungen ist erkennbar, dass die Prüfkörper zu Erprobungszwecken mit verschiedenen Datenerfassungssystemen ausgerüstet waren: Die Prototypen SN02 und SN03 hatten erstmals ein (jeweils unterschiedliches) bordeigenes System. (Foto: BGS Böhme und Gehring; Verwendung mit deren freundlicher Genehmigung)

⁶⁰ Seriennummer

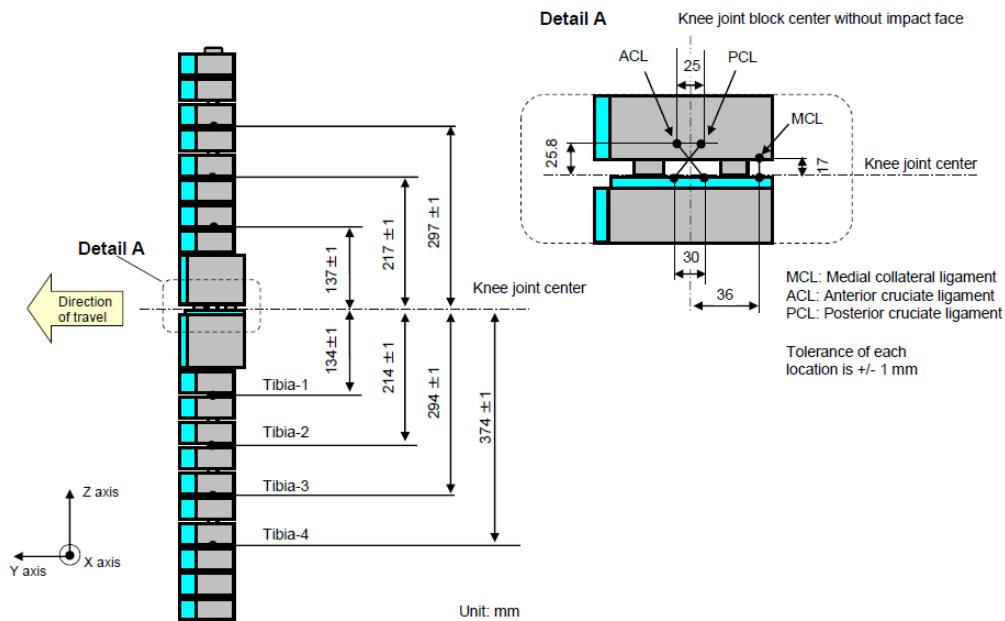


Abb. 61: Zeichnung des endgültigen Aufbaus des FlexPLI mit der Lage der Messsensoren (vgl. UNECE 2014)

3.3.2. Testen mit dem FlexPLI Version GTR

Bereits im Frühjahr konnte der Verfasser als erster europäischer Industrievertreter detailliert über erste Testerfahrungen mit dem FlexPLI Version GTR berichten (vgl. Kinsky 2009a). Zwar musste eine geplante Testserie leider vorzeitig beendet werden, da der getestete Prüfkörper SN01 beim Testen beschädigt worden war⁶¹, doch waren erste Aussagen zum Umgang mit dem Prüfkörper möglich. Außerdem konnte als wichtigstes Ergebnis festgehalten werden, dass Fahrzeuge, die mit dem EEVC-Prüfkörper sehr gute Bewertungsergebnisse in Verbraucherschutztests erreichten, beim Testen mit dem neuen Prüfkörper – zumindest in den untersuchten Fällen – noch verhältnismäßig schlecht abschnitten (siehe Abbildung 62). Allerdings muss man dabei berücksichtigen, dass die damals vorgeschlagenen Prüfkörper-Grenzwerte noch vorläufig waren und somit noch keine endgültige Aussage möglich war.

Festgestellt wurde aber auch, dass ein kurzfristiger Einsatz des FlexPLI als Testwerkzeug in den gesetzlichen Vorschriften, wie er eigentlich von japanischer Regierungsseite gewünscht war und von der japanischen Industrie akzeptiert wurde, noch länger nicht möglich erschien. Neben den fehlenden Erfahrungen zur

⁶¹ Der Prüfkörper war mit einem verkabelten Datenerfassungssystem ausgestattet. Der entsprechend notwendige Kabelstrang zwischen Prüfkörper und Datenerfassungssystem blieb nach dem Beschleunigen des Prüfkörpers auf dem Prüfstand jedoch am Prüfstand hängen. Die dabei entstandenen Beschädigungen, vor allem an den Steckverbindungen des Datenerfassungssystems, ließen sich kurzfristig nicht beheben; Anm. d. Verf.

technischen Umsetzbarkeit der Anforderungen in der Fahrzeugentwicklung sowie beim Fahrzeugdesign bemängelte der Verfasser vor allem die noch fehlende Dokumentation (Bedienungsanleitung, Reparaturanleitungen etc.) zum Prüfkörper sowie fehlende Langzeiterfahrungen hinsichtlich des Verschleiß- sowie des Alterungsverhaltens (vgl. Kinsky 2009a, S. 6).

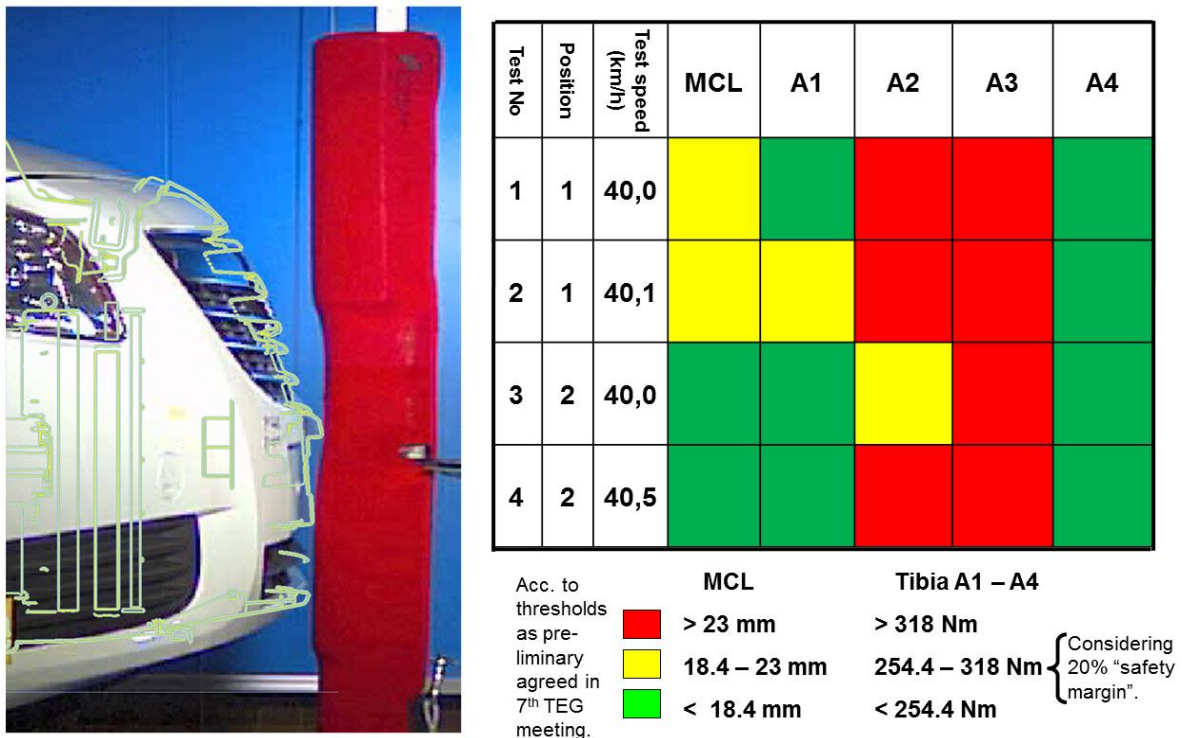


Abb: 62: Erste Testergebnisse mit der Version GTR des FlexPLI ermöglichten Aussagen zur Erfüllung der – damals noch nicht endgültig vereinbarten – Prüfkörper-Grenzwerte (Kinsky 2009a, S. 4) sowie zu weiteren notwendigen Schritten in der Prüfkörperbewertung.

Auch Leßmann und Gehring sowie die japanischen und die europäischen Automobilhersteller berichteten bei der gleichen Gelegenheit über Testserfahrungen mit den Flex-GTR-Prototypen.

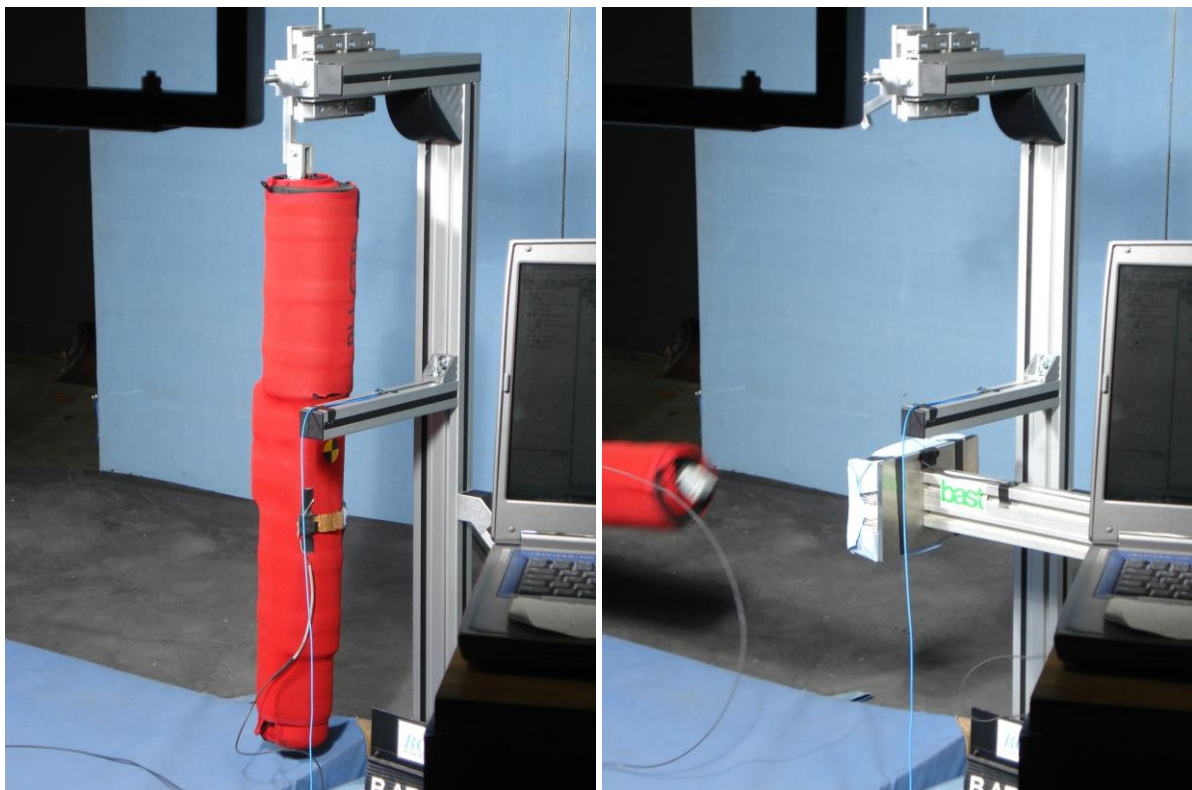
Die japanischen Hersteller sahen generell wenige Probleme für das Testen mit einem der Prototypen des FlexPLI (vgl. JAMA/JARI 2009). Sie bescheinigten dem Prüfkörper, dass die Wiederholbarkeit von Testergebnissen⁶² im Wesentlichen gut bis akzeptabel war – sowohl bei Fahrzeugtests als auch bei den Zertifizierungstests, bei denen der Prüfkörper wie ein Pendel gegen eine Anschlagfläche fallengelassen wurde (siehe Abbildung 63) – und hatten keine negativen Erfahrungen mit der Handhabbarkeit und der Haltbarkeit des Prüfkörpers gemacht.

⁶² Gemeint ist hier die Wiederholung von Tests auf dem gleichen Prüfstand und mit gleichen Umgebungsbedingungen, die zu gleichen Testergebnissen führen; Anm. d: Verf.



Abb. 63:
 Dynamische Kalibrierung des FlexPLI wie vom Hersteller vorgeschlagen (Been u.a. 2009, S. 12): Der Prüfkörper wird – kopf-
 über hängend und mit einem Gewicht beschwert – aus einem Winkel von 15°
 über der Horizontalen gegen ein Gestell fallen gelassen. Die aufgezeichneten
 Messsignale werden anschließend mit Sollwerten verglichen. Die Methode wird
 – zur Abgrenzung von der alternativen
 Methode, die in der Abbildung 62 gezeigt
 wird – auch als „Pendelzertifizierung“
 bezeichnet.

Abb. 64: Der als „Inverse Zertifizierung“ bezeichnete Test, bei dem der Prüfkörper
 in einem Gestell hängt (links) und dann von einem Stempel angestoßen
 wird (rechts), auf dessen Stoßfläche sich eine Crash-Wabenstruktur
 befindet (Fotos: Verfasser, mit freundlicher Genehmigung der Firma BGS
 Böhme und Gehring).



Leßmann und Gehring zeigten ebenfalls Testergebnisse von allen drei Prüfkörpern: von inversen Zertifizierungstests (siehe Abbildung 64), bei denen der Prüfkörper in einem Gestell hing und von einer Wabenstruktur angestoßen wurde, sowie von Fahrzeugtests (vgl. Leßmann/Gehring 2009). Bei den inversen Tests stellten Leßmann und Gehring ebenfalls eine gute bis akzeptable Wiederholbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Testergebnisse fest, allerdings waren sämtliche Messergebnisse – außer für das ACL – deutlich höher als bei Tests mit früheren Versionen des FlexPLI. Für die Fahrzeugtests wurde die Testwiederholbarkeit noch nicht gesehen, außerdem wurde immer noch ein deutlich unsymmetrisches Verhalten des verwendeten Prüfkörpers bemängelt. Die Zuverlässigkeit der Prüfkörper wurde mit gut bewertet, obwohl innerhalb von 40 Tests zwei Reparaturen⁶³ notwendig waren. Zu den Themen Handhabung und Haltbarkeit der Prüfkörper sowie zum Wartungsverhalten wollten sich Leßmann und Gehring noch nicht äußern. Allerdings waren zwei wesentliche Schwächen des Prüfkörpers schon angemerkt worden: Bei den Fahrzeugtests hatte man gemerkt, dass bei einem Fahrzeug die Biegebelastungswerte für das Schienbein davon abhingen, ob die Gummilagen im Prüfkörper, die das menschliche Fleisch simulieren sollten und die ca. 130 – 140 mm über dem Prüfkörperfuß begannen, direkt getroffen oder knapp verfehlt wurden. Zur Lösung dieses Problems verwendete man ab diesem Zeitpunkt andere Gummilagen, die nun das Schienbein auf seiner vollen Länge abdeckten (siehe Abbildungen 65 und 66).



Abb. 65 und 66:
Ursprüngliche Fleischsimulation des FlexPLI Version GTR (links) sowie die als Folge der instabilen Testergebnisse geänderte Variante mit über die gesamte Länge des Prüfkörpers reichenden Gummilagen (rechts) (Leßmann/Gehring 2009, S. 23)



Außerdem hatten Leßmann und Gehring bei der Beschleunigung und dem Freiflug des FlexPLI deutliche Vibrationen verzeichnet, die durch eine Abstützung speziell des Knieelementes in der Anschubphase vermieden werden sollten. Über dieses Thema wird in dieser Arbeit noch detailliert berichtet werden.

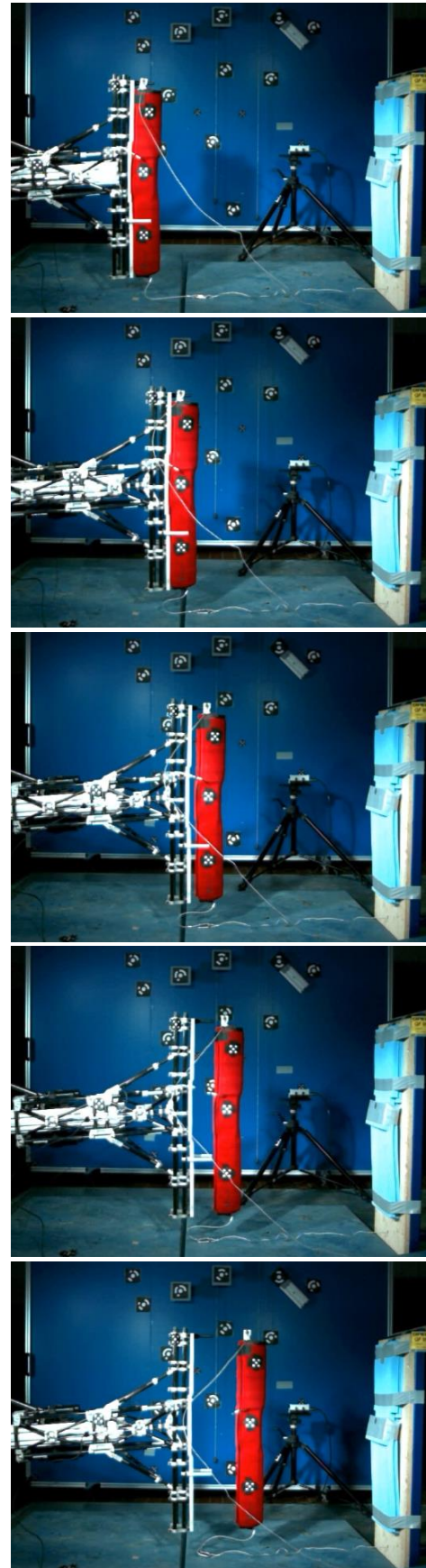
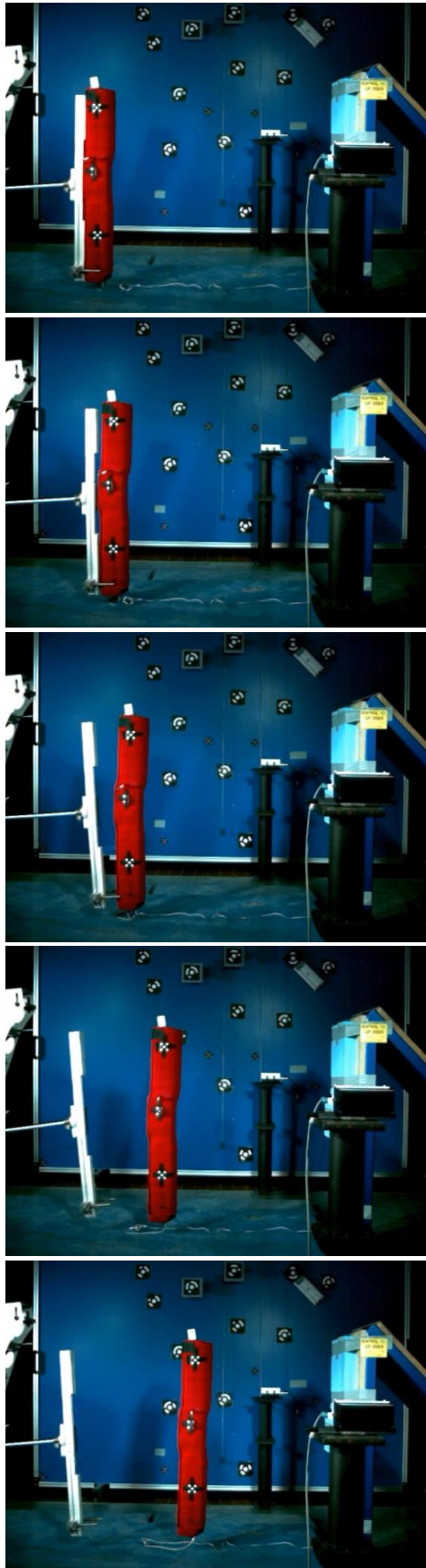
⁶³ Weder die Ursachen noch die Art der Beschädigungen wurden erwähnt. Beide sind aber vermutlich bei der Tatsache zu suchen, dass es sich um handgefertigte Prototypen handelte und es noch zu wenige Erfahrungen im Umgang mit den neuen Prüfkörpern gab; Anm. d. Verf.

Die europäischen Hersteller hatten noch nicht genügend Erfahrungen zusammengetragen, um eine gemeinsame detaillierte Bewertung zum FlexPLI Version GTR abgeben zu können. Allerdings wurde eine Liste von Punkten gezeigt, die aus vorhergehenden Tests mit der Version GT α sowie den ersten Tests mit der Version GTR noch offen waren und deren Lösung man innerhalb der Aktivitäten der TEG erwartete (vgl. ACEA 2009).

Wie bereits erwähnt, hatten Leßmann und Gehring deutliche Vibrationen des Prüfkörpers sowohl beim Beschleunigen als auch in der Freiflugphase bemerkt (vgl. Leßmann/Gehring 2009, S. 39). Auch bei den Tests, über die der Verfasser berichtet hatte (vgl. Kinsky 2009a), wurde dieses Problem wahrgenommen; deutliche, nicht vernachlässigbare Messwerte wurden bereits vor dem Aufprall des Prüfkörpers auf das zu testende Fahrzeug aufgezeichnet. Allerdings ergab es zu dieser Zeit keinen Sinn, das Problem näher zu untersuchen: Der Prüfkörper war geliehen, er stand nur für eine sehr begrenzte Zeit zur Verfügung und es war unklar, ob es weitere Änderungen an dem Prüfkörper geben würde und wenn ja welche.

Als dem Arbeitgeber des Verfassers ab 2010 ein eigener Prüfkörper zur Verfügung stand, konnte das Problem jedoch genauer untersucht werden. Leßmann und Gehring hatten in der Abstützung speziell des Knieelementes einen der wesentlichen Faktoren für einen stabilen Flug des FlexPLI gesehen. Der FlexPLI-Hersteller empfahl lediglich die Verwendung einer Abstützung in Form einer Anschubplatte, die die verschiedenen Anlageflächen auf der Rückseite des Prüfkörpers berücksichtigen sollte (vgl. Burleigh 2009, S. 9). Erste Tests mit einer solchen Anschubplatte zeigten jedoch, dass das Problem wesentlich komplexer war – vor allem auch durch die gewollte Verwendung eines existierenden Prüfstandes, der ursprünglich für das Testen mit dem EEVC-Prüfkörper optimiert worden war.

Zeugner, Kinsky und Sommer berichteten über Versuche mit einer Anschubplatte, die den Vorgaben des Prüfkörperherstellers entsprach, die jedoch das dynamische Verhalten der Prüfstandskomponenten nicht berücksichtigte (vgl. Zeugner/Kinsky/Sommer 2012). Vor allem die Tatsache, dass der Kolben des Prüfstandes für die Beschleunigung des Prüfkörpers einen relativ weiten Weg zurücklegte, sorgte für eine hohe Instabilität. Erst die Entwicklung einer als komplexes Tragwerk ausgelegten Anschubvorrichtung brachte zufriedenstellende Erfolge. Diese Anschubvorrichtung wurde dann auch nicht mehr auf der Kolbenstange befestigt, sondern auf dem Prüfstand, und wurde in der Anschubphase nur noch vorwärts transportiert. Damit ließ sich ein sehr stabiles Flugverhalten des Prüfkörpers erreichen, die Abbildung 67 vergleicht die beiden verschiedenen Lösungen.



[Abb. 67: Fortsetzung/Erläuterungen siehe nächste Seite]

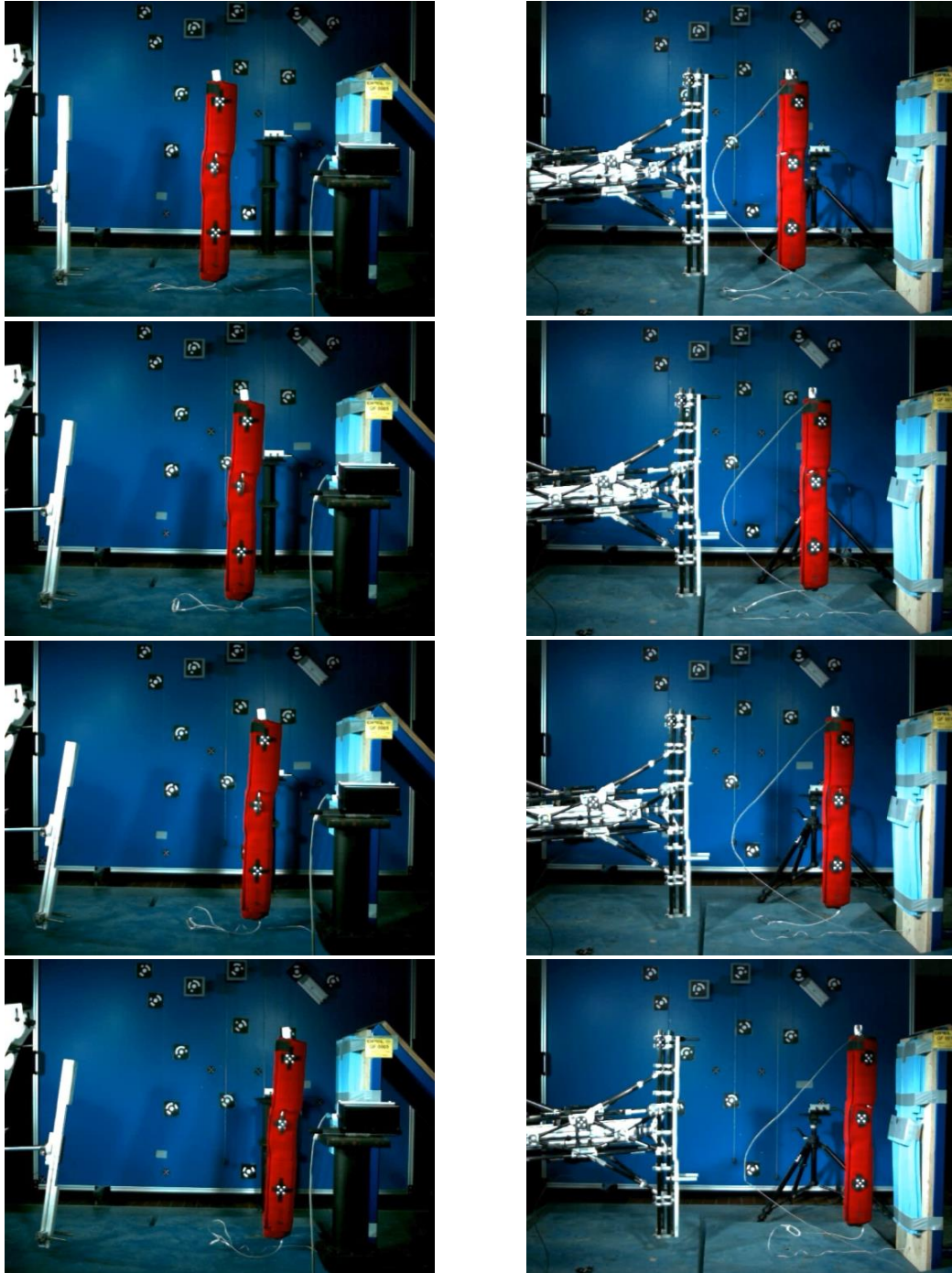


Abb. 67: Vergleich des Anschub- und des Freiflugverhaltens des FlexPLI mit der vom Prüfkörperhersteller empfohlenen Anschubplatte (links) sowie mit einer speziell entwickelten Anschubvorrichtung (rechts) (Zeugner/Kinsky/Sommer 2012, S. 4 und S. 8). Deutlich erkennbar ist, dass eine flächige Abstützung des Prüfkörpers in der Anschubphase nicht allein für ein stabiles Flugverhalten ausreicht.

Die Erfahrungen mit den Vibrationen des Prüfkörpers führten dazu, dass sowohl Leßmann und Gehring als auch Zeugner, Kinsky und Sommer das Problem weiter untersuchten. Unabhängig voneinander schlugen beide Gruppen in einer Sitzung der

Informellen Arbeitsgruppe der UNECE, die die zweite Phase der GTR Nr. 9 zur Fußgängersicherheit diskutierte, im Jahr 2013 vor, die maximalen Ausschläge der aufgezeichneten Messwerte vor dem Auftreffen des FlexPLI auf das zu testende Objekt zu bewerten. Nur wenn die Messwerte innerhalb eines bestimmten Korridors verliefen, sollte der Test gültig sein, da nur dann der Prüfkörper einen ausreichend stabilen Flug erreicht hatte.

Der Verfasser und seine Kollegen verglichen verschiedene ungünstige sowie günstige Messwert-Kurvenverläufe miteinander (vgl. Kinsky/Sommer/Hochgesand 2013). Daraus wurde abgeleitet, dass sowohl für die Biegemomente im Schienbein als auch für die Dehnungen der Kniebänder die Schwankungen der Messwerte in den letzten 30 Millisekunden vor dem Anprall auf ca. 5 % der – zu diesem Zeitpunkt dann schon vereinbarten – Prüfkörper-Grenzwerte begrenzt werden sollten (siehe Abbildung 68).

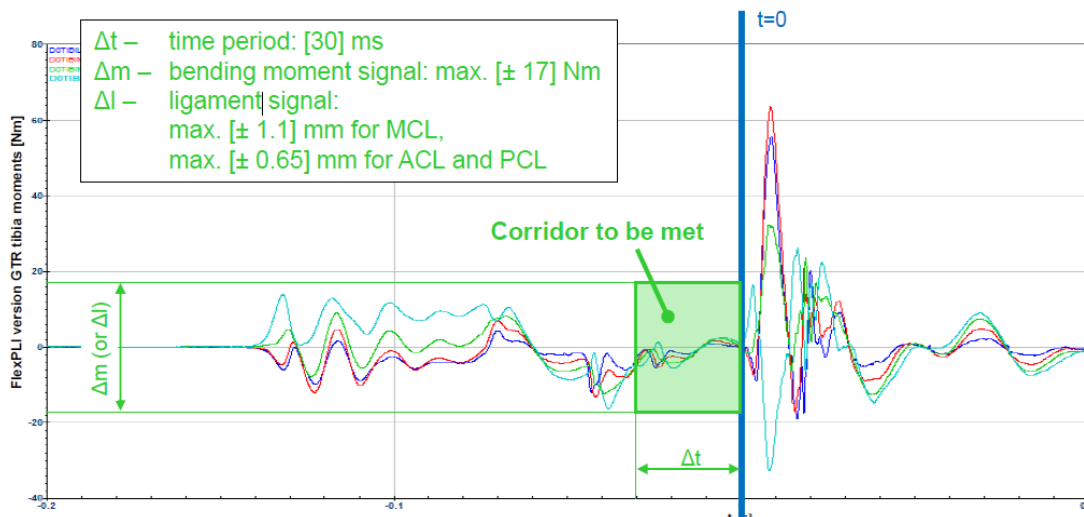


Abb. 68: Vorschlag zur Begrenzung der aufgezeichneten Messwerte während der letzten Millisekunden des Freifluges des FlexPLI (Kinsky/Sommer/Hochgesand 2013, S. 12)

Zander, Gehring und Leßmann hatten die zeitlichen Verlaufskurven der Messergebnisse von verschiedenen Tests miteinander verglichen und daraus auf die Amplitude der Schwingungen des Prüfkörpers vor dem Anprall geschlossen. Sie schlugen gleichfalls ein Zeitintervall von 30 ms vor, stellten aber fest, dass die Schwankungen der Kniebänder-Messwerte weniger kritisch seien (vgl. Zander/Gehring/Leßmann 2013). Für die Biegemomente wurde eine Begrenzung auf 15 Nm vorgeschlagen. Außerdem schlugen Zander, Gehring und Leßmann vor festzulegen, dass alle Messwerte bereits auf null gesetzt werden sollten, wenn der Prüfkörper vor Testbeginn frei in der Anschubvorrichtung hängt. In der Diskussion einigte man sich

für das Testverfahren auf den letzten Vorschlag mit einer Begrenzung der Biegemomente auf 15 Nm in den letzten 30 ms vor dem Anprall.

Vor Beginn regelmäßiger Tests war auch von Bedeutung, den Einfluss des instabilen Fluges auf die Genauigkeit der Geschwindigkeitsbestimmung im Auftreffpunkt des FlexPLI auf das Testobjekt zu untersuchen. Kinsky und Bünger berichteten, dass dafür fünf verschiedene Methoden zur Bestimmung der Geschwindigkeit in Betracht gezogen worden waren (vgl. Kinsky/Bünger 2013):

- 1) Die Ableitung der Auftreffgeschwindigkeit aus der Kolbengeschwindigkeit der Prüfanlage;
- 2) die Messung der Auftreffgeschwindigkeit mit Hilfe von Lichtschranken zu dem Zeitpunkt, wenn sich der Prüfkörper von der Anschubvorrichtung löst, bzw.
- 3) zum Zeitpunkt des Auftreffens auf dem Testobjekt;
- 4) die Verwendung des Signals eines Beschleunigungssensors im Prüfkörper sowie
- 5) die Berechnung der Auftreffgeschwindigkeit aus den Videoaufzeichnungen der Tests.

Methode 2) wurde sofort verworfen, da sie im Vergleich zur Methode 3) wenig Sinn ergab. Die anderen vier Methoden wurden bei verschiedenen Tests parallel zueinander verwendet. Dabei wurde festgestellt, dass jede Methode für sich Streuungen der Messwerte aufwies, aber auch im Vergleich der verschiedenen Methoden deutliche Schwankungen der gemessenen Geschwindigkeiten festzustellen waren. Alle Methoden zeigten Schwächen und keine konnte eindeutig als beste Methode identifiziert werden. Nach Abwägung aller möglichen Vor- und Nachteile entschied man sich für die Lösung 4), da einerseits der entsprechende Sensor im FlexPLI standardmäßig vorhanden ist und brauchbare Signale liefert, andererseits auf Grund der regelmäßigen Kalibrierung aller Sensoren des Prüfkörpers sichergestellt ist, dass das Messsignal mit dem Prüfkörper zur Verfügung steht. Allerdings bestätigte sich auch noch einmal, dass das Beschleunigungssignal nur bis zum Auftreffen auf das Testobjekt verwendbar war, da danach ein deutliches Signalrauschen eine saubere Auswertung der Messergebnisse verhinderte. Alternativ wurde vorgeschlagen, Lichtschranken wie in der Methode 3) beschrieben zu verwenden. Allerdings blieb hier offen, wo am Prüfkörper – also in welcher Höhe über dem Boden – die Lichtschranken die Geschwindigkeit messen sollten.

Untersuchungen zu der letzten Frage – Wo am Prüfkörper sollte man die Geschwindigkeit messen? – stellte Schmitt vor (vgl. Schmitt 2013b): Mit Hilfe photogrammetrischer Messungen hatte das durchführende Testlabor das Verhalten von sechs verschiedenen Messpunkten auf dem FlexPLI untersucht (siehe Abbildung 69). Die Auswertung der entsprechenden Messergebnisse zeigte, dass zwischen den einzelnen Messpunkten zwar Geschwindigkeitsunterschiede auftraten,

dass diese aber deutlich unterhalb der erlaubten Toleranz für die Testdurchführung lagen.

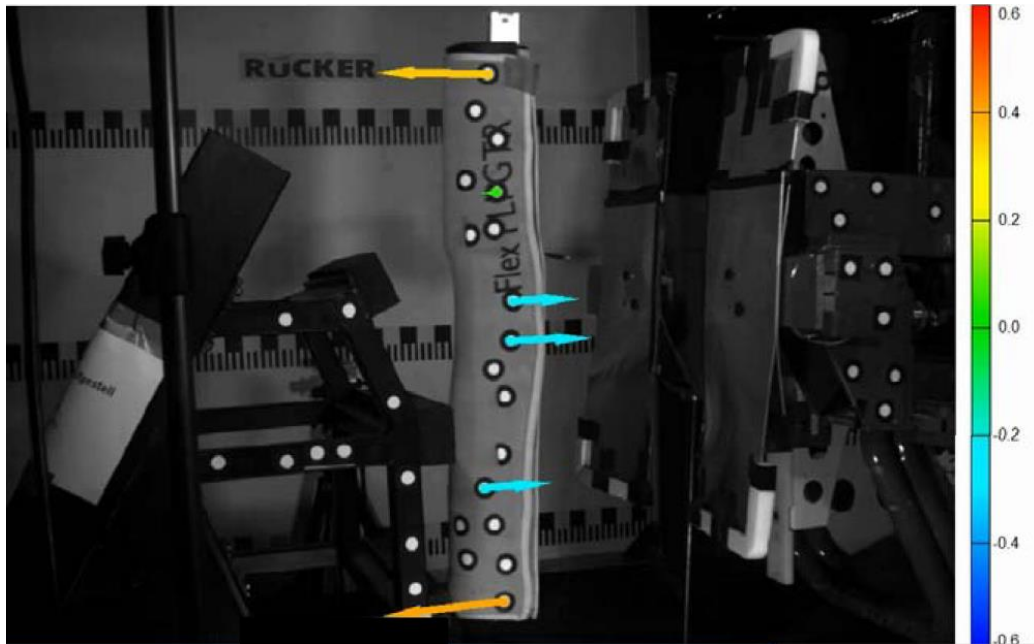


Abb. 69: Photogrammetrische Auswertung eines FlexPLI-Versuches (Schmitt 2013b, S. 5): Die Vektoren zeigen die Verformung des Prüfkörpers zum Zeitpunkt der Messung. Durch die Aufzeichnung über die gesamte Freiflugphase ließ sich für jeden der sechs Messpunkte die Geschwindigkeitsdifferenz im Auftreffpunkt berechnen. Da beim Lösen des Prüfkörpers aus der Anschubvorrichtung alle Messpunkte dieselbe Geschwindigkeit hatten, ließ sich hier sehr zuverlässig die Aussage treffen und belegen, dass die Geschwindigkeitsdifferenzen vernachlässigt werden können.

Nach Abwägung aller gezeigten Argumente zu den verschiedenen Methoden, wie die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung garantiert werden kann, waren sich zumindest die an der Diskussion dieses Themas im Verband der Automobilindustrie (VDA) beteiligten Experten einig, dass die Art der Geschwindigkeitsmessung nicht im Detail festgelegt werden muss. Jedes Labor kann bedenkenlos seine eigene Messmethode verwenden, ohne dass bei Tests in anderen Labors die Gefahr besteht, völlig andere Ergebnisse zu bekommen; die Schwankungen der Messwerte sollten im Rahmen des vom Labor festzulegenden Sicherheitsspielraumes abgedeckt sein.

Andere wichtige Themen, wie beispielsweise der Einfluss der Änderung solcher Parameter wie der Auftreffhöhe, der Auftreffgeschwindigkeit, der Rotation des Prüfkörpers um die eigene Hochachse etc., wurden im Rahmen gemeinsamer Projekte der Autoindustrie und der Bundesanstalt für Straßenwesen detailliert untersucht. Gehring berichtete im Detail über die Ergebnisse, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll (vgl. Gehring 2010).

3.3.3. Zertifizierung des FlexPLI

Im Kapitel 3.3.2 wurde bereits dargestellt, dass es für die Zertifizierung des FlexPLI zwei unterschiedliche Methoden gibt (vgl. Abbildungen 63 und 64, S. 74).

Bei der so genannten „Pendelzertifizierung“ hängt der Prüfkörper kopfüber in einem Gestell. An seiner Oberschenkelseite ist ein zusätzliches 5-kg-Gewicht befestigt. Aus einem Winkel von 15° über der Horizontalen wird das FlexPLI gegen einen Anschlag an dem Gestell fallengelassen. Dabei zeichnen alle Messkanäle ein Signal auf, das für Zertifizierungszwecke ausgewertet werden kann. Diese Methode wurde von Anfang an für die verschiedenen Entwicklungsstufen FlexPLI verwendet und mit dem Prüfkörper zusammen weiterentwickelt. Der große Vorteil dieser Methode ist, dass das durchführende Labor dafür keine Prüfanlage braucht und die Erfinder des FlexPLI somit unabhängig von irgendwelchen Prüfständen für dynamische Tests waren. Wie auch andere Experten tendiert der Verfasser allerdings zu der Meinung, dass die erzeugten zeitlichen Verlaufskurven für die Messwerte zwar die Aussage zulassen, dass ein Signal vorhanden ist, dass auf Grund des relativ gleichmäßigen Verlaufs aber keine aussagekräftigen Rückschlüsse auf die Güte des jeweiligen Messsignals möglich sind (vgl. Abbildung 68).

Bei der so genannten „Inversen Zertifizierung“ hängt der Prüfkörper an einem Gestell und wird mit einem linear geführten Prüfstempel angestoßen, auf dessen Stoßfläche eine verformbare Crash-Wabenstruktur angebracht ist. Die Position des Prüfkörpers entspricht dabei der Position vor einem Fahrzeugtest. Dieser Test wurde schon für die Zertifizierung des EEVC-Beinprüfkörpers verwendet (vgl. Siems u.a. 2007, S. 2) und hat den Vorteil, dass die aufgezeichneten Messsignale in ihrem zeitlichen Verlauf denen aus einem Fahrzeugtest gleichen (siehe Abbildung 70). Allerdings wird für den Test eine Schlittenprüfanlage benötigt.

Im Rahmen der Diskussionen zur Verwendung des FlexPLI in Verbraucherschutztests und für den Nachweis der Gesetzeserfüllung gab es umfangreiche Diskussionen, welcher der Tests der bessere und sinnvollere wäre. Wie bereits oben erwähnt, hatten beide Tests durchaus Vorteile. Am Ende der Diskussionen einigte man sich darauf, beide Tests in einem festgelegten Ablaufschema durchzuführen: Vor Beginn einer Testserie wird ein inverser Test durchgeführt, nach spätestens zehn Tests mit dem FlexPLI folgt dann ein Pendeltest, nach weiteren zehn Tests folgt ein weiterer Pendeltest, danach nach zehn Tests wieder ein inverser Test, dann nach jeweils zehn Tests wieder ein Pendeltest usw. So können Labore, die die inverse Zertifizierung nicht selbst durchführen, dreißigmal mit dem FlexPLI testen, bevor der Prüfkörper in einem anderen Labor invers zertifiziert werden muss. Diese Anzahl von Tests reicht in der Regel aus, um offizielle Testreihen – beispielweise für den Nachweis der Gesetzeserfüllung – abschließen zu können.

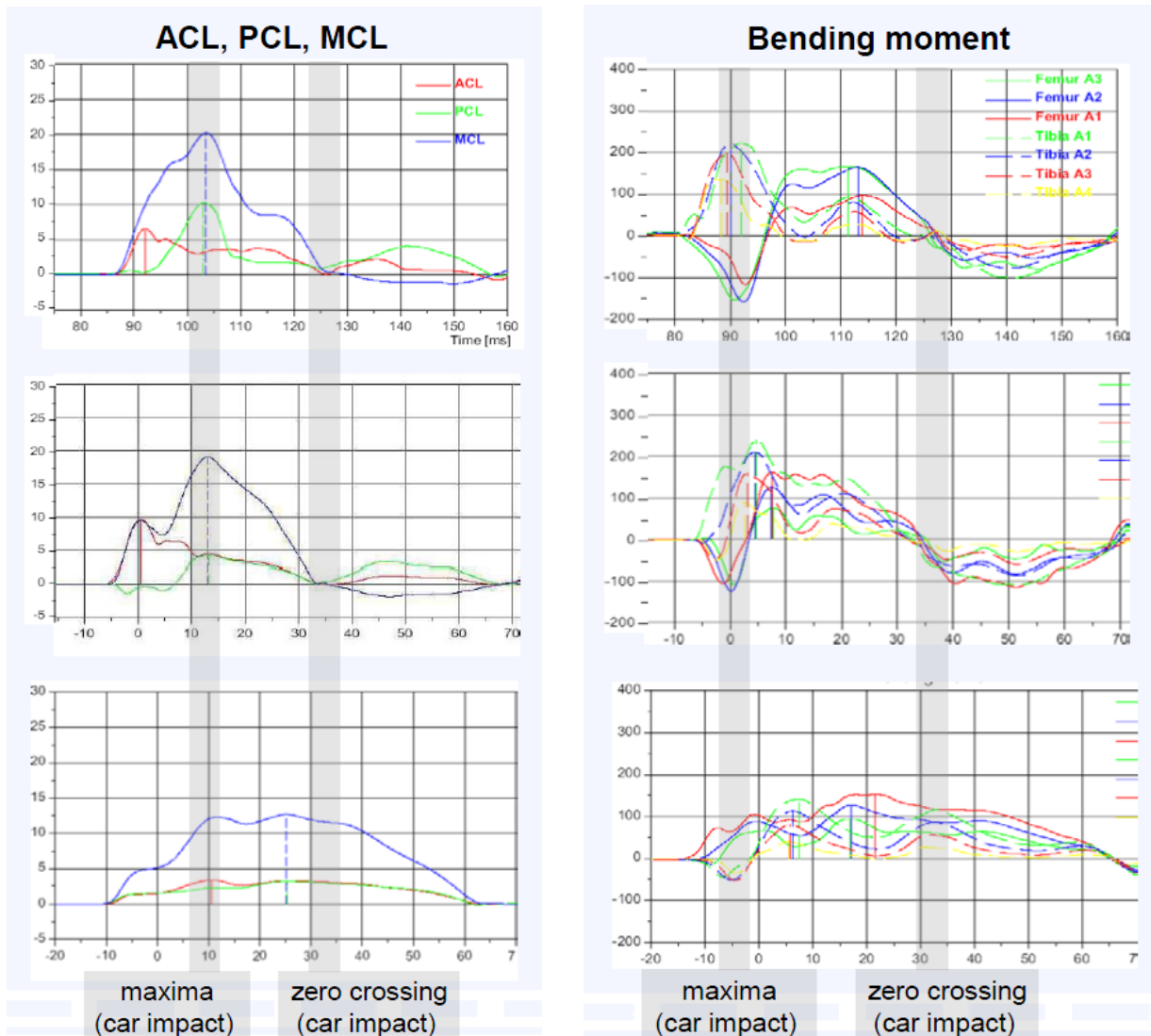


Abb. 70: Zeitliche Verläufe der Messwerte für die Kniebänder (links) und die Scheinbein-Biegemomente (rechts), aufgezeichnet in einem Fahrzeugtest (oben), bei der inversen Zertifizierung (Mitte) sowie bei der Pendelzertifizierung (unten). Die Ähnlichkeit der Signalverläufe bei dem Fahrzeugtest und der inversen Zertifizierung lassen eher Rückschlüsse auf die Güte der Messwerte zu (Kinsky 2011a, mit freundlicher Genehmigung der Firma BGS Böhme und Gehring).

Um die Zertifizierungen durchführen zu können, brauchte man allerdings zuerst Prüfkörper-Referenzwerte. Diese änderten sich zwangsläufig mit den verschiedenen Entwicklungsstufen des FlexPLI. Für die abschließende Diskussion zu dem Thema im Rahmen der Entwicklung der zweiten Phase der GTR Nr.9 zur Fußgängersicherheit wurde eine ad-hoc Arbeitsgruppe, die so genannte „Task Force on Review and Update of Certification Corridors“⁶⁴ (TF-RUCC), ins Leben gerufen,

⁶⁴ [Anm. d. Verf.: Ad-hoc] Arbeitsgruppe für die Bewertung und Verbesserung der Zertifizierungskorridore

die 2011/2012 aktiv war. In der Bestandsaufnahme stellte die Gruppe fest, dass vom Hersteller des FlexPLI zwischenzeitlich Änderungen sowohl am Prüfkörper als auch an den Komponentenzertifizierungstests umgesetzt worden waren. Als ein erster Schritt der Arbeit der ad-hoc Gruppe wurden daher drei Prüfkörper auf den letzten Baustand des FlexPLI gebracht. Diese Prüfkörper wurden verschiedenen Laboren zum Testen zur Verfügung gestellt.

Über die ersten Testergebnisse mit den drei speziell präparierten FlexPLIs, den so genannten „Master Legs“⁶⁵, berichtete Zander (vgl. Zander 2012) und leitete daraus Vorschläge für neue Zertifizierungskorridore für die beiden dynamischen Tests mit den zusammengesetzten Prüfkörpern ab.

Der Verfasser begleitete im Auftrag des Europäischen Automobilherstellerverbandes ACEA eine Testserie mit den zu diesem Zeitpunkt schon bei den Fahrzeugherstellern und ihren Zulieferern genutzten Prüfkörpern. Die Testserie sollte zeigen, ob bereits im Testbetrieb eingesetzte FlexPLIs die neuen Zertifizierungskorridore erfüllen konnten. Kolb berichtete gemeinsam mit seinen Kollegen und dem Verfasser über diese Tests (vgl. Kolb u.a. 2012). Die Abbildung 71 zeigt ein Beispiel für die aufgezeichneten Ergebnisse. Daraus ließ sich erkennen, dass die neuen Korridore wesentlich besser dem Verhalten der Prüfkörper entsprachen. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass der FlexPLI-Hersteller Humanetics⁶⁶ bis zu diesem Zeitpunkt neue Prüfkörper zwar mit einem Zertifizierungsprotokoll auslieferte, dass dieses aber nach eigener Erfahrung des Verfassers nicht bedeutete, dass die Prüfkörper die Zertifizierungstests auch erfüllten. Bedenklich war dabei vor allem, dass die Kunden teilweise nicht auf diesen Umstand hingewiesen wurden.

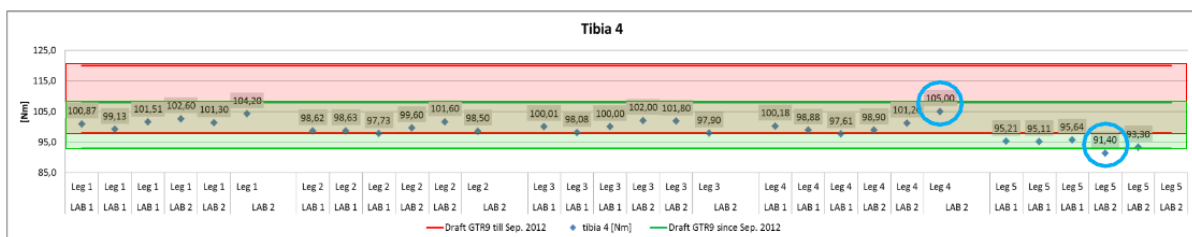


Abb. 71: Ein Beispiel für die mit fünf verschiedenen FlexPLI in zwei verschiedenen Testlaboren gemessenen Belastungswerte (hier an der untersten Messstelle des Schienbeins) bei den Zertifizierungstests (hier dem inversen Test) (Kolb u.a. 2012, S. 20). Erkennbar ist, dass der neue Zertifizierungskorridor (grün) besser zu den Messwerten passt als der alte (rot).

⁶⁵ Vorlagebeine/Originalbeine [gemeint sind speziell präparierte Prüfkörper, die als Referenzprüfkörper dienen; Anm. d. Verf.]

⁶⁶ Die Firma First Technology Safety Systems (FTSS), die die Fertigungsentwicklung des FlexPLI übernommen hatte, war inzwischen zusammen mit einem anderen Dummyhersteller in der Firma Humanetics aufgegangen; Anm. d. Verf.

Neben der Erkenntnis, dass jedes FlexPLI ein eigenes Testverhalten aufweist, offenbarten die Tests aber auch noch einmal eine der wesentlichsten Schwächen des neuen Beinprüfkörpers: Es gibt keinerlei Möglichkeit, das Verhalten des Prüfkörpers präzise einzustellen – also ein Feintuning vorzunehmen. Sollte ein Prüfkörper einen der Zertifizierungstests nicht erfüllen, wird der Test in der Realität heute einfach noch einmal durchgeführt. Das kann man entweder so lange wiederholen, bis man einen Test erfüllt und damit ein gültiges Zertifizierungsprotokoll bekommt, oder man muss den Prüfkörper zu einer Revision dem Hersteller übersenden. Dieser Umstand ist für ein Testwerkzeug hochgradig unbefriedigend. Außerdem wiesen Kolb und Kollegen darauf hin, dass Erfahrungen zum Langzeitverhalten des FlexPLI noch fehlen (vgl. Kolb u.a. 2012, S. 43). Der Untersuchung von letzterem hatte sich auch der Verfasser angenommen.

3.3.4. Design der Version GTR des FlexPLI

Wie bereits in dieser Arbeit berichtet, gab es eine ganze Anzahl von früheren Baustufen des FlexPLI (siehe Kapitel „3.3.1. Übersicht über die Entwicklungsschritte des FlexPLI“). Einer der wesentlichen Gründe für die jeweils nächste Baustufe war die Verbesserung des mechanischen Designs des Prüfkörpers, um die Haltbarkeit sowie die Handhabung im Testbetrieb zu verbessern. Designschwächen lassen sich dementsprechend auch sehr gut am mechanischen Verschleiß des Prüfkörpers ablesen.

Der Verfasser untersuchte den Zustand eines der Prototypen der Version GTR des FlexPLI, um daraus mögliche Ansätze für eine Verbesserung des Prüfkörpers abzuleiten (vgl. Kinsky 2011b). Der Prototyp mit der Seriennummer SN02 war den im ACEA organisierten Herstellern über mehrere Jahre zu Versuchszwecken zur Verfügung gestellt worden. Zum Zeitpunkt der Untersuchung war der Prüfkörper nachweislich ca. 300 Mal in verschiedenen Prüflaboren getestet worden; zumindest einige dieser Labore testeten zum ersten Mal ein FlexPLI. Außerdem waren die Fahrzeuge, die evtl. mit dem Prüfkörper getestet worden waren, noch nicht für die Erfüllung irgendwelcher Belastungswerte mit dem FlexPLI optimiert (vgl. Kinsky 2011b, S. 2). Der Verfasser ging daher davon aus, dass die Behandlung des Prüfkörpers nicht immer mit der gewünschten Sorgfalt erfolgt war und dass durchaus auch Überlastungen im Testbetrieb vorgekommen waren. Insofern entsprach der tatsächliche Verschleiß- und Alterungszustand des Prüfkörpers sicherlich eher dem Zustand eines Prüfkörpers, der in einem einzelnen Prüflabor noch deutlich länger genutzt worden wäre.

Beim Zerlegen und einer visuellen Inspektion des Prüfkörpers wurden zahlreiche deutliche Schäden sichtbar. Die Abbildungen 72 bis 82 zeigen einige der Schadensbilder.



Abb. 72: Deutlich erkennbare Schäden an der Neopren-Außenhaut des FlexPLI, vermutlich verursacht durch das Einklemmen/Quetschen des Neopren zwischen dem Testobjekt und dem Knieelement (Kinsky 2011b, S. 4)

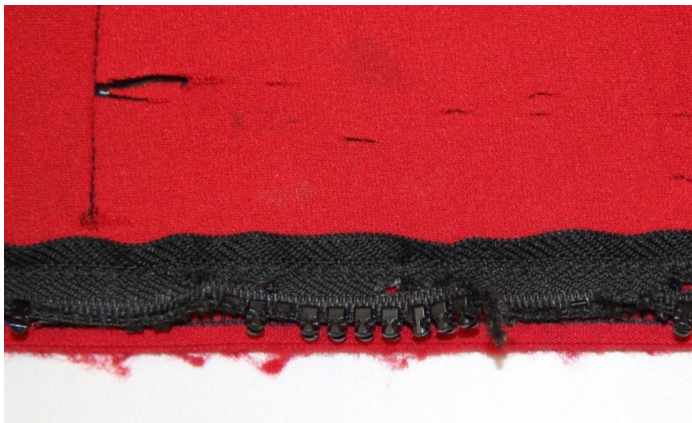


Abb. 73 und 74: Verschlissener Reißverschluss mit fehlendem Schiebergriff (Kinsky 2011b, S. 4f)



Abb. 75:
Deutliche Abdrücke der einzelnen Segmente von Schienbein bzw. Oberschenkel auf der Innenseite der Neopren-Außenhaut (Kinsky 2011b, S. 5)

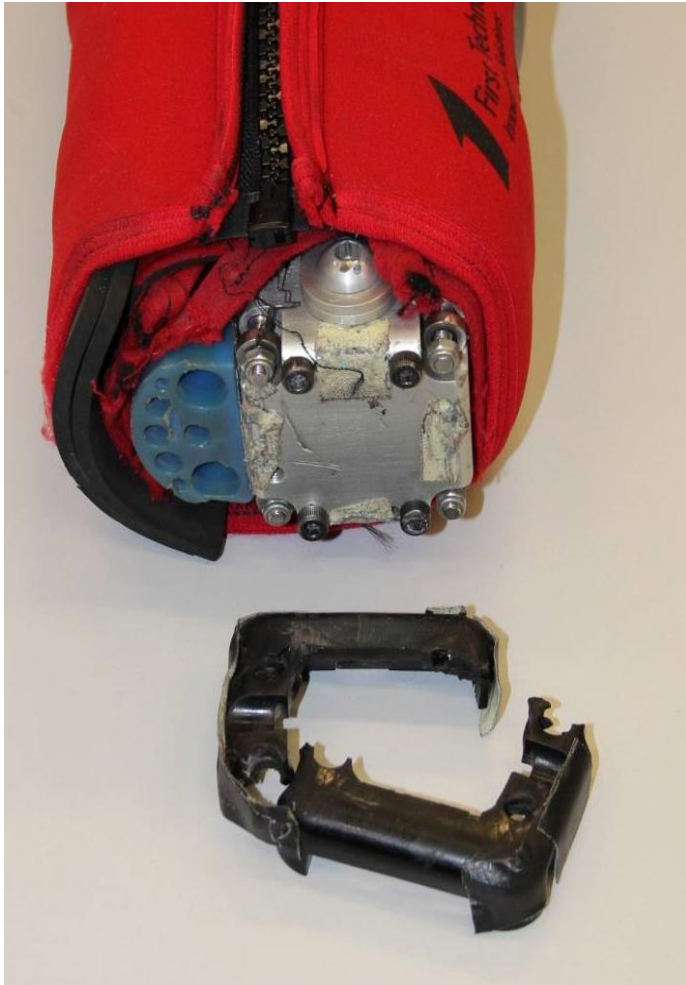


Abb. 76:
Verschlissene Unterseiten der
Neoprenhäute mit gebrochener
unterer Schutzkappe (Kinsky
2011b, S. 6)

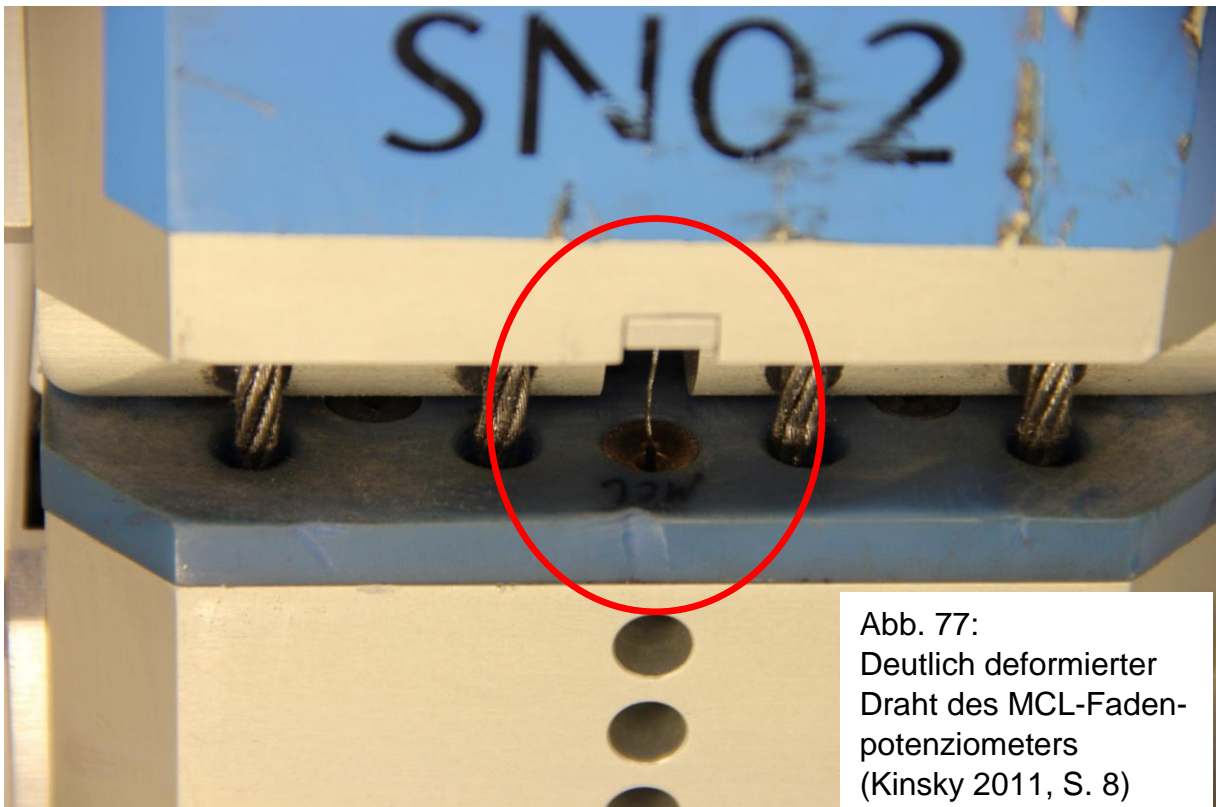


Abb. 77:
Deutlich deformierter
Draht des MCL-Faden-
potenziometers
(Kinsky 2011, S. 8)

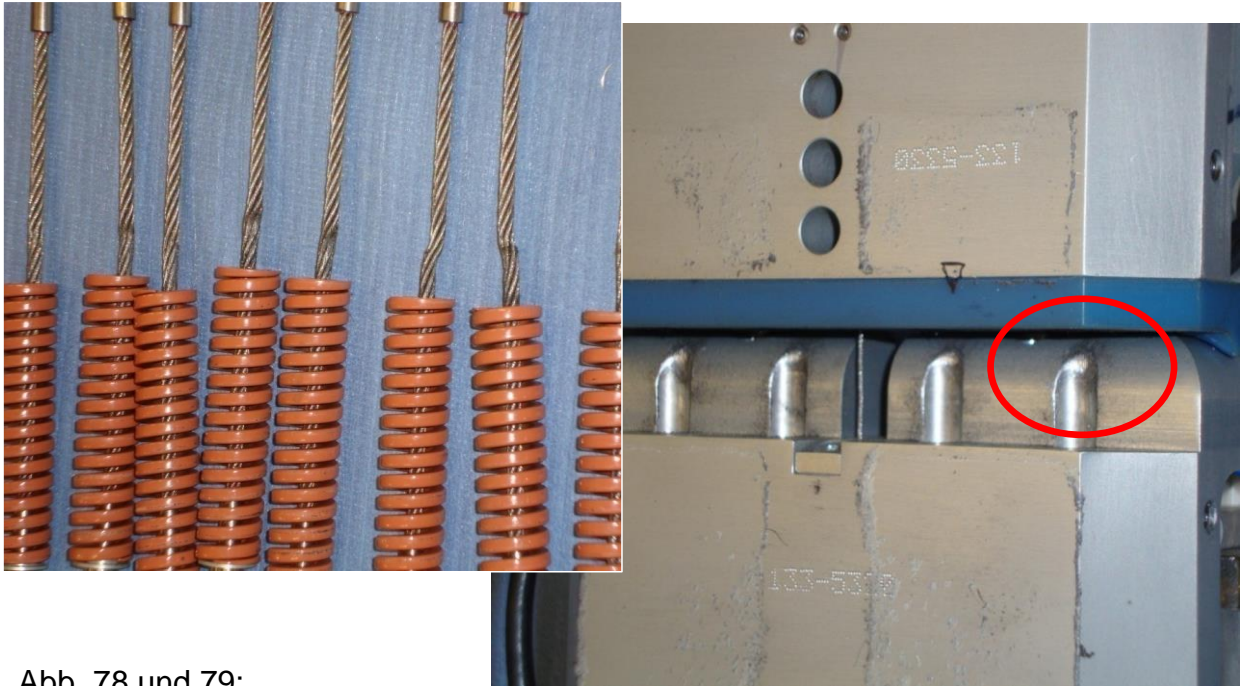


Abb. 78 und 79:
 Abgeknickte Stahlseile, die die Kniebänder darstellen, sowie deutlicher Abrieb an den Führungen der Seile (Kinsky 2011b, S. 9)

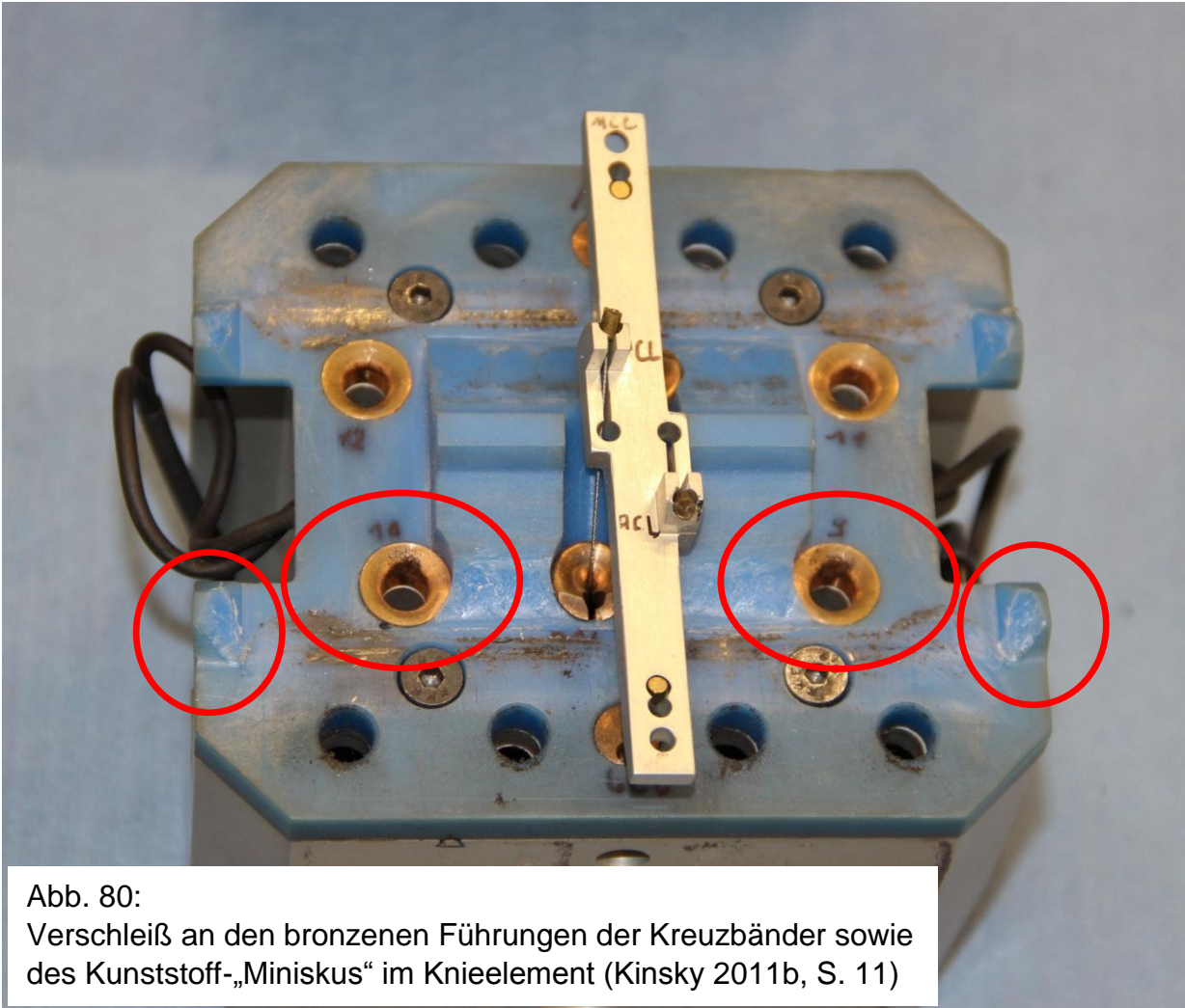


Abb. 80:
 Verschleiß an den bronzenen Führungen der Kreuzbänder sowie des Kunststoff-„Miniskus“ im Knieelement (Kinsky 2011b, S. 11)

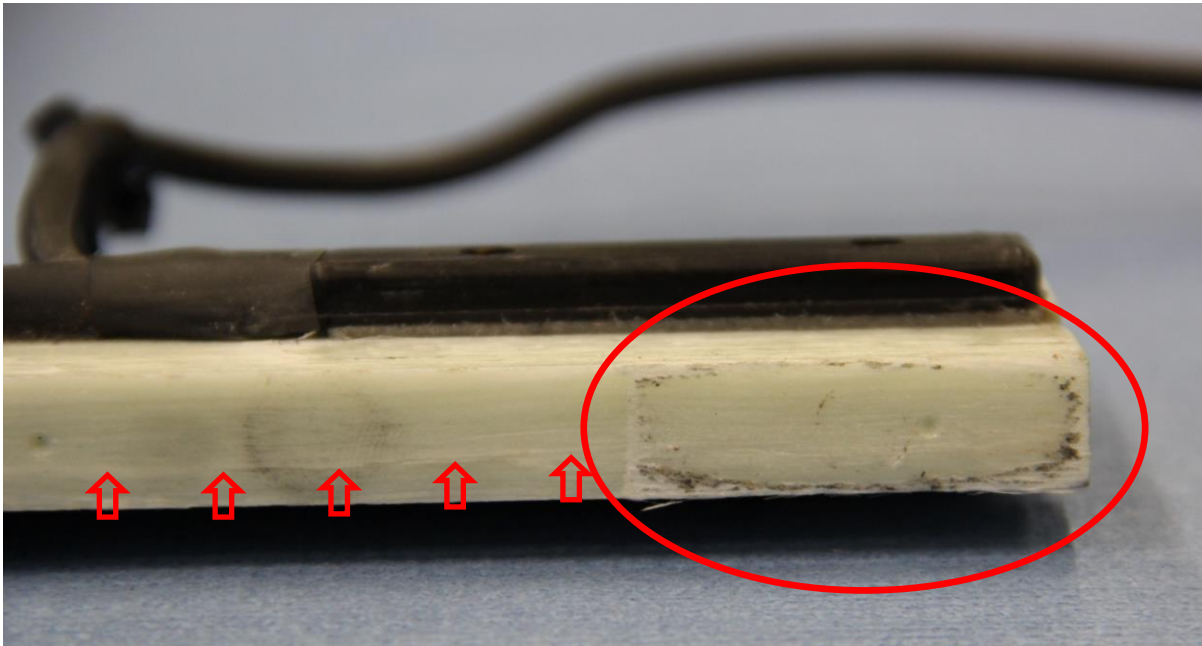
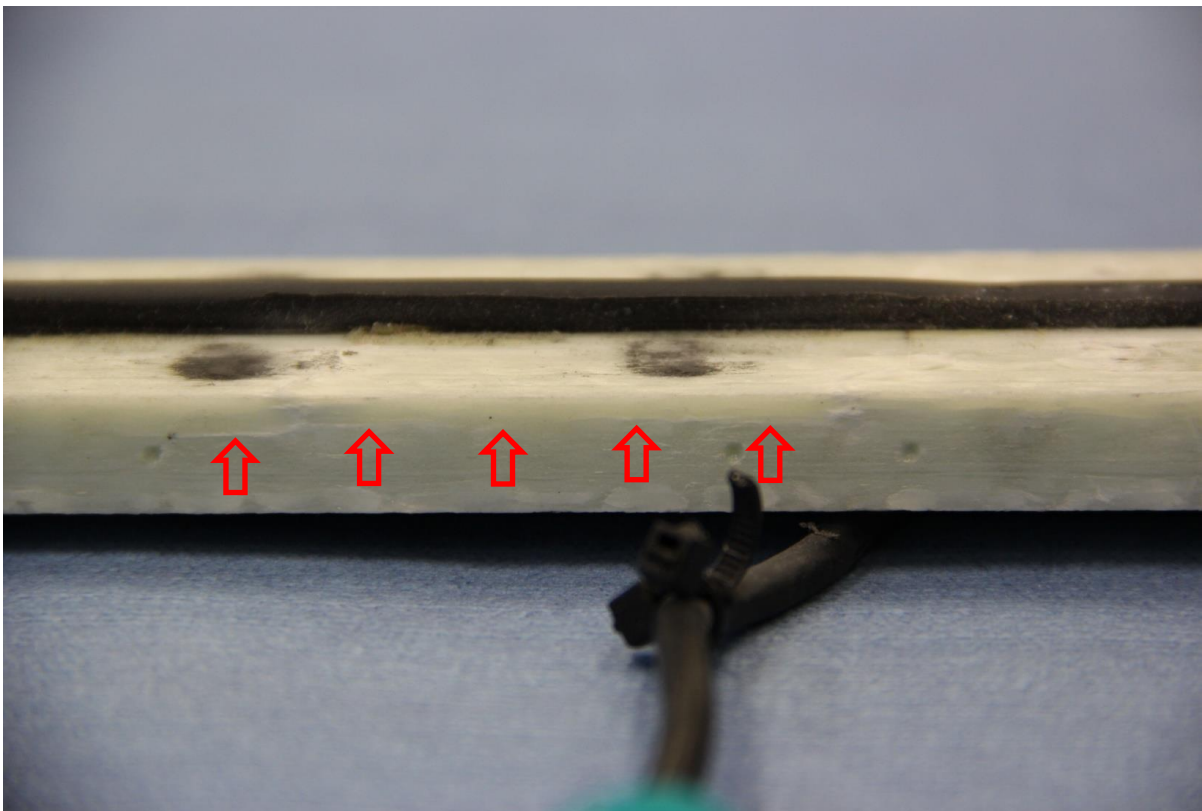


Abb. 81 und 82:
Mechanische Abnutzung an der Einspannstelle des Knochenelementes (oben) sowie Spannungsrisse im Knochenelement (Kinsky 2011b, S. 13f.)



Neben den gezeigten Schäden wurden lose Schrauben, angebrochene Steckverbindungen und ähnliche kleinere Mängel gefunden. Überraschend war, dass der Prüfkörper trotz dieser Mängel erfolgreich zertifiziert worden war – abgesehen von einem Messkanal, von dem aber bekannt war, dass er nicht zuverlässig funktionierte.

Einige der gezeigten Mängel, wie beispielsweise die verschlissenen Neoprenhäute, sind sicherlich als „normaler“ Verschleiß zu bewerten, wie er im täglichen Prüfbetrieb auftritt. Diese Teile werden regelmäßig ersetzt werden müssen, was abgesehen von den damit verbundenen Kosten wenig Einfluss auf die Nutzung des FlexPLI haben dürfte. Andere Mängel basieren offensichtlich auf Schwächen im Prüfkörper-Design, die sich einfach ändern lassen sollten. Beispielsweise würden leicht geänderte Verläufe der Kniebänder-Stahlseile und deutlich abgerundete Kanten im Gehäuse des Knieelements den Verschleiß in diesem Bereich schon deutlich vermindern. Ein Teil der Mängel ist aber sehr bedenklich: Sowohl die erkennbaren Verformungen der Kniebänder als auch die Brüche im Kunststoffmaterial der Knochenelemente sind offensichtlich und man würde eigentlich erwarten, dass solche Schäden zumindest bei der Zertifizierung des Prüfkörpers durch abweichende Messergebnisse auffallen – sie wurden aber nicht erkannt. Hier werden weitere Langzeitbeobachtungen notwendig sein, ob und wie sich diese Schwächen des Prüfkörpers im Testbetrieb bemerkbar machen und ob sie ihn behindern. Vor allem der Austausch verschlissener Knochenelemente dürfte zudem deutliche Kosten verursachen – zumal auf diesen Elementen auch die Dehnmessstreifen für die Messung der Biegemomente aufgebracht sind. Das wird sich auf die Testkosten insgesamt negativ auswirken.

Been und Kollegen hatten zwar schon 2008 darüber berichtet, dass für das Knochenmaterial eine deutlich belastbare Alternative gesucht und gefunden worden war (vgl. Been u.a. 2008, S. 34ff.), allerdings wurde in den Diskussionen zur Phase 2 der GTR Nr. 9 auch erwähnt, dass das Knochenmaterial in seiner Dicke im Zehntelmillimeter-Bereich für jeden Prüfkörper angepasst wird (vgl. Humanetics 2011). So wird das Biegeverhalten der Knochen beeinflusst, um bei der Komponentenzertifizierung jedes Knochenelementes im zulässigen Bereich zu liegen. Aus Sicht der Nutzer des FlexPLI ergibt sich daraus die Befürchtung, dass eine einfache und unkomplizierte Ersatzteilversorgung nicht sichergestellt ist: Für jedes FlexPLI müsste ein eigener Ersatzknochen angefertigt werden, der in seinen Eigenschaften auf den jeweiligen Prüfkörper abgestimmt ist.

Humanetics begründete die Notwendigkeit der oben beschriebenen Vorgehensweise damit, dass das Knochenmaterial nicht mit genau definierten Eigenschaften hergestellt werden kann (vgl. Humanetics 2011, S. 21). Die glasfaserverstärkten Kunststoffstäbe (GFK-Stäbe) für das Knochenmaterial werden in einem Strangziehverfahren hergestellt, in dem eine homogene Verteilung der Glasfasern in den Stäben nicht garantiert werden kann (siehe Abbildung 83). Außerdem werden die Stäbe hinterher bearbeitet und ihre Abmessungen werden dabei deutlich reduziert, so dass unklar ist, wie viele der Glasfasern tatsächlich durchgängig tragende Eigenschaften in den Knochenelementen übernehmen können.

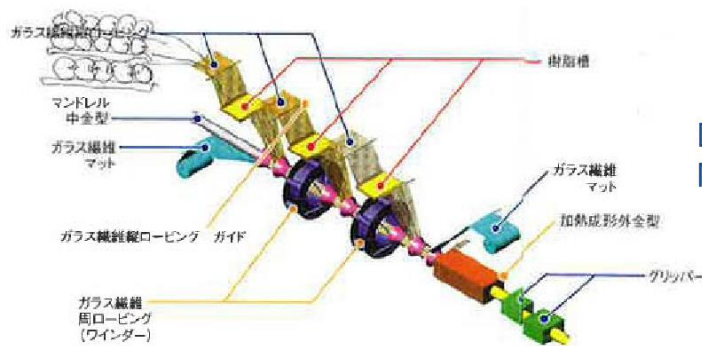


Diagram of bone Making process

Abb. 83: Schema des Herstellungsprozesses für die GFK-Stäbe des Knochenmaterials (Humanetics 2011, S. 21)

Die befürchteten Probleme bei der Ersatzteilversorgung waren für die Mitglieder des ACEA der wichtigste Grund, nach alternativen Lieferanten zu suchen. Letztlich wurde die Firma 4a in Traboch beauftragt, Ersatzknochenelemente für das FlexPLI zu entwickeln, die bei mindestens gleichbleibenden Eigenschaften problemlos die Originalteile ersetzen konnten; gemeinsam mit der BAST wurden die neuen Prüfkörpererelemente für den Einsatz im FlexPLI validiert. Auch hier war der Verfasser für die Automobilindustrie einer der Projektverantwortlichen.

Über die erfolgreiche Entwicklung des alternativen Schienbein-Knochenelementes berichtete Fritz gemeinsam mit dem Verfasser und anderen Kollegen 2013 (vgl. Fritz u.a. 2013), für das Oberschenkel-Knochenelement ist das Projekt zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht abgeschlossen. Das neue Knochenelement ist wesentlich belastbarer als das Originalteil, gleichzeitig aber auch universell in allen FlexPLIs einsetzbar, da es eine definierte Dicke und gleichbleibende Materialeigenschaften hat (vgl. Fritz u.a. 2013, S. 13ff.). Gleichzeitig konnte die Anbindung zum Knieelement des FlexPLI verbessert werden, so dass für die Zukunft weniger mechanischer Verschleiß an der Einspannstelle erwartet wird (siehe Abbildung 84).

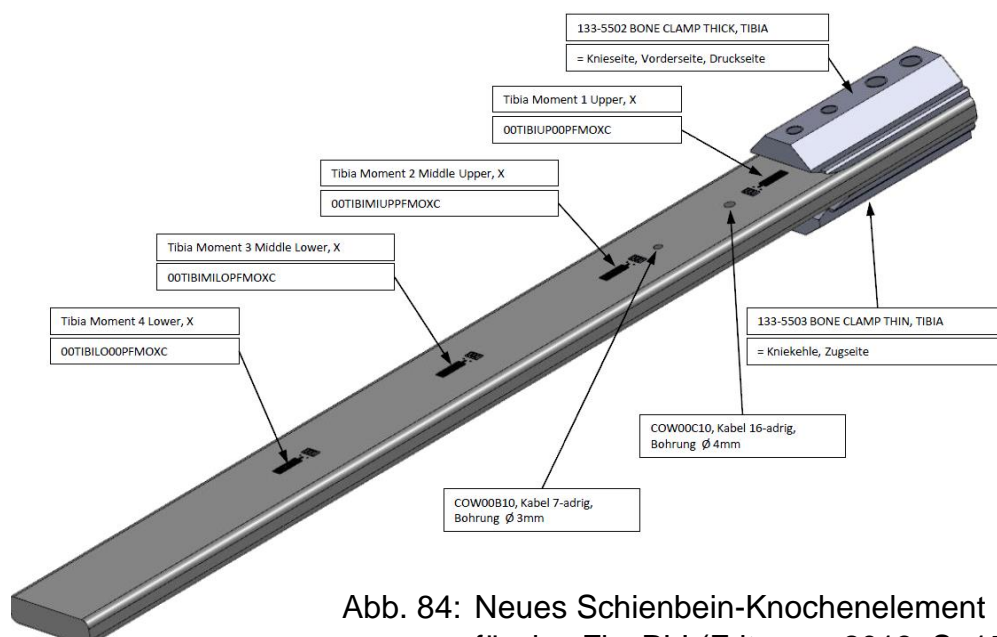


Abb. 84: Neues Schienbein-Knochenelement für das FlexPLI (Fritz u.a. 2013, S. 15)

Erste Tests mit zwei verschiedenen Prüfkörpern, die mit dem neuen Knochenmaterial ausgerüstet wurden, verliefen sehr vielversprechend: Beide Prüfkörper bestanden die Zertifizierungstests und konnten erfolgreich für erste Fahrzeugtests eingesetzt werden (vgl. Fritz u.a. 2013, S. 18ff.).

Der erfolgreiche Abschluss des ersten (Teil-) Projektes für die Verbesserung einzelner Komponenten des FlexPLI wirft die Frage auf, ob und wie das Design des Prüfkörpers weiter verbessert werden kann. Im Vordergrund steht sicherlich eine drastische Reduzierung der Anzahl der Teile des FlexPLI. Besonders das sehr große und aus zahlreichen Teilen bestehende Knieelement (siehe Abbildung 85) bietet sicherlich viele Ansatzpunkte für zukünftige Verbesserungen.

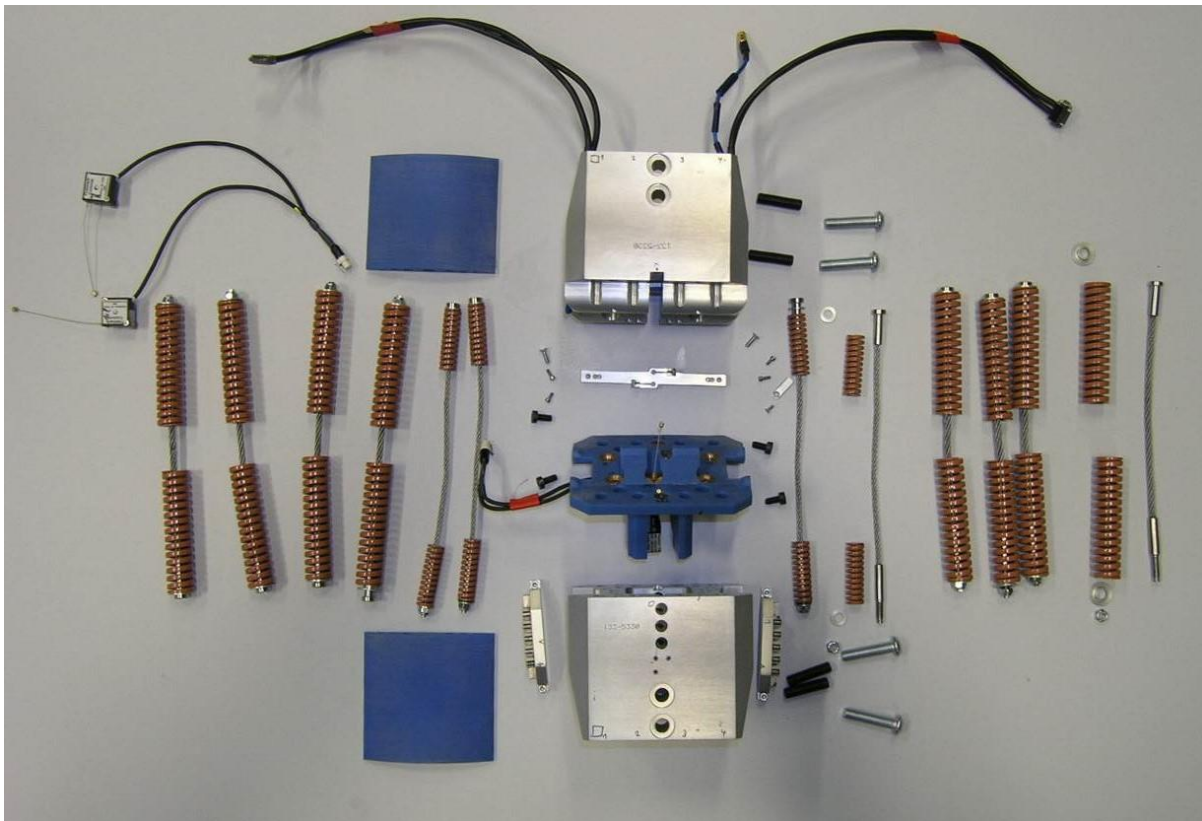


Abb. 85:
Vollständig zerlegtes Knieelement des FlexPLI, hier des Prototyps SN02 (Foto: BGS Böhme und Gehring; Verwendung mit deren freundlicher Genehmigung)

Fritz hatte bereits vor einiger Zeit vorgeschlagen, die heute jeweils acht Spiralfedern auf der Knieober- und der Knieunterseite, die die Kniebänderspannung simulieren, durch insgesamt vier Tellerfederpakete auf einer Knieseite zu ersetzen (vgl. Fritz 2012). Tellerfedern haben geringere Toleranzen als Spiralfedern und lassen sich im Paket gut aufeinander abstimmen, so dass die Gesamtsteifigkeit des Knieelementes

genauer definiert werden könnte. Gleichzeitig könnte das Knieelement deutlich kleiner werden und so würde eventuell mehr Bauraum für die Messtechnik zur Verfügung stehen. Nach der Überzeugung des Verfassers sollte es aber auch möglich sein, mit modernen Materialverbundstoffen ein vom Becken bis zum Fuß durchgehendes Beinskelett darzustellen; denkbar wäre beispielsweise ein verschleißfreies Knieelement aus Silikon und anderen Kunststoffen, bei dem nur noch die Messaufnehmer einen geringen Bauraum beanspruchen. Damit könnten sicherlich einige der Probleme gelöst werden, die das heutige Knieelement im Testbetrieb verursacht: Probleme beim Anschub des Prüfkörpers durch die ungleichen Anlageflächen und ein Verdrehen von Ober- zu Unterschenkel, der durch das Einklemmen/Quetschen verursachte Verschleiß der Neopren-Außenhaut, rauschende Messsignale durch die großen Hohlräume im Knieelement usw. Hier werden in den nächsten Jahren sicherlich weitere, detaillierte Untersuchungen stattfinden.

Weiteres Potenzial für eine Verbesserung des Testverfahrens mit dem FlexPLI sieht der Verfasser bei der Erarbeitung von Kalibrierprozeduren, die eine bessere Vergleichbarkeit des Verhaltens des Gesamtprüfkörpers ermöglichen. Die Erfahrungen aus den in dieser Arbeit erwähnten Tests mit verschiedenen FlexPLI zeigen, dass jeder Prüfkörper ein sehr eigenes Verhalten haben kann. Berücksichtigt man, dass für die verwendete Messtechnik Kalibrierprozeduren bereits existieren, scheint eine Ausweitung auf die zusammengebauten Prüfkörper nur noch ein verhältnismäßig kleiner Schritt sein. Auch hier werden in Zukunft weitere Untersuchungen stattfinden.

3.3.5. Einfluss des Testens mit dem FlexPLI auf das Fahrzeugdesign

Der Verfasser arbeitet für die Automobilindustrie. Einer der wesentlichen Punkte war es aus seiner Sicht deshalb zu untersuchen, wie die Anwendung des Testverfahrens mit dem FlexPLI die Fahrzeugentwicklung und das zukünftige Design von Fahrzeugen beeinflusst. Sobald die Anfangsprobleme des Testens mit dem neuen Prüfkörper gelöst waren, wurden daher entsprechende Untersuchungen vorgenommen, über die der Verfasser und seine Kollegen als erste Vertreter der Automobilindustrie im Detail berichteten (vgl. Kinsky/Friesen/Buenger 2011).

Drei verschiedene Stoßfängersysteme, die zum Zeitpunkt der Untersuchungen in Produktion waren, wurden sowohl mit dem EEVC-Beinprüfkörper als auch mit dem FlexPLI getestet und die Testergebnisse wurden analysiert (siehe Abbildung 86).

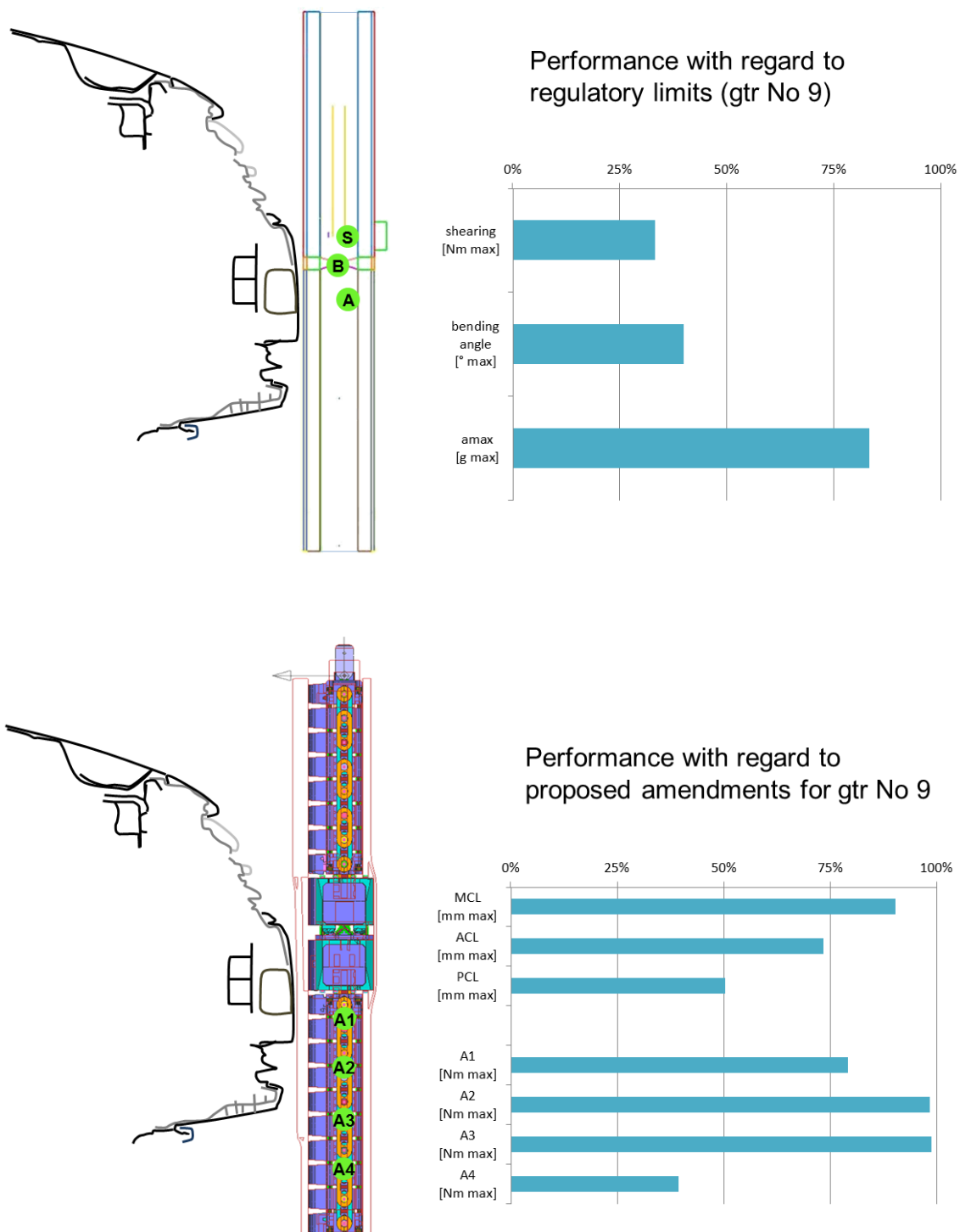


Abb. 86: Vergleich der Testergebnisse mit dem EEVC LFI (oben) und dem FlexPLI (unten) für eines der untersuchten Stoßfängerkonzepte (Kinsky/Friesen/Buenger 2011, S. 14f.)

Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass der Grad, mit dem man die Anforderungen für den EEVC-Prüfkörper erfüllte – also ob man gute oder weniger gute Testergebnisse erreichte –, keine Rückschlüsse auf den Erfüllungsgrad mit dem

FlexPLI zuließ. Aber es konnte auch die Schlussfolgerung gezogen werden, dass für die Erfüllung der Anforderungen mit dem FlexPLI nicht zwingend vollständig neue bzw. andere Designkonzepte notwendig sind (vgl. Kinsky/Friesen/Bünger 2011, S. 19f.): Eine geschlossene Oberfläche der Fahrzeugfront mit möglichst homogenen Verformungseigenschaften sowie mehrere abstützende Elemente für das Stoßfängersystem helfen bei der Erfüllung der FlexPLI-Anforderungen. Eine untere, abstützende Versteifung im Stoßfänger, mit der beim EEVC-Prüfkörper die Kinematik des Prüfkörpers kontrolliert wird, muss für das FlexPLI zumindest elastisch nachgeben. Steife Elemente, die Belastungsspitzen erzeugen könnten, sollten überhaupt nicht verwendet werden. In der Summe würden aber für die Auslegung von Fahrzeugen auf die Erfüllung der Anforderungen mit dem FlexPLI ähnliche Maßnahmen umgesetzt werden, wie das auch für den EEVC-Prüfkörper notwendig war. Entsprechende Designlösungen waren zum Zeitpunkt der Untersuchungen (zumindest in Ansätzen) für die Fahrzeugentwicklung bereits verfügbar.

Weitere Überlegungen des Verfassers bezogen sich auch auf die Tatsache, ob die Schwächen des Prüfkörpers bei einer Fahrzeugauslegung missbraucht werden könnten: Beim Testen mit dem FlexPLI werden nur die Biegungen der langen Knochen sowie die Längenänderungen der Kniebänder aufgezeichnet und ausgewertet. Das Beschleunigungssignal ist wegen des Signalrauschens nach dem Anprall nicht verwendbar. Zumindest theoretisch wäre es also denkbar, eine gänzlich flächige Fahrzeugfront zu gestalten, bei der das FlexPLI beim Testen wie gegen eine glatte Wand anprallen würde. Würden dabei überhaupt kritische Belastungswerte auftreten?

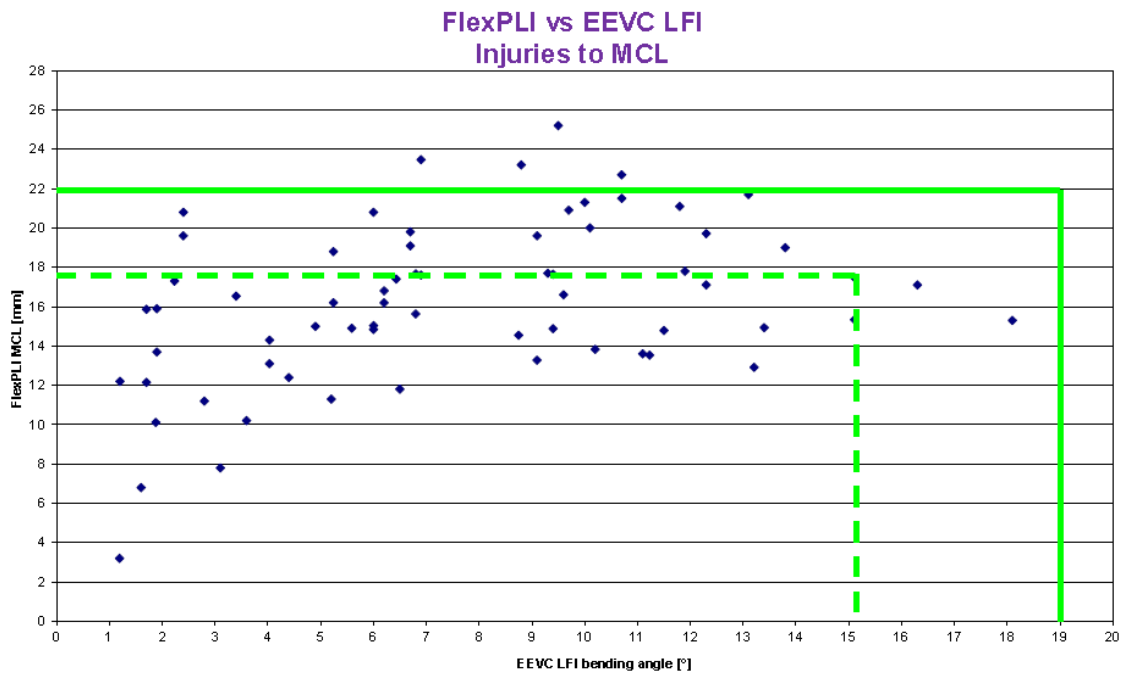
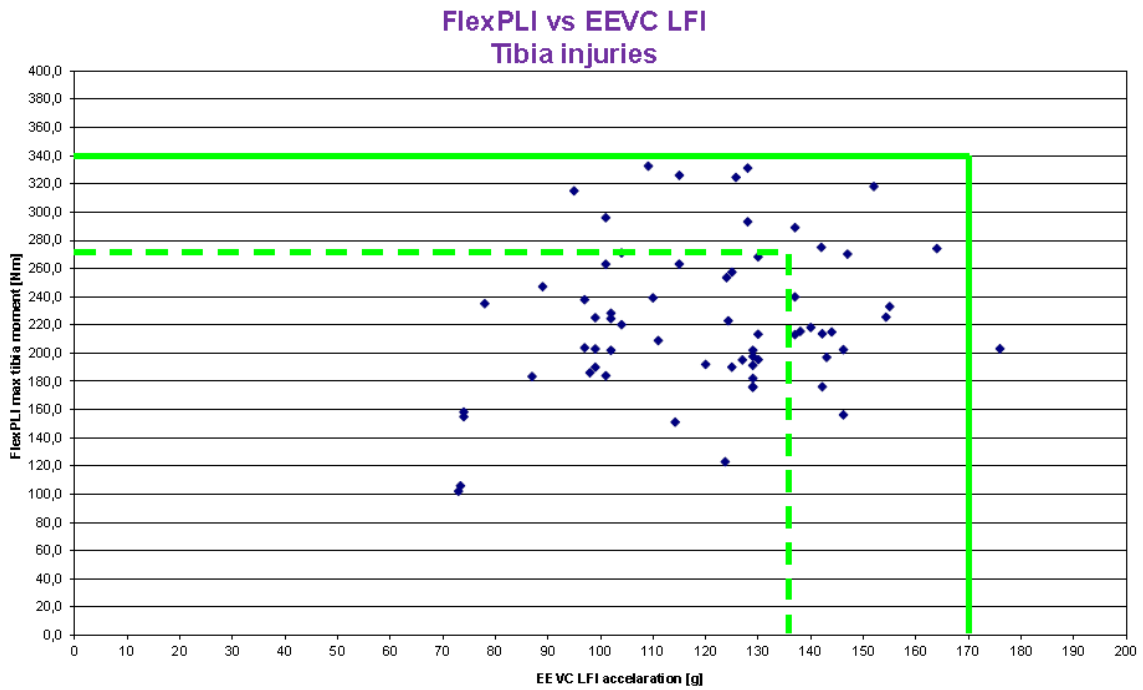
Ein Test mit einem noch nicht vollständig validierten Simulationsmodell des FlexPLI zeigte, dass alle Messsignale deutlich unterhalb der diskutierten Prüfkörper-Grenzwerte verliefen. Lediglich das Beschleunigungssignal zeigte extrem hohe Werte, die sich allerdings nicht sinnvoll auswerten ließen. Im Realunfallgeschehen würden die gemessenen hohen Beschleunigungswerte vermutlich stumpfe Traumata im Bereich des Beines verursachen, die durchaus auch kritisch sein könnten.

Theoretisch wäre es also denkbar, Fahrzeuge zu entwickeln, bei denen ein flächiger Anprall des Prüfkörpers auf seiner gesamten Höhe dafür sorgt, dass die Testanforderungen erfüllt werden. Der Verfasser geht aber davon aus, dass das in der Realität eher unwahrscheinlich ist. Neben dem Zeitgeschmack, der das typische Aussehen von Fahrzeugen deutlich mit beeinflusst, stehen die benötigte Bodenfreiheit von Fahrzeugen, unterschiedliche Steifigkeiten verschiedener Frontbereiche, an den Fahrzeugfronten nötige Lufteinlässe etc. Fahrzeugdesigns entgegen, die der beschriebenen Anprallsituation entsprechen würden. Außerdem werden hier vermutlich sowohl der Gesetzgeber als auch die Verbraucherschutzorganisationen sehr genau die zukünftigen Entwicklungen der Fahrzeugdesigns beobachten.

Auch für die Diskussionen zur Phase 2 der GTR Nr. 9 untersuchten die Vertreter der Automobilindustrie, ob alle Fahrzeuge so ausgelegt werden konnten, dass die Anforderungen mit dem FlexPLI erfüllt werden. Kusche verglich dafür gemeinsam mit dem Verfasser und anderen Kollegen bereits bekannte Testergebnisse aus Fahrzeugtests mit dem EEVC-Prüfkörper mit neuen Tests mit dem FlexPLI und setzten die Testergebnisse zueinander ins Verhältnis (vgl. Kusche u.a. 2012). An den Fahrzeugen wurden jeweils die gleichen Anprallstellen mit beiden Prüfkörpern getestet. Für den Vergleich der Ergebnisse wurde davon ausgegangen, dass die Belastung des Schienbeins beim FlexPLI über die Biegemomente bewertet wird, beim EEVC-Bein über die Beschleunigung des Prüfkörpers. Die Dehnungen des Seitenbandes am FlexPLI entsprechen dem Kniebiegewinkel des EEVC-Prüfkörpers, die Dehnungen der beiden Kreuzbänder am FlexPLI jeweils dem Scherversatz im Knie des EEVC-Beins. Außerdem wurde davon ausgegangen, dass für beide Prüfkörper die vereinbarten Grenzwerte etwa einer gleichwertigen Belastung des menschlichen Beines entsprechen.

Aus dem Vergleich der Testergebnisse zogen Kusche und Kollegen die Schlussfolgerung (vgl. Kusche u.a. 2012, S. 10), dass der jeweilige Grad, mit dem einer der Prüfkörper die Anforderungen erfüllte, nicht zwangsläufig Rückschlüsse darauf zuließ, wie der jeweils andere Prüfkörper in Tests abschneiden würde (siehe Abbildung 87).

Die Diagramme in Abbildung 87 zeigen, dass die Testergebnisse beider Prüfkörper nicht miteinander korrelieren: Idealerweise würden die Testergebnisse auf einer Gerade innerhalb der Diagramme liegen, die mit ansteigender Belastung ebenfalls ansteigt. Berücksichtigt man, dass beim Testen gewisse Streuungen unvermeidbar sind, wären als Ergebnisse auch Punktwolken entlang der jeweiligen Geraden akzeptabel. Bei den von Kusche und Kollegen gezeigten Ergebnissen lässt sich eine solche Punktwolke entlang einer gedachten Gerade am ehesten noch in die Testergebnisse für die Schienbeinbelastungen hineininterpretieren – wobei auch hier die Streuung zu groß erscheint. Für die Kniebänderbelastungen sieht der Verfasser keine Korrelationen der Testergebnisse. Das wirft letztendlich die Fragen auf, ob und wie beide Prüfkörper tatsächlich in der Lage sind, einzelne Verletzungen qualitativ gleichwertig zu bewerten und, wenn nicht, welcher Prüfkörper der bessere für die Bewertung von Verletzungsrisiken für das menschliche Bein ist. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit können diese Fragen noch nicht beantwortet werden, sie werden aber sicherlich zukünftige Arbeitsschwerpunkte darstellen.



[Abb. 87: Fortsetzung/Erläuterungen siehe nächste Seite]

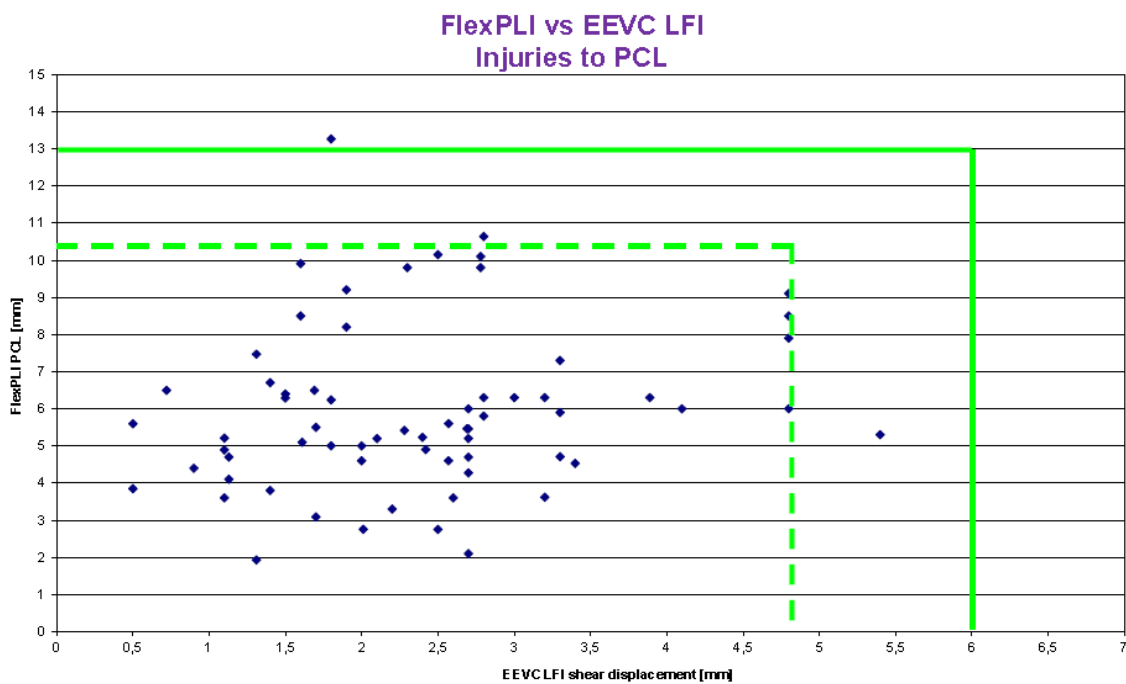
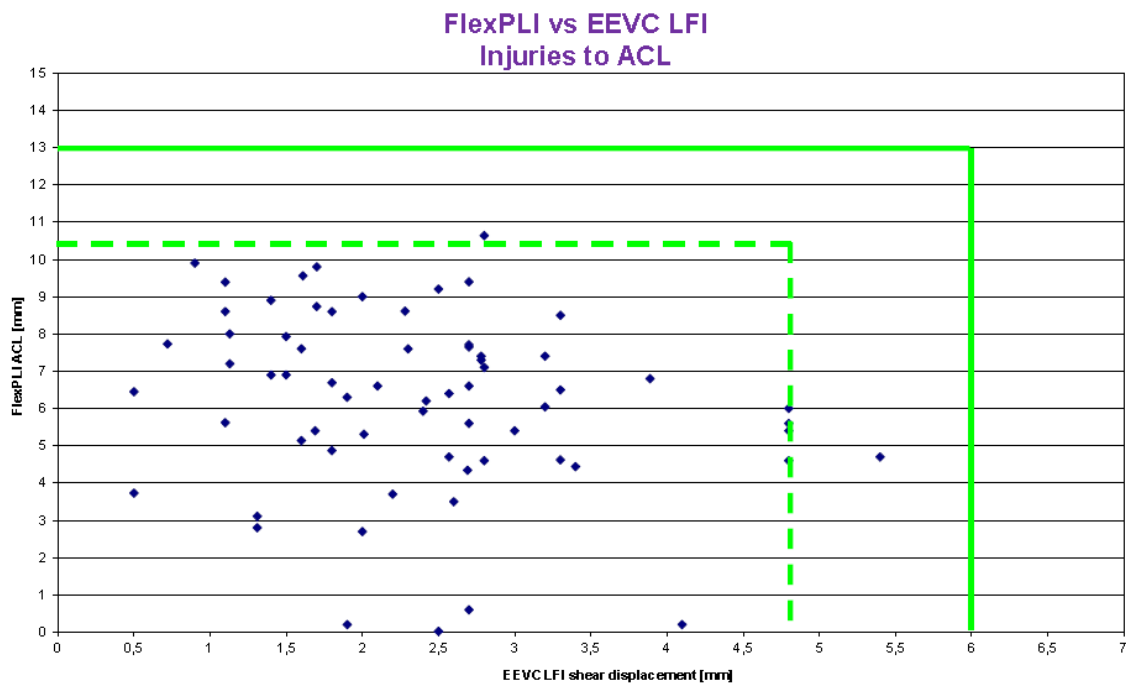


Abb. 87: Vergleich der Testergebnisse von Tests mit dem FlexPLI (Ordinate) und dem EEVC-Prüfkörper (Abzisse) für die Schienbeinbelastungen (S. 96 oben), das Innenband MCL (S. 96 unten) sowie das vordere Kreuzband ACL (diese Seite oben) und das hintere Kreuzband PCL (diese Seite unten) (Kusche u.a. 2012, S. 6ff). Jeder Punkt stellt dabei die Testergebnisse für beide Prüfkörper für den gleichen Auftreffpunkt an einem Fahrzeug dar.

Kusche und Kollegen wollten mit ihren Untersuchungen allerdings in erster Linie klären, ob die Anforderungen, die sich durch die Verwendung des FlexPLI ergeben, an den Fahrzeugen umgesetzt werden können. Da die Fahrzeuge bereits die Anforderungen mit dem EEVC-Prüfkörper erfüllten, konnte Aussagen dazu getroffen werden, ob die prinzipiellen Auslegungskriterien auch für den neuen Prüfkörper weiterhin gültig sind. Kusche und Kollegen schlussfolgerten, dass für die Mehrheit der Fahrzeuge die FlexPLI-Anforderungen im Prinzip umsetzbar erscheinen. Allerdings wurde auch noch einmal darauf hingewiesen, dass die Erkenntnisse sich zum Zeitpunkt der Untersuchungen im Wesentlichen auf den „Standard-Pkw“, also die normale Limousine, bezogen. Speziell für extreme Fahrzeuggeometrien, wie sie sehr flache Sportwagen oder Geländewagen mit hoher Bodenfreiheit aufweisen, lagen dagegen noch zu wenige Erfahrungen vor (vgl. Kusche u.a. 2012, S. 10).

Genau wie der EEVC LFI ist auch der neue Prüfkörper im Wesentlichen ein zweidimensionales Prüfwerkzeug. Besonders die Anordnung der federbelasteten Stahlseile in dem sehr voluminösen Knieelement sowie der rechteckige Querschnitt des Knieelementes führen dazu, dass der Prüfkörper eher rotiert als sich über die Ecken des Knieblockes zu biegen. Bei den am Ende von Kapitel 3.2 erwähnten Untersuchungen hatte Schmitt auch für das FlexPLI nachweisen können, dass die Rotation von der Neigung der Fahrzeugfront im Bereich des Anpralls bestimmt wird (vgl. Schmitt 2013a, S. 3). Roth verglich das Verhalten des Beinprüfkörpers mit dem Verhalten des menschlichen Beines in einer THUMS-Simulation (vgl. Roth 2013) und stellte dabei ebenfalls eine deutliche Rotation des Prüfkörpers fest, die sich beim Bein des (simulierten) Fußgängers durch die Interaktion mit dem gesamten Körper so nicht feststellen ließ (siehe Abbildung 88).

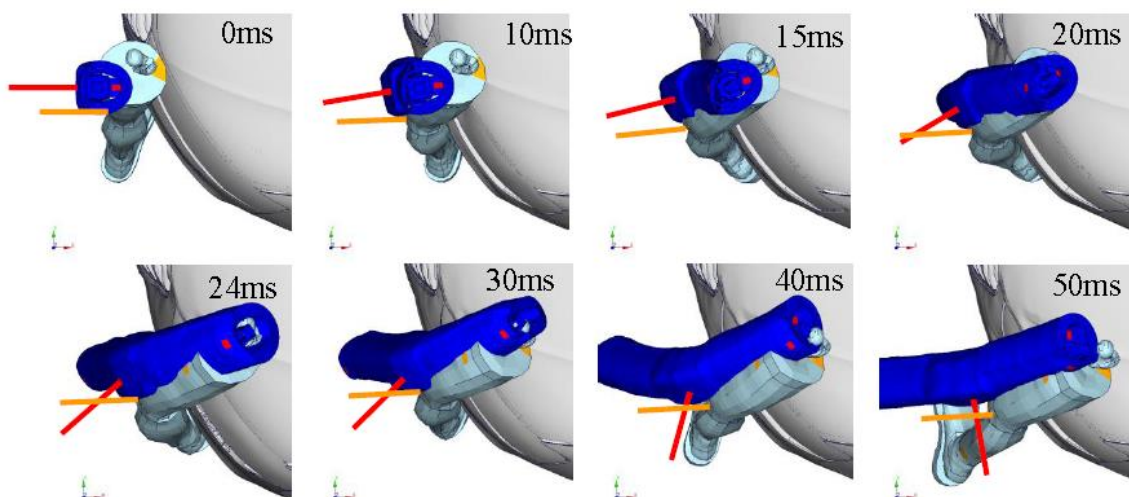


Abb. 88: Rotation des FlexPLI im Vergleich zur Rotation des menschlichen Beines in einer THUMS-Simulation (Derndinger 2013, zit.n. Roth 2013, S. 10). Die Bewegungsmarker zeigen, dass das FlexPLI deutlich rotiert, während das menschliche Bein seine Ausgangsposition während der gesamten Anprallphase fast unverändert beibehält.

Das beschriebene Verhalten des Beinprüfkörpers führt dazu, dass vor allem in den äußeren Bereichen die Testergebnisse nicht zuverlässig sind – weder in ihrer Aussagefähigkeit im Vergleich zum menschlichen Bein noch in ihrer Vorhersagbarkeit. Bei der Fahrzeugentwicklung müssen diese Details berücksichtigt werden. Abgesehen davon kann aber festgestellt werden, dass heutige Fahrzeuge in den meisten Fällen eine recht homogene Fahrzeugfront haben, durch die die Kräfte bei einem Unfall verhältnismäßig gleichmäßig auf den jeweiligen Kontaktbereich am menschlichen Bein übertragen werden. Schon allein dadurch wird das Verletzungsrisiko minimiert. Für die Erfüllung der Testanforderungen mit dem FlexPLI werden solche Fahrzeugdesigns hilfreich sein.

3.3.6. Prüfkörper-Grenzwerte für das Testen mit dem FlexPLI

Die im vorherigen Kapitel beschriebene fehlende Korrelation zwischen den Testergebnissen mit dem EEVC LFI und dem FlexPLI ist auch insofern verwunderlich, als die Prüfkörper-Grenzwerte zumindest teilweise auch über Testergebnisse mit dem EEVC LFI abgeleitet worden waren. Die entsprechenden Aktivitäten hatten im Rahmen der bereits erwähnten Technical Evaluation Group (TEG) stattgefunden.

Konsou und Zander erläuterten in ihrer Zusammenfassung der Grenzwertdiskussionen in der TEG (vgl. Konosu/Zander 2009), über welche einzelnen Schritte die verschiedenen Prüfkörper-Grenzwerte abgeleitet worden waren. Dabei wurden verschiedene Methoden angewendet: Menschliche Belastungswerte aus der Literatur wurden über verschiedene Schritte in der Simulation dem Verhalten des FlexPLI zugeordnet, aus anthropometrischen Daten wurden unter Verwendung von verfügbaren Verletzungsrisikokurven Werte für die Verletzungswahrscheinlichkeit abgeleitet, die dann auf Prüfkörpergrenzwerte zurückgeführt wurden, oder aus Vergleichsuntersuchungen mit dem EEVC LFI und dem FlexPLI wurden Prüfkörper-Grenzwerte abgeleitet. Speziell für die Grenzwerte der Kreuzbänder wurde dabei die Korrelation sowohl zwischen den beiden Prüfkörpern als auch die der Kreuzbänder mit dem inneren Seitenband untersucht.

Während sowohl für die Biegemomente im Schienbein als auch für die Dehnung des inneren Seitenbandes die verschiedenen oben genannten Methoden recht gut eine Ableitung von Prüfkörper-Grenzwerten gestatteten, war die Ableitung von Grenzwerten für die Kreuzbänder recht schwierig (vgl. Konosu/Zander 2009, S. 2). In der Fachliteratur gab es nur zwei Referenzwerte, in den Realunfalldaten waren Kreuzbandverletzungen recht selten verzeichnet. Gleichzeitig bestand aber einer der Diskussionspartner in der TEG auf einer verbindlichen Festlegung von Prüfkörper-Grenzwerten für ACL und PCL. Zander untersuchte daher im Detail das Verhalten der beiden Prüfkörper bei Tests an verschiedenen Fahrzeugen (vgl. Zander 2010).

Aus zwölf Tests mit dem EEVC LFI und achtzehn Tests mit dem FlexPLI entwickelte Zander eine Übergangsfunktion, die eine Ableitung der ACL-Dehnung im FlexPLI aus dem Scherversatz im EEVC LFI erlauben sollte (siehe Abbildung 90).

2)SD versus ACL:

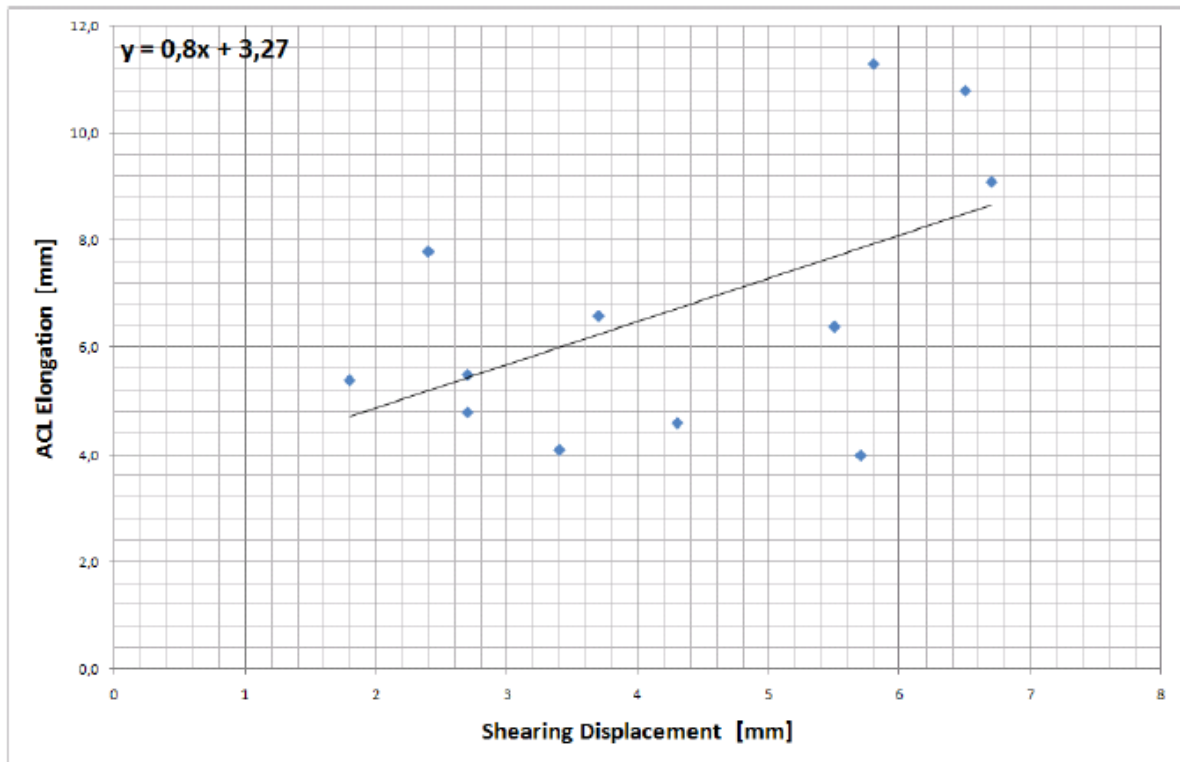
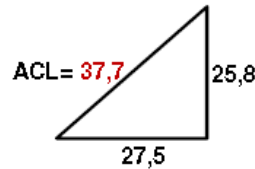
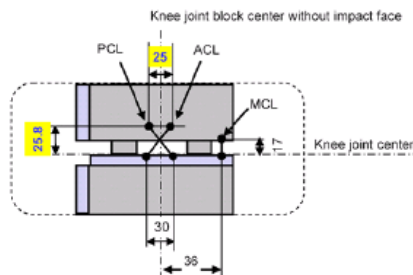


Abb. 90: Vergleich der EEVC-Prüfkörper-Messwerte für die Scherung mit denen des neuen Prüfkörpers für die Dehnung des vorderen Kreuzbandes (Zander 2010, S. 8).

Nach Ansicht des Verfassers lässt sich aus dem oben gezeigten Diagramm keine Korrelation der Testergebnisse beider Prüfkörper ableiten. Die Tatsache, dass heute mit Hilfe von Computerprogrammen recht einfach eine Funktion aus den vorhandenen Messwerten erstellt werden kann, sollte nicht zu dem Schluss verleiten, dass diese auch zum allgemeingültigen Ableiten der Messwerte geeignet ist.

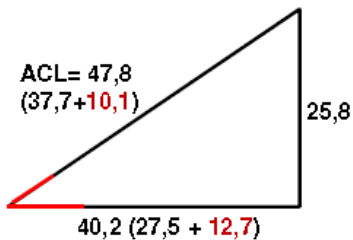
Zander nutzte eine zweite Methode, um einen Vorschlag für den ACL-Grenzwert zu erarbeiten: Über eine einfache geometrische Betrachtung wurden die in der Literatur gefundenen zwei Referenzwerte auf die Verhältnisse im FlexPLI umgerechnet (siehe Abbildung 91). Mathematisch ist diese Methode sicherlich korrekt, allerdings wurde nach Ansicht des Verfassers hierbei nicht angemessen berücksichtigt, dass das vordere menschliche Kreuzband – ebenso wie das hintere – dreidimensional im Knie verläuft, während im FlexPLI zur Sicherstellung wiederholbarer Messungen beide

Kreuzbänder parallel zur vorgesehenen Bewegungsrichtung des Prüfkörpers angeordnet wurden (vgl. auch Abbildung 57, S. 68).



ACL length in unloaded condition @ approx. 37,7 mm

Shearing of 12,7 mm causes ACL elongation of approx. 10,1 mm



Shearing of 17,8 mm causes ACL elongation of approx. 14,4 mm

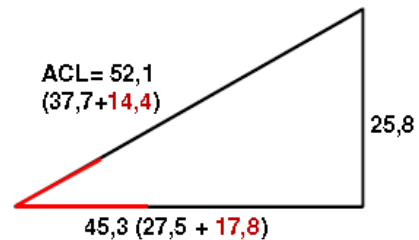


Abb. 91: Geometrische Ableitung der Dehnung des vorderen Kreuzbandes für die zwei in der Fachliteratur gefundenen Referenzwerte (Zander 2010, S. 17)

Zusätzlich verglich Zander die Dehnungen des inneren Seitenbandes sowie des ACL bei 55 Tests mit dem FlexPLI (Zander 2010, S. 11ff.). Zander fand einen guten Zusammenhang zwischen den Testergebnissen, die sich aber nach Ansicht des Verfassers auch über die Kinematik des Prüfkörpers erklären lassen. Generell sind nach dem Verständnis des Verfassers Kreuzbandverletzungen eher Verletzungen, die durch ein Verdrehen des Oberschenkels gegenüber dem fixierten Unterschenkel auftreten. Dieser Belastungsfall ist typisch für bestimmte Sportverletzungen, entspricht aber eher nicht der Kinematik des Fußgängers beim Unfall mit einem Fahrzeug.

Als Ergebnis seiner Untersuchungen schlug Zander letztendlich einen Prüfkörper-Grenzwert von 13 mm für die Dehnung des vorderen Kreuzbandes vor; dieser wurde auch für das hintere Kreuzband übernommen. Dieser Prüfkörper-Grenzwert wurde gemeinsam mit den in den weiteren Diskussionen erarbeiteten Grenzwerten von 22 mm für die maximale Dehnung für das innere Seitenband sowie von jeweils 340 Nm für das maximale Biegemoment für alle vier Messstellen am FlexPLI-

Schienbein für die Verwendung in der zukünftigen Gesetzgebung vorgeschlagen (vgl. UNECE 2014). Wie bereits im Kapitel 3.3.5 dargestellt, sollte eine Umsetzung dieser Anforderungen technisch möglich sein. Ob sie im Realunfallgeschehen zu einer Verringerung von Beinverletzungen für die Fußgänger beitragen, wird man erst in einigen Jahren mit Sicherheit sagen können. Bis dahin bleibt zu hoffen, dass die aufgezeigten Schwächen sowohl im Prüfkörperdesign als auch der Testprozedur möglichst abgestellt werden. Der Verfasser wird seinen Beitrag dazu leisten.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem neuen, in Japan entwickelten flexiblen Beinprüfkörper für den Fußgängerschutz werden in Zukunft Aussagen dazu möglich sein, wie hoch das Risiko von Verletzungen der langen Knochen im menschlichen Bein sowie von Verletzungen der Kniebänder beim Zusammenprall eines Fußgängers mit einem Fahrzeug ist. Der neue Prüfkörper wurde in den letzten etwa zehn Jahren in mehreren Entwicklungsstufen zu einem Testwerkzeug weiterentwickelt, das heute für den Einsatz in Prüflaboren geeignet ist und welches den Automobilherstellern ermöglicht, die Fahrzeugfronten neuer Fahrzeugmodelle entsprechend auszulegen. Dafür ist das bisher genutzte und bewährte Testverfahren mit dem EEVC-Beinprüfkörper sinnvoll weiterentwickelt worden; der neue Prüfkörper stellt nach Ansicht des Verfassers eine Evolution dar – aber keine Revolution.

Anfängliche Probleme mit der Testbarkeit des FlexPLI sind heute gelöst. Der Prüfkörper ist deutlich robuster als zu Beginn seiner Entwicklung. Allerdings fehlen immer noch ausreichende Erfahrungen zur Langzeithaltbarkeit. In der Zukunft wird jedoch zu erwarten sein, dass einzelne Teile regelmäßig ausgetauscht werden müssen. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, die auch weitere Verbesserungen technischer Details des Prüfkörpers hervorbringen sollten.

Zahlreiche Details des FlexPLI wurden im Laufe seiner Entwicklung bereits deutlich verbessert. Weitere Verbesserungen wären wünschenswert, besonders im Bereich des Knieelementes sieht der Verfasser deutliches Potenzial. Außerdem würde die Erarbeitung von Kalibrierprozeduren für den zusammengebauten Prüfkörper das Testverfahren weiter verbessern. Auch diese Punkte werden in Zukunft weiter untersucht werden müssen.

Für die Fahrzeugauslegung stellt das neue FlexPLI sicherlich noch eine Herausforderung dar. Geschlossene Fahrzeugfronten mit homogenen Verformungseigenschaften werden die Erfüllung der Anforderungen begünstigen, durch seinen flexiblen Aufbau ist das FlexPLI aber gut geeignet, Belastungsspitzen durch einzelne Bauteile der Fahrzeugfront zu erkennen und eine gleichmäßige Verteilung der Kräfte über die Höhe des Prüfkörpers abzu prüfen. Speziell für extreme Fahrzeuggeometrien wird es nötig sein, neue Konzepte zu erarbeiten und weitere Erfahrungen zu sammeln.

Zahlreiche andere Themen, die in dieser Arbeit noch nicht untersucht wurden, werden die weitere Entwicklung des FlexPLI vorantreiben. Hervorzuheben wären hier nach Ansicht des Verfassers vor allem weitere biomechanische Untersuchungen, die noch besser die Zusammenhänge zwischen der Schwere von Beinverletzungen von Fußgängern und dem Verhalten des FlexPLI herausarbeiten.

Nachwort

Für seine berufliche Tätigkeit – und damit auch für diese Arbeit – hatte der Verfasser Zugang zu mehreren tausend Publikationen, die sich mit verschiedenen Teilbereichen des Fußgängerschutzes beschäftigen. Diese konnten zwangsläufig nicht alle berücksichtigt werden. Einige Dokumente, wie die des EEVC oder gesetzliche Regelungen, wurden verwendet, da sie allgemein bekannte Referenzdokumente zum Fußgängerschutz darstellen. Andere Dokumente wurden verwendet, da sie zum Thema der Arbeit passten und die vom Verfasser gewünschten Aussagen ergänzten. Die getroffene Auswahl soll aber in keiner Weise eine Wertung der verwendeten Quellen darstellen. Zahlreiche Experten haben hochwertige Beiträge zu verschiedenen Fußgängerschutzthemen und speziell auch zum Thema dieser Arbeit geleistet und hätten hier ebenso zitiert werden können.

Zum Thema FlexPLI möchte der Verfasser vor allem auf die zahlreichen Veröffentlichungen und Präsentationen der Herren Dr. Atsuhiko Konosu (JARI), Masaaki Tanahashi und Yukou Takahashi (beide JAMA) von japanischer Seite, Bernard Been und Mark Burleigh (beide früher First Technology Safety Systems (FTSS), heute Humanetics) von Seiten des Herstellers des FlexPLI sowie Oliver Zander (BASt), Dirk-Uwe Gehring und Peter Leßmann (beide BGS Böhme und Gehring) von deutscher Seite verweisen, die die Entwicklung des Prüfkörpers über die verschiedenen Entwicklungsstufen hinweg wesentlich vorangetrieben haben. Auch wenn der Verfasser einige Beiträge der genannten Herren kritisch betrachtet hat, so sind seine eigenen Beiträge sicher nur kleine Mosaiksteine im Vergleich zu den Beiträgen dieser Herren.

Die Fußgängerschutz-Publikationen betreffend musste der Verfasser außerdem feststellen, dass vor allem zahlreiche ältere Dokumente heute nur noch eingeschränkt zugänglich sind. Vor allem die ehemals in Buchform herausgegebenen Unterlagen von Konferenzen sowie Beiträge aus Zeitschriften sind zwar oft noch als Kopien von minderer Qualität verfügbar, können aber wegen fehlender detaillierter Quellenangaben oft nicht mehr korrekt zugeordnet werden. Leider ist das oft auch bei Quellen namhafter Autoren bzw. bei Zitaten in namhaften Publikationen der Fall. Der Verfasser hat in diesen Fällen auf die direkte Verwendung der nicht eindeutig zuzuordnenden Quellen verzichtet und sich im Zweifelsfall auf Sekundärquellen konzentriert. Alle verwendeten Quellen sind im Quellenverzeichnis am Ende der Arbeit aufgeführt.

Abschließend möchte der Verfasser noch feststellen, dass alle in dieser Arbeit geäußerten Ansichten und Meinungen in erster Linie persönlichen Überzeugungen entsprechen und nicht zwangsläufig die Auffassungen seines Arbeitsgebers oder der Verbände, in deren Arbeitsgruppen und Gremien der Verfasser tätig ist, widerspiegeln.

Quellenverzeichnis

ACEA 2001:

o.N. (European Automobile Manufacturers' Association (ACEA)): ACEA Commitment relating to the Protection of Pedestrians and Cyclists. – Brüssel, 11.07.2001. – Online im Internet: <http://www.eesc.europa.eu/self-and-coregulation/documents/codes/private/018-private-act.pdf> (2014-04-20).

ACEA 2009:

o.N. (European Automobile Manufacturers' Association (ACEA)): Summary of ACEA Tests / ACEA Comments. Arbeitsdokument TEG-090 zur 8. Sitzung der "FlexPLI Technical Evaluation Group", Köln (Cologne), 19. Mai 2009. – Online im Internet: http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_flexpli.html (2014-05-31).

ActiveTest 2012:

o.N.: ActiveTests: Workshops – Workshop III: Vulnerable Road Users, 25 – 26 Sept. 2012, Borås/Sweden. [Vorstellung des Projektes ActiveTest, eines Projektes im Rahmen des European Commission 7th Framework Programme, im Internet; Anm. d. Verf.] – Online im Internet: www.activetest.eu/workshop3_gallery.html (2013-01-28).

Akiyama/Okamoto/Rangarajan 2001:

Akiyama, Akihiko; Okamoto, Masayoshi; Rangarajan, Nagarajan: Development and Application of the new Pedestrian Dummy. Dokument 463 zur 17. ESV-Konferenz, Amsterdam, 4. – 7. Juni 2001. – Online im Internet: <http://www.nhtsa.gov/ESV> (2013-08-13).

BAST 2006:

o.N. (Federal Highway Research Institute BAST): Handling Guideline for the EEVC WG 17 Legform Impactor; Version 1.0. Veröffentlicht als Arbeitsdokument INF GR/PS/154 Rev.1 der UNECE „Informal Group on Pedestrian Safety“. – Online im Internet: http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_9.html (2014-05-27).

BAST 2014:

o.N.: BAST: Graphik: Getötete im Straßenverkehr in der Bundesrepublik Deutschland nach Ortslage und Art der Verkehrsbeteiligung. – Online im Internet: http://www.bast.de/cln_032/nn_42246/DE/Statistik/statistik-node.html?__nnn=true (2014-01-21).

Been 2007:

Been, Bernard: First Technology Safety Systems FLEX-PLI-GTR Development. Arbeitsdokument TEG-052 zur 5. Sitzung der "FlexPLI Technical Evaluation Group", Bergisch Gladbach, 7. Dezember 2007. – Online im Internet:

http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_flexpli.html (2014-05-31).

Been 2008:

Been, Bernard: First Technology Safety Systems Design Freeze Status FLEX-PLI-GTR Development Mechanical Design. Arbeitsdokument TEG-054-Rev.1 zur 6. Sitzung der "FlexPLI Technical Evaluation Group", Bergisch Gladbach, 31. März 2008. – Online im Internet:

http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_flexpli.html (2014-05-31).

Been u.a. 2008:

Been, Bernard; o.N. (JAMA); o.N. (JARI): First Technology Safety Systems / FLEX-PLI-GTR Development Prototypes. Add. 1 JAMA-JARI / Improvement of Durability of Bone Core; Add. 2 JAMA /JARI Development of A Dynamic Assembly Calibration Test Procedure for Flex-GTR using an FE Flex-GT-prototype model. Arbeitsdokument TEG-071 mit Anhängen 1 und 2 zur 7. Sitzung der "FlexPLI Technical Evaluation Group", Bergisch Gladbach, 8. Dezember 2008. – Online im Internet:

http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_flexpli.html (2014-05-31).

Burleigh 2009:

Burleigh, Mark: Minor updates and pusher plate discussion for Flex Pli GTR. Arbeitsdokument TEG-117 zur 10. Sitzung der "FlexPLI Technical Evaluation Group", Bergisch Gladbach, 1. - 2. Dezember 2009. – Online im Internet:

http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_flexpli.html (2014-05-31).

Cesari/Alonso/Matyjewski 1991:

Cesari, D.; Alonso, F.; Matyjewski, M.: Subsystem Test for Pedestrian Lower Leg and Knee Protection. Dokument S3-O-08 zur 13. ESV-Konferenz, Paris, 4. – 7. November 1991.

Doré/Evanovitch 1901:

Doré, Edwin Stephen; Evanovitch, Lissie Anne: Befestigung eines V-förmigen Schutzschildes an Motorwagen. Patentschrift Nr. 134042 des Kaiserlichen Patentamtes. – Berlin, 1901.

Eastman 1984:

Eastman, Joel W.: Styling vs. Safety. The American Automobile Industry and the Development of Automotive Safety, 1900-1966. – Lanham; New York; London: University Press of America, 1984.

EC 1992:

o.N. (Commission of the European Communities (EC), Directorate-General for internal market and industrial affairs): Draft proposal for a Council Directive adapting to technical progress Council Directive 74/483/EEC relating to the external projections of motor vehicles including their effect on pedestrians. Dokument Nr. III/4025/92-EN. – Brüssel, 1992.

EC 2001a:

o.N. (European Commission (EC)): Commission concludes talks with car industry and consults Council and Parliament on industry's self-commitment to enhance pedestrian protection. Pressemitteilung der Europäischen Kommission, veröffentlicht auf der Internetseite „Commission Online“ als Dokument Nr. IP/01/986. – Brüssel, 11. Juli 2001. – Online im Internet:
http://europa.eu.int/rapid/start/cgi/guesten.ksh?p_action.gettxt=gt&doc=IP/01/986|0|R APID&lg=EN (2001-07-11).

EC 2001b:

o.N. (Commission of the European Communities (EC)): Draft Directive of the European Parliament and of the Council relating to the protection of pedestrians and other road users in the event of a collision with a motor vehicle and amending directive 70/156/EEC. Dokument Nr. ENTR/6508/01. – Brüssel, 2001.

EEVC 1982:

o.N. (European Experimental Vehicles Committee (EEVC)): Pedestrian injury accidents. Presented to the Ninth ESV Conference / Kyoto / Nov 1982. – Cachan: Imprimerie FLASH-PLAN, o. J.

EEVC 1985:

o.N. (European Experimental Vehicles Committee (EEVC)): Pedestrian Injury Protection by Car Design, Report by an ad hoc group of the European Experimental Vehicles Committee. In: US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration (Herausgeber): [Anm. d. Verf.: Proceedings of the] Tenth International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Oxford / England, July 1 - 4, 1985, S. 965 – 976.

EEVC 1994:

o.N. (European Experimental Vehicles Committee (EEVC)): EEVC Working Group 10 Report. Proposals for methods to evaluate pedestrian protection for passenger cars. November 1994. – Online im Internet: <http://eevc.net/history/wg10/wg10index.html> (2011-07-07).

EEVC 2002:

o.N. (European Enhanced Vehicle-Safety Committee (EEVC)): EEVC Working Group 17 Report. Improved test methods to evaluate pedestrian protection afforded by passenger cars (December 1998 with September 2002 updates). – Online im Internet: <http://www.eevc.org> (2003-11-27).

EEVC 2011a:

o.N. (European Enhanced Vehicle-safety Committee (EEVC)): Introduction to the European Enhanced Vehicle-safety Committee. General information on the activities of the EEVC. – Online im Internet: <http://eevc.net/eevcintroduction/introduction.htm> (2011-07-07).

EEVC 2011b:

o.N. (European Enhanced Vehicle-safety Committee (EEVC)): Introduction to the European Enhanced Vehicle-safety Committee. EEVC Terms of Reference. – Online im Internet: <http://eevc.net/eevcintroduction/termsof.htm> (2011-07-07).

EEVC 2011c:

o.N. (European Enhanced Vehicle-safety Committee (EEVC)): General information on the activities of the EEVC. Active Working Groups. Historic Working Groups. [Vorstellung der EEVC-Aktivitäten im Internet; Anm. d. Verf.] – Online im Internet: <http://eevc.net> (2011-07-07).

ESV 2012:

o.N. (Enhanced Safety of Vehicles Program (ESV)): Who We Are. A Brief History of the ESV Conference. – Online im Internet: <http://www-esv.nhtsa.dot.gov/About%20ESV.htm> (2012-10-27).

EU 2003:

o.N.: Richtlinie 2003/102/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. November 2003 zum Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern vor und bei Kollisionen mit Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates. Veröffentlicht im Amtsblatt der Europäischen Union vom 06.12.2003, S. L 321/15 ff. – Brüssel, 2003.

Euro NCAP 2014:

o.N. (Euro NCAP): About Us – History. . [Vorstellung der Euro-NCAP-Aktivitäten im Internet; Anm. d. Verf.] – Online im Internet: <http://www.euroncap.com/Content-Web-Page/ee0e0c41-f8e8-4cdc-90fe-414ae5883db6/history.aspx> (2014-05-26).

Fritz 2012:

Fritz, Martin: FlexPLI – Machbarkeitsuntersuchung. Internes VDA-Arbeitsdokument zur Sitzung des ad-hoc Arbeitskreises Fußgängerschutz am 18. – 19.04.2012. – o.O., 2012.

Fritz u.a. 2013:

Fritz, Martin; Zander, Oliver; Kinsky, Thomas; Roth, Franz; Lessmann, Peter; Bortenschlager, Klaus; Kolb, Jan Christopher: A new Bone Core for FlexPLI. In: carhs.training gmbh (Veranstalter): Unterlagen zur Konferenz „Grazer SafetyUpdate 2013“, Graz, 17. – 18. September 2013. – Alzenau; 2013.

Gehring 2007:

Gehring, Dirk-Uwe: Report on Tests with the Flexible Pedestrian Legform Impactors Flex GT α and Flex GT. Internes ACEA-Arbeitsdokument 20071004Att08. – Bergisch Gladbach, 22. Mai 2007.

Gehring 2010:

Gehring, Dirk-Uwe: Flexible Pedestrian Legform Impactor, Influence Of Test Parameter Variations On The Flex-PLI. A Joint Project of ACEA – The European Automobile Manufacturers' Association and BAST – The German Federal Highway Research Institute. Final Report, 14.06.2010. Arbeitsdokument TEG-142-Rev.1 zur 12. Sitzung der "FlexPLI Technical Evaluation Group", Bergisch Gladbach, 2. Dezember 2010. – Online im Internet: http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_flexpli.html (2014-05-31).

Gloor 2006:

Gloor, Roger: Was Zahlen sagen. In: Automobil Revue Nr. 4/2006 – Jubiläumsausgabe 1906 – 2006, S. 23ff. – Online im Internet (in Auszügen): <http://www.automobil-revue.ch> (2006-02-21).

Green 1998:

Green, John: A Technical Evaluation of the EEVC Proposal on Pedestrian Protection Test Methodology. On behalf of ACEA Pedestrian Task Force. Dokument 98-S10-O-04 zur 16. ESV-Konferenz, Windsor/Kanada, 31. Mai – 4. Juni 1998.

Green 2000:

Green, John: Summary of Euro NCAP testing and assessment protocols for pedestrian protection. Internes ACEA-Arbeitsdokument 20000652con. – Brüssel, 25. April 2000.

Hahn 1999:

Hahn, Wolfgang: The EU Legislation for Pedestrian Protection – Conflicting Targets and Potential Solutions. In: [Anm. d. Verf.: Proceedings of the] VDA Technical Congress “Where car and future technology meet: safety, energy and environment” Frankfurt/Main, 20. – 21. September 1999.

Hardy u.a. 2006:

Hardy, B.J.; Lawrence, G.J.L.; Carroll, J.A.; Donaldson, W.M.S.; Visvikis, C.; Peel, D.A.: A study on the feasibility of measures relating to the protection of pedestrians and other vulnerable road users; Hardy, B.J.; Lawrence, G.J.L.; Knight, I.M.; Carroll, J.A.: Final 2006; Project report UPR/VE/045/06 under contract No. ENTR/05/17.01 of the European Commission, DG ENTR; October 2006. – Online im Internet: <http://ec.europa.eu/enterprise/automotive/> (2009-06-15).

Harris 1991:

Harris, J.: Proposals for Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection for Cars. Dokument S3-O-06 zur 13. ESV-Konferenz, Paris, 4. – 7. November 1991.

Hochschularbeitsgemeinschaft 1983⁶⁷:

o.N. (Hochschularbeitsgemeinschaft IKA Aachen, IFT Berlin, FKFS Stuttgart, FZD Darmstadt): UNI-CAR. Der Forschungs-Personenwagen der Hochschularbeitsgemeinschaft - Schlußbericht. Gefördert vom Bundesminister für Forschung und Technologie, Förderkennzeichen: TV 7985; Berichtszeitraum: 1.10.1979 – 31.12.1982. – Darmstadt: Munkelt Druck GmbH, 1983.

Humanetics 2011:

o.N. (Humanetics): FLEX PLI Upgrade Status / TEG Webex Meeting / May 11, 2011. Arbeitsdokument für die geplante 13. Sitzung der “FlexPLI Technical Evaluation Group”. – Nicht öffentlich verfügbar⁶⁸.

⁶⁷ Auch zitiert als „Breuer u.a. 1983: Breuer, Bert; Helling, Jürgen; Appel, Hermann; Willumeit, Hans-Peter; Essers, Ulf: UNI-CAR. Der Forschungs-Personenwagen der Hochschularbeitsgemeinschaft - Schlußbericht. Gefördert vom Bundesminister für Forschung und Technologie, Förderkennzeichen: TV 7985; Berichtszeitraum: 1.10.1979 – 31.12.1982. – Darmstadt: Munkelt Druck GmbH, 1983.“

⁶⁸ Die 13. Sitzung der TEG war für den 11. Mai 2011 geplant, wurde aber verschoben. Danach fand die Sitzung nie statt, weil zwischenzeitlich entschieden worden war, eine spezielle Arbeitsgruppe für die Diskussion der 2. Phase der GTR Nr. 9 ins Leben zu rufen. Die Präsentation von Humanetics war im Vorfeld der geplanten Sitzung allen Beteiligten zur Verfügung gestellt worden.

IHRA PS 2002:

o.N. (JARI, NHTSA and RARU): Computer Simulation Analysis for Pedestrian Head Impact Condition. Internes IHRA-Arbeitsdokument IHRA/PS 215 für die Sitzung der IHRA-Arbeitsgruppe "Pedestrian Safety" im Juni 2002 in Washington D.C. – Washington, 2002.

IHRA PS 2005:

o.N.: International Harmonized Research Activities. Pedestrian Safety Working Group. 2005 Report (Draft). March 2005. Dokument IHRA/PS/311N4 – Nicht öffentlich verfügbar⁶⁹.

INF GR PS 2004:

o.N.: Informal Group on Pedestrian Safety (INF GR PS): 7th meeting, Paris, 28 – 30 September 2004, draft detailed meeting minutes. Dokument INF GR/PS/115/Rev 1 der UNECE-Arbeitsgruppe zur Fußgängersicherheit. – Online im Internet: http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_7.html (2014-05-31).

Ishaque/Noland (ohne Jahr):

Ishaque, Muhammad M.; Noland, Robert B.: Making Roads Safe for Pedestrians or Keeping them Out of the Way? – An Historical Perspective on Pedestrian Policies in Britain. Undatiertes Poster des Centre for Transport Studies am Imperial College London. – Online im Internet: <http://www.cts.cv.ic.ac.uk/documents/poster/poster00845.pdf> (2012-09-15).

JAMA/JARI 2009:

o.N. (Japan Automobile Manufacturers Association (JAMA); Japan Automobile Research Institute (JARI)): JAMA Round Robin Tests Using the Flex-GTR-prototype (SN03). Arbeitsdokument TEG-088 zur 8. Sitzung der "FlexPLI Technical Evaluation Group", Köln (Cologne), 19. Mai 2009. – Online im Internet: http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_flexpli.html (2014-05-31).

Janssen 1996:

Janssen, E.G.: EEVC Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars. On behalf of EEVC WG10. Dokument 96-S7-W-17 zur 15. ESV-Konferenz, Melbourne/Australien, 13. – 16. Mai 1996.

⁶⁹ Nach dem Kenntnisstand des Verfassers wurde der Abschlussbericht nicht offiziell publiziert; der Entwurf wurde aber auch außerhalb der entsprechenden Arbeitsgruppe verteilt.

JASIC 2004:

o.N. (Japan Automobile Standards Internationalization Center (JASIC)): 2004 Automobile Type Approval Handbook for Japanese Certification ("Blue Book"). Veröffentlicht als CD-ROM. – Tokio, 2004.

Kallieris/Schmidt/Miltner 1991:

Kallieris, D.; Schidt, Gg.; Miltner, E.: Experimentelle Untersuchungen von Fußgängerunfällen. In: Rechtsmedizin, Ausgabe 1/1991, S. 17 – 23. – Berlin: Springer-Verlagsgruppe 1991.

Kinsky 2007:

Kinsky, Thomas: Gesetzesvorgaben zum Fußgängerschutz. In: Unterlagen zur 3. EUROFORUM-Jahrestagung Fußgängerschutz, München, 17. – 18. Januar 2007.

Kinsky 2008:

Kinsky, Thomas: Fußgängerschutz aus der Sicht eines global agierenden Fahrzeugherstellers. In: carhs.training gmbh; BGS Böhme und Gehring GmbH (Veranstalter): Unterlagen zur 3. Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Bergisch Gladbach, 11. – 12. Juni 2008. – Alzenau; Bergisch Gladbach, 2008.

Kinsky 2009a:

Kinsky, Thomas: First Experiences of a Manufacturer with FlexPLI. Arbeitsdokument TEG-091 zur 8. Sitzung der "FlexPLI Technical Evaluation Group", Köln (Cologne), 19. Mai 2009. – Online im Internet:
http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_flexpli.html (2014-05-31).

Kinsky 2009b:

Kinsky, Thomas: Pedestrian Protection as Challenge for Modern Automotive Engineering. Referat und Präsentation, 18. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik. In: fka Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbh Aachen (Herausgeber): Tagungsband zum 18. Aachener Kolloquium, S. 1587 ff. (nur Referat) – Aachen, Oktober 2009.

Kinsky 2011a:

Kinsky, Thomas: Pedestrian Protection, Update Status 9 September 2011. In: carhs.training gmbh (Veranstalter): Unterlagen zur Konferenz „Grazer SafetyUpdate 2011“, Graz, 28. – 29. September 2011. – Alzenau; 2011.

Kinsky 2011b:

Kinsky, Thomas: FlexPLI Version GTR Prototype SN-02 – Durability Assessment.

Arbeitsdokument GTR9-1-04c zur 1. Sitzung der „Informal Group on gtr No 9 –Phase 2 (IG GTR9-PH2)“ Genf/Schweiz, 1. – 2. Dezember 2011. – Online im Internet: <https://www2.unece.org/wiki/display/trans/GTR9-2+1st+session> (2014-05-23).

Kinsky/Bünger 2013:

Kinsky, Thomas; Bünger, Benjamin: FlexPLI Version GTR Determination of the Impact Velocity. Internes VDA-Arbeitsdokument zur Sitzung des ad-hoc Arbeitskreises Fußgängerschutz am 28.11.2013. – o.O., 2013.

Kinsky/Friesen/Buenger 2011:

Kinsky, Thomas; Friesen, Flavio; Buenger, Benjamin: The Flexible Pedestrian Legform Impactor and its Impact on Vehicle Design. Dokument 11-0328 sowie Präsentation zur 22. ESV-Konferenz, Washington D.C., 13. – 16. Juni 2011. – Online im Internet (nur Dokument): <http://www.nhtsa.gov/ESV> (2013-08-13).

Kinsky/Sommer/Hochgesand 2013:

Kinsky, Thomas; Sommer, Stephan; Hochgesand, Holger: FlexPLI Testing: Propelling Accuracy. Arbeitsdokument GTR9-6-03 zur 6. Sitzung der UNECE “Informal Group on gtr No. 9 – Phase 2”, Washington D.C., 19. – 20. März 2013. – Online im Internet: <https://www2.unece.org/wiki/display/trans/GTR9-2+6th+session> (2014-05-31).

Knotz 2004:

Knotz, Christoph: Comparison Tests Using a TRL Legform Impactor and a JARI Flexible Pedestrian Legform Impactor. Test Report Nr. 10160/FGS/01 Rev.2 der Fa. Concept Technologie im Auftrag des Europäischen Automobilhersteller-Verbandes ACEA. – Gratkorn, 07.06.2004.

Kolb u.a. 2012:

Kolb, Jan Christopher; Folcini, Daniel; Rieger, Sebastian; Kinsky, Thomas: FlexPLI – Round Robin Tests (Update And Additions To Results Presented With Documents TF-RUCC-3-05 and TF-RUCC-4-03). Arbeitsdokument GTR9-5-05-Rev.2 zur 5. Sitzung der UNECE “Informal Group on gtr No. 9 – Phase 2”, Bergisch Gladbach, 6. – 7. Dezember 2012. – Online im Internet: <https://www2.unece.org/wiki/display/trans/GTR9-2+5th+session> (2014-05-31).

Konosu 2005:

Konosu, Atsuhiko: General Information for the Flexible Pedestrian Legform Impactor – type G (Flex-G). Arbeitsdokument TEG-002 zur 1. Sitzung der “FlexPLI Technical Evaluation Group”, Paris, 5. – 6. September 2005. – Online im Internet:

http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_flexpli.html
(2014-05-31).

Konosu 2006:

Konosu, Atsuhiko: Information on the Flexible Pedestrian Legform Impactor GT Alpha (Flex-GT α). Arbeitsdokument TEG-021 zur 3. Sitzung der "FlexPLI Technical Evaluation Group", Bergisch Gladbach, 24. April 2006. – Online im Internet: http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_flexpli.html (2014-05-31).

Konosu u.a. 2011:

Konosu, Atsuhiko; Issiki, Takahiro; Takahashi, Yukou; Suzuki, Hideki; Been, Bernard; Burleigh, Mark; Hirasawa, Takahiro; Kanoshima, Hitoshi: Development of a Biofidelic Flexible Pedestrian Legform Impactor Type GTR Prototype (Flex-GTR-Prototype) – Development and Technical Evaluations. Präsentation zur Sitzung mit USCAR⁷⁰ am 25. März 2011. – Nicht öffentlich verfügbar⁷¹.

Konosu/Ishikawa/Tanahashi 2001:

Konosu, Atsuhiko; Ishikawa, Hirotoshi; Tanahashi, Masaaki: Reconsideration of injury criteria for pedestrian subsystem legform test – problems of rigid legform impactor. Dokument 01-S8-O-263 zur 17. ESV-Konferenz, Amsterdam, 4. – 7. Juni 2001. – Online im Internet: <http://www.nhtsa.gov/ESV> (2013-08-13).

Konosu/Issiki/Suzuki 2007:

Konosu, Atsuhiko; Issiki, Takahiro; Suzuki, Hideko: Information on the Flexible Pedestrian Legform Impactor Type GT (FLEX-GT). Arbeitsdokument TEG-033 zur 4. Sitzung der "FlexPLI Technical Evaluation Group", Bergisch Gladbach, 2. April 2007. – Online im Internet: http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_flexpli.html (2014-05-31).

Konosu/Issiki/Tanahashi 2005:

Konosu, Atsuhiko; Issiki, Takahiro; Tanahashi, Masaaki: Development of a Biofidelic Flexible Pedestrian Legform Impactor (FlexPLI 2004) and Evaluation of its Biofidelity at the Component Level and at the Assembly Level. In: SAE International, (Herausgeber): 2005 SAE World Congress, Detroit, 11. – 14. April 2005. – Warrendale/USA, 2005.

⁷⁰ United States Council for Automotive Research (deutsch: Rat der Vereinigten Staaten [von Amerika; Anm. d. Verf.] für Fahrzeugforschung) [ein gemeinsames Forschungsgremien der US-Autohersteller Chrysler, Ford und General Motors; Anm. d. Verf.]

⁷¹ Die Präsentation wurde den Beteiligten zur Verfügung gestellt.

Konosu/Tanahashi 2003a:

Konosu, Atsuhiko; Tanahashi, Masaaki: Development of a Biofidelic Pedestrian Legform Impactor – Introduction of JAMA-JARI Legform Impactor Ver. 2002. Dokument 378 zur 18. ESV-Konferenz, Nagoya, 19. – 22. Mai 2003. – Online im Internet: <http://www.nhtsa.gov/ESV> (2013-08-13).

Konosu/Tanahashi 2003b:

Konosu, Atsuhiko; Tanahashi, Masaaki: Development of a Biofidelic Flexible Pedestrian Legform Impactor. In: Stapp Car Crash Journal, Vol. 47 (October 2003), S. 459 – 472.

Konosu/Tanahashi 2003c:

Konosu, Atsuhiko; Tanahashi, Masaaki: Development of a Biofidelic Flexible Pedestrian Legform Impactor (Flex-PLI 2003). Dokument IHRA/PS 273 für die Sitzung der IHRA-Arbeitsgruppe “Pedestrian Safety” im Oktober 2003 in San Diego/USA bzw. Arbeitsdokument PS-87 der UNECE „Informal Group on Pedestrian Safety“. - Online im Internet: http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_7.html (2013-08-13).

Konosu/Zander 2009:

Konosu, Atsuhiko; Zander, Oliver: Technical Background Information Document for the UN-ECE GRSP explaining the Derivation of Threshold Values and Impactor Certification methods for the FlexPLI version GTR agreed by the FlexPLI-TEG at their 9th Meeting. Arbeitsdokument TEG-127 zur 10. Sitzung der “FlexPLI Technical Evaluation Group”, Bergisch Gladbach, 1. - 2. Dezember 2009. – Online im Internet: http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_flexpli.html (2014-05-31).

Kress/Porta 2001:

Kress, Tyler A.; Porta, David J.: Characterization of leg injuries from motor vehicle impacts. Dokument 443 zur 17. ESV-Konferenz, Amsterdam, 4. – 7. Juni 2001. – Online im Internet: <http://www.nhtsa.gov/ESV> (2013-08-13).

Kuehn/Froeming/Schindler 2005:

Kuehn, Matthias; Froeming, Robert; Schindler, Volker: Assessment of Vehicle Related Pedestrian Safety. Dokument 05-0044 zur 19. ESV-Konferenz, Washington D.C., 6. – 9. Juni 2005. – Online im Internet: <http://www.nhtsa.gov/ESV> (2013-08-13).

Kusche u.a. 2012:

Kusche, J.; Kinsky, Th.; Otubushin, A.; Ries, O.: Discussion on Feasibility of FlexPLI Countermeasures. Arbeitsdokument GTR9-5-07c2 zur 5. Sitzung der UNECE "Informal Group on gtr No. 9 – Phase 2", Bergisch Gladbach, 6. – 7. Dezember 2012. – Online im Internet: <https://www2.unece.org/wiki/display/trans/GTR9-2+5th+session> (2014-05-31).

Lawrence 2005:

Lawrence, Graham J.L.: The Next Steps for Pedestrian Protection Test Methods. Dokument 05-0379 zur 19. ESV-Konferenz, Washington D.C., 6. – 9. Juni 2005. – Online im Internet: <http://www.nhtsa.gov/ESV> (2013-08-13).

Lawrence/Hardy 1998:

Lawrence, Graham J.L.; Hardy, Brian J.: Pedestrian Safety Testing Using the EEVC Pedestrian Impactors. Dokument 98-S10-O-03 zur 16. ESV-Konferenz, Windsor/Kanada, 31. Mai – 4. Juni 1998. – Online im Internet: <http://www.nhtsa.gov/ESV> (2013-08-13).

Leßmann/Gehring 2009:

Leßmann, Peter; Gehring, Dirk-Uwe: BASt/ACEA Test Series with three Prototypes of the Flexible Pedestrian Legform Impactor Flex GTR. Arbeitsdokument TEG-089 zur 8. Sitzung der "FlexPLI Technical Evaluation Group", Köln (Cologne), 19. Mai 2009. – Online im Internet: http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_flexpli.html (2014-05-31).

Liers/Hannawald/Brehme 2007a:

Liers, Henrik; Hannawald, Lars; Brehme, Heinz: Scope Extension of Pedestrian Legislation to Vehicles above 2500 kg Gross Vehicle Weight. Under contract of the European Automobile Manufacturers' Association (ACEA). – Dresden, Juni 2007.

Liers/Hannawald/Brehme 2007b:

Liers, Henrik; Hannawald, Lars; Brehme, Heinz: Scope Extension of Pedestrian Legislation to Vehicles above 2500 kg Gross Vehicle Weight – presentation of preliminary results. Präsentation von Zwischenergebnissen zur Sitzung der VUFO mit einer Projektgruppe des Europäischen Automobilherstellerverbandes ACEA am 12.04.2007, Internes ACEA-Arbeitsdokument 20070655Att02. – Dresden, 2007.

Lorenz 2009:

Lorenz, Bernd: Grundlagen und aktueller Stand der internationalen Vorschriften [zum Fußgängerschutz; Anm. d. Verf.]. In: carhs.training gmbh; BGS Böhme und Gehring

GmbH (Veranstalter): Unterlagen zur 4. Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Bergisch Gladbach, 23. – 24. Juni 2009. – Alzenau; Bergisch Gladbach, 2009.

Mallory/Stammen/Legault 2005:

Mallory, Ann; Stammen, Jason; Legault, France: Component leg testing of vehicle front structures. Dokument 05-0194 zur 19. ESV-Konferenz, Washington D.C., 6. – 9. Juni 2005. – Online im Internet: <http://www.nhtsa.gov/ESV> (2013-08-13).

Matsui u.a. 1999:

Matsui, Yasuhiro; Ishikawa, Hirotooshi; Sasaki, Akira; Kajzer, Janusz; Schroeder, Günter: Impact response and biofidelity of pedestrian legform impactors. In: IRCOBI (Herausgeber): Proceedings of the 1999 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impact, September 23 – 24, 1999, Sitges, Spain, S. 343 – 354. – Bron / Frankreich, 1999.

MedicineNet.com 2011:

o.N. (MedicineNet.com): Definition of Knee Joint. – Online im Internet: <http://www.medterms.com/script/main/art.asp?articlekey=8845> (2011-03-09)

o.N. 2009:

o.N. (Japan): Technical Evaluation Tests for the Flex-GTR-prototype Repeatability & Reproducibility of the Flex-GTR-prototype and Comparability between Flex-GT and Flex-GTR-prototype. Dokument TEG-072-Rev.1 zur 8. Sitzung der “FlexPLI Technical Evaluation Group”, Köln (Cologne), 19. Mai 2009. – Online im Internet: http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_flexpli.html (2014-05-31).

OECD/ITF 2012:

o.N. (Organisation for Economic Co-operation and Development/International Transport Forum): Pedestrian Safety, Urban Space and Health. – Paris: OECD publishing, 2012. – ISBN 978-92-821-0364-7.

OECD/ITF 2013:

o.N. (Organisation for Economic Co-operation and Development/International Transport Forum): Road Safety Annual Report 2013 / IRTAD 2013 Annual Report. – Paris, 2013. – Online im Internet: <http://internationaltransportforum.org/Pub/pdf/13IrtadReport.pdf> (2014-01-14).

Pace u.a. 2012:

J. F. Pace u.a.: Traffic Safety Basic Facts 2012, Pedestrians. Deliverable D3.9 of the EC FP7 [European Commission 7th Framework Programme; Anm. d. Verf.] project

DaCoTA. – Online im Internet:

http://ec.europa.eu/transport/road_safety/pdf/statistics/dacota/bfs20xx_dacota-intrast-pedestrians.pdf (2014-02-16).

Roth 2013:

Roth, Franz: FlexPLI behaviour in outer area. Arbeitsdokument TF-BTA-3-03 zur 3. Sitzung der "Task Force Bumper Test Area" innerhalb der UNECE "Informal Group on gtr No. 9 – Phase 2", Washington D.C., 18. März 2013. – Online im Internet: <https://www2.unece.org/wiki/display/trans/TF-BTA+3rd+session> (2014-05-27).

Schmitt 2008:

Schmitt, Kai-Uwe: Biomechanik und Computersimulationen von Fußgängerkollisionen. In: carhs.training gmbh; BGS Böhme und Gehring GmbH (Veranstalter): Unterlagen zur 3. Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Bergisch Gladbach, 11. – 12. Juni 2008. – Alzenau; Bergisch Gladbach, 2008.

Schmitt 2013a:

Schmitt, Winfried: Assessment on vehicle tested with Lower Legform at limits of BTA [Bumper Test Area; Anm. d. Verf.] and beyond. Arbeitsdokument TF-BTA-3-07 zur 3. Sitzung der "Task Force Bumper Test Area" innerhalb der UNECE "Informal Group on gtr No. 9 – Phase 2", Washington D.C., 18. März 2013. – Online im Internet: <https://www2.unece.org/wiki/display/trans/TF-BTA+3rd+session> (2014-05-27).

Schmitt 2013b:

Schmitt, Winfried: Velocity measurement, Measurement of FlexPLI during testing. Internes VDA-Arbeitsdokument (endgültige Version datiert auf den 02.12.2013) zur Sitzung des ad-hoc Arbeitskreises Fußgängerschutz am 28.11.2013. – o.O., 2013.

Schuessler 2010:

Schuessler, Andreas: Ultraflat Overrunable Carrier for experimental ADAS Testing. In: carhs.training gmbh; BGS Böhme und Gehring GmbH (Veranstalter): Unterlagen zur 5. Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Bergisch Gladbach, 30. Juni – 1. Juli 2010. – Alzenau; Bergisch Gladbach, 2010.

Siems u.a. 2007:

Siems, Sven Olav; Zander, Oliver; Leßmann, Peter; Gehring, Dirk-Uwe; Bortenschlager, Klaus; Barnsteiner, Karl; Ferdinand, Leonard; Hartlieb, Markus; Kramberger, David; Zeugner, Manfred: Evaluation of the effects of test parameters on the results of the lower legform impactor. Dokument 07-0009 zur 20. ESV-Konferenz, Lyon/Frankreich, 18. – 21. Juni 2007. – Online im Internet: <http://www.nhtsa.gov/ESV> (2013-08-13).

Singer/Wortmann 1925:

Singer, Jacob; Wortmann, Béla: Fangvorrichtung an Kraftfahrzeugen. Patentschrift Nr. 422259 des Reichspatentamtes. – Berlin, 1925.

Statistik Austria 2013:

o.N. (Statistik Austria (Bundesanstalt Statistik Österreich)): Straßenverkehrsunfälle. Jahresergebnisse 2012. Straßenverkehrsunfälle mit Personenschaden.

Schnellbericht 4.3. – Wien, 2013. - Online im Internet:

http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/unfaelle_mit_personenschaden/index.html (2014-01-22).

Statistisches Bundesamt 2006:

o.N. (Statistisches Bundesamt): Autofahren vor 100 Jahren viel gefährlicher als heute. DeStatis-Pressemitteilung vom 4. April 2006. – Wiesbaden, 2006.

Statistisches Bundesamt 2013:

o.N. (Statistisches Bundesamt): Unfallentwicklung auf deutschen Straßen 2012.

Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 12. Juli 2013 in Berlin. – Wiesbaden, 2013.

Statistisches Bundesamt 2014:

o.N. (Statistisches Bundesamt): [Anm. d. Verf.: Online-Veröffentlichung von Grafiken auf der Internetseite unter der Rubrik] Straßenverkehrsunfälle anschaulich.

Gesamtentwicklung nach Jahren. – Online im Internet:

<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/Verkehrsunfaelle.html> (2014-01-20).

Tinard u.a. 2008:

Tinard, Violaine; Deck, Caroline; Neale, Mike; Willinger, Remy: Improved Head Injury Criteria based on FEM. In: Beiträge zum APROSYS-Workshop „Initial Concepts for New or Improved Vulnerable Road User Test Methods“, Brüssel, 19. Juni 2008. – Online im Internet: <http://www.aprosys.com> (2008-06-23).

UNECE 2009:

o.N. (United Nations Economic Commission for Europe): Global technical regulation No. 9 Pedestrian Safety, Established in the Global Registry on 12 November 2008.

Dokument Nr. ECE/TRANS/180/Add.9 vom 26. Januar 2009. – Online im Internet:

http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29glob_registry.html (2013-04-30).

UNECE 2014:

o.N. (United Nations Economic Commission for Europe): Proposal for the 01 series of amendments to Regulation No. 127 (Pedestrian safety), Submitted by the Working Party on Passive Safety. Arbeitsdokument Nr. ECE/TRANS/WP.29/2014/38 vom 28. März 2014 zur 163. Sitzungsperiode des „World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations“ (WP.29), Genf, 24. - 27. Juni 2014. – Online im Internet: <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/gen2014.html> (2014-05-31).

VDA 2001:

o.N. (Verband der Automobilindustrie): Fußgängerschutz-Debatte im Europäischen Parlament. Interne VDA-Mitteilung vom 10.10.2011. – o.O., 2001.

von Rotz 2012:

von Rotz, Bruno: Wenn die Zukunft Vergangenheit wird. In: Zwischengas.com – Blog vom 22.12.2012 – Online im Internet: <http://www.zwischengas.com/de/blog/2012/12/22/Wenn-die-Zukunft-Vergangenheit-wird.html> (2013-06-23).

Wallentowitz 2007:

Wallentowitz, Henning: Zukünftig realisierte Lösungen für den Fußgängerschutz sowie denkbare Erweiterungen. In: Konferenzunterlagen zur 1. VKU-Fachkonferenz Fußgängerschutz und Fußgängerunfälle, 7. – 8. Dezember 2007, Aachen. – Aachen, 2007.

Wakeland 1965:

Wakeland, Henry H.: Systematic Automobile Design for Pedestrian Injury Prevention. In: Federal Role in Traffic Safety. Hearings before the Subcommittee on Executive Reorganization of the Committee on Government Operations / United States Senate / Eighty Ninth Congress / First Session: Traffic Safety: Examination and Review of Efficiency, Economy, and Coordination of Public and Private Agencies' Activities and the Role of the Federal Government. July 13, 14, 15, and 21, 1965, S. 1050 – 1075. – Washington: US Government Printing Office, 1966.

Wanke/Thompson/Kerkeling 2005:

Wanke, Thomas; Thompson, Grace; Kerkeling, Christoph: Pedestrian Measures for the Opel Zafira II. Dokument 05-0237 sowie Präsentation zur 19. ESV-Konferenz, Washington D.C., 6. – 9. Juni 2005. – Online im Internet (nur Dokument): <http://www.nhtsa.gov/ESV> (2013-08-13).

Wikipedia/Fußgängerüberweg (ohne Jahr):
o.N. (Wikipedia, Die freie Enzyklopädie): Fußgängerüberweg. – Online im Internet:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Fußgänger> (2012-09-16).

Wikipedia/Fußverkehr (ohne Jahr):
o.N. (Wikipedia, Die freie Enzyklopädie): Fußverkehr (Weitergeleitet von Fußgänger).
– Online im Internet: <http://de.wikipedia.org/wiki/Fußgänger> (2011-08-24).

Wikipedia/Locomotive Act (ohne Jahr):
o.N. (Wikipedia, the free encyclopedia): Locomotive Acts. – Online im Internet:
http://en.wikipedia.org/wiki/Locomotive_Act (2012-07-12).

Wittek u.a. 2001:
Wittek, Adam; Konosu, Atsuhiko; Matsui, Yasuhiro; Ishikawa, Hirotoshi; Sasaki, Asira;
Shams, Tariq; McDonald, Jason: A new legform impactor for evaluation of car
aggressiveness in car-pedestrian accidents. Dokument 184 zur 17. ESV-Konferenz,
Amsterdam, 4. – 7. Juni 2001. – Online im Internet: <http://www.nhtsa.gov/ESV>
(2013-08-13).

Zander 2010:
Zander, Oliver: Flex-GTR: Proposal for ACL/PCL injury threshold. Arbeitsdokument
TEG-130 zur 11. Sitzung der “FlexPLI Technical Evaluation Group”, Bergisch
Gladbach, 21. April 2010. – Online im Internet:
http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp/pedestrian_flexpli.html
(2014-05-31).

Zander 2012:
Zander, Oliver: Refinement of Corridors for FlexPLI Dynamic Assembly Certification
Tests. Arbeitsdokument TF-RUCC-4-04 zur 4. Sitzung der “Task Force on Review
and Update of Certification Corridors” innerhalb der UNECE “Informal Group on gtr
No. 9 – Phase 2”, o.O., 18. Juni 2012. – Online im Internet:
<https://www2.unece.org/wiki/display/trans/TF-RUCC+4th+session> (2014-05-31).

Zander/Gehring/Leßmann 2013:
Zander, Oliver; Gehring, Dirk-Uwe; Leßmann, Peter: FlexPLI Pre- and Post-Test
Procedure. Arbeitsdokument GTR9-6-10 zur 6. Sitzung der UNECE “Informal Group
on gtr No. 9 – Phase 2”, Washington D.C., 19. – 20. März 2013. – Online im Internet:
<https://www2.unece.org/wiki/display/trans/GTR9-2+6th+session> (2014-05-31).

Zeugner/Kinsky/Sommer 2012:
Zeugner, Manfred; Kinsky, Thomas; Sommer, Stephan: The Integration of the new

Flexible Pedestrian Legform Impactor (FlexPLI) into an existing Test Rig Environment. Dokument sowie Präsentation für die Konferenz „crash.tech 2012“. In (nur Dokument): TÜV Süd Automotive GmbH; TÜV Süd Akademie GmbH (Veranstalter): Unterlagen zur Konferenz crash.tech 2012, München, 24.– 25. April 2012. – München, 2012.

Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen

%	Prozent
“	Zoll
Abb.	Abbildung
ABS	Antiblockiersystem
ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (deutsch: Europäischer Automobilhersteller-Verband)
ADAS	Advanced Driver Assistant System (deutsch: Hochentwickeltes Fahrerassistenzsystem)
AG	Arbeitsgruppe
AIS	Abbreviated Injury Scale (deutsch: Abgekürzte Verletzungsskala)
Anm. d. Verf.	Anmerkung des Verfassers
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen (Deutschland)
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa (ungefähr)
cm	Zentimeter
DaCoTA	Road Safety Data Collection, Transfer and Analysis (deutsch: Sammlung, Übertragung und Analyse von Daten zur Verkehrssicherheit)
d.h.	das heißt
EEVC	European Experimental Vehicles Committee (deutsch: Europäisches Komitee für Experimentalfahrzeuge), später umbenannt in European Enhanced Vehicle-Safety Committee (deutsch: Europäisches Komitee für verbesserte Fahrzeugsicherheit)
ERSO	European Road Safety Observatory (deutsch: Europäische Verkehrssicherheitsbeobachtung)
ESV	Experimental Safety Vehicles (deutsch: Experimentalsicherheitsfahrzeuge [gemeint sind Experimentalfahrzeuge für die (Fahrzeug-) Sicherheit; Anm. d. Verf.]); später umbenannt in Enhanced Safety of Vehicles (deutsch: Verbesserte Sicherheit von Fahrzeugen)
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (Deutschland)
f.	und folgende Seite
ff.	und folgende Seiten
FlexPLI	Flexible Pedestrian Legform Impactor (deutsch: Flexibler Fußgänger-Beinform-Prüfkörper)

GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GIDAS	German In-Depth Accident Study (deutsch: Deutsche Detail-Unfallstudie) [gemeint ist eine Langzeitstudie mit detaillierten Erhebungen, Rekonstruktionen und Auswertungen von Unfalldaten zum Zweck der wissenschaftlichen Unfall- und Verkehrssicherheitsforschung; Anm. d. Verf.]
GPS	Global Positioning System (deutsch: Globales Positionsbestimmungssystem [globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung; Anm. d. Verf.]
GTR	Global Technical Regulation (deutsch: Globale Technische Regelung) (UNECE)
IHRA	International Harmonized Research Activities (deutsch: International harmonisierte Forschungsaktivitäten)
INRETS	Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (deutsch: Nationales Institut für Forschung zum Verkehr und seine Sicherheit) (Frankreich)
IRCOBI	International Research Council on Biomechanics of Injury (deutsch: Internationaler Forschungsrat für die Biomechanik der Verletzung)
IRTAD	International Road Traffic and Accident Database (deutsch: Internationale Straßenverkehrs- und Unfalldatenbank)
ITF	International Transport Forum (deutsch: Weltverkehrsforum)
JAMA	Japan Automobile Manufacturers Association (deutsch: Japanischer Automobilhersteller-Verband)
JARI	Japan Automobile Research Institute (deutsch: Japanisches Automobil-Forschungsinstitut)
JASIC	Japan Automobile Standards Internationalization Center (deutsch: Japanisches Automobilanforderungen-Internationalisierungszentrum) [gemeint ist das Japanische Zentrum für die Internationalisierung von Anforderungen an Automobile; Anm. d. Verf.]
kg	Kilogramm
km/h	Kilometer pro Stunde
LAB	Laboratoire d'Accidentologie, de Biomécanique et d'étude du comportement humain (deutsch: Labor für Unfallursachenforschung, Biomechanik sowie das Verhalten des Menschen) (Frankreich)
mph	Miles per Hour (deutsch: Meilen pro Stunde)
ms	Millisekunden
NATO	North Atlantic Treaty Organization (deutsch: Nordatlantikpakt)

NHTSA	National Highway Traffic Safety Agency (deutsch: Nationale Agentur für Fernstraßenverkehrssicherheit) [US-amerikanische Verkehrs-sicherheitsbehörde; Anm. d. Verf.]
Nm	Newtonmeter
o.J.	ohne Jahr
o.N.	ohne Namen
o.O.	ohne Ort
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development (deutsch: Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
PMTO	Post-Mortem-Testobjekte [gemeint sind Leichen bzw. manchmal auch Leichenteile; Anm. d. Verf.]
S.	Seite
TF-RUCC	Task Force on Review and Update of [FlexPLI; Anm. d. Verf.] Certification Corridors (deutsch: [Anm. d. Verf.: Ad-hoc] Arbeits-gruppe für die Bewertung und Verbesserung der Zertifizierungs-korridore)
TH	Technische Hochschule
THUMS	Total Human Body Model for Safety (deutsch: Vollständiges menschliches Körpermodell für die [Anm. d. Verf.: Fahrzeug-] Sicherheit)
TNO	Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek (deutsch: Niederländische Organisation für angewandte naturwissenschaftliche Untersuchungen)
TRIAS	Test Requirements and Instructions for Automobile Standards (deutsch: Testanforderungen und Anweisungen für Fahrzeugstandards)
TRL	Transport Research Laboratory (deutsch: Transportforschungslabor) (Großbritannien)
TU	Technische Universität
u.a.	und andere
UfO	Ultraflat Overrunable Carrier for experimental Advanced Driver Assistent Systems' Testing (deutsch: Ultraflacher, überfahrbarer Lastenträger für das experimentelle Testen von hochentwickelten Fahrerassistenzsystemen)
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe (deutsch: Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen)
VERPS	Vehicle Related Pedestrian Safety Index (deutsch: fahrzeugbezogener Fußgängersicherheitsindex)
vgl.	vergleiche

VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik [Fachzeitschrift; Anm. d. Verf.]
VUFO Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present doctoral dissertation.

17.9.2014

Datum / Date



Unterschrift / Signature