

Eberhard Faerber

Bewertung der Fahrzeug-Fußraumintrusionen beim Offset Frontaltest gegen das Verformungselement

1 Vorbemerkungen

Zur Bewertung der Fußraumdeformationen von Pkw in einem Frontalaufprall gab es bisher nur das Testverfahren nach der Regelung Nr. 33 der Economic Commission for Europe (ECE) der Vereinten Nationen. Nach diesem Testverfahren muß ein fahrfertiger Pkw mit 48,3 km/h (30 mph) frontal gegen eine starre Wand gefahren werden, die senkrecht und rechtwinklig zur Bewegungsrichtung des aufprallenden Fahrzeugs steht, gefahren werden. Testgewicht des Fahrzeugs ist das Leergewicht; es müssen keine Meßpuppen (Dummies) eingesetzt werden [1]. Hauptbestandteil der Bewertung der Fußraumdeformationen und auch des verbleibenden Überlebensraumes ist der Nachweis, daß an jedem der Vordersitze vier Maße nicht unterschritten werden:

- der Abstand zwischen dem am weitesten vorstehenden Punkt des Armaturenbrettes 150 mm rechts und links von der Mittelebene des betreffenden Sitzes und der vertikalen Querebene durch den H-Punkt (Hüftpunkt) muß ≥ 450 mm sein,
- der horizontale Abstand zwischen der Spritzwand und der vertikalen Querebene durch den H-Punkt (Hüftpunkt) durch die Bremspedalmitte gemessen muß ≥ 650 mm sein,
- die Fußraumbreite in Höhe der Bremspedalmitte gemessen muß ≥ 250 mm sein und
- der Abstand zwischen Fahrzeugboden und -Dach, zu messen durch den H-Punkt, darf sich nicht mehr als 10 % verringern.

Diese Regelung wurde bereits 1976 von mehreren Mitgliedstaaten der ECE unterzeichnet, aber nicht von Deutschland und dementsprechend auch nie in deutsches Recht übernommen. Der wichtigste Grund hierfür ist darin zu sehen, daß diese Regelung Konstruktionsvorschriften und nicht, wie es die Praxis und die Möglichkeit der freien Entfaltung des technischen Fortschritts erfordern, Leistungsanforderungen enthält.

2 Problemstellung

Etwa Mitte der 80er Jahre entdeckten insbesondere Unfallforscher aus dem Hause Mercedes Benz [2], daß Fußverletzungen von besonderer Bedeutung im Frontalunfallgeschehen sind: die Verletzungen sind zwar selten lebensbedrohend, aber die Kosten für ihre Heilung sind vielfach beträchtlich. Die Verletzungen führen nicht selten zu einer bleibenden Minderung der Erwerbsfähigkeit. Um mögliche Verletzungsrisiken in Crashtesten erfassen zu können, wurde an den Dummies der neuesten Generation (Hybrid III) die Möglichkeit geschaffen, Beschleunigungen, Kräfte und Momente zu messen. Neben Beschleunigungen der Füße können am Unterschenkel unten, nahe am Fußgelenk, Längskräfte und Momente um die Querachse sowie um die a-p-Achse (Eversion/ Inversion) gemessen werden. Die gleichen Meßgrößen können auch oben am Unterschenkel nahe dem Kniegelenk erfaßt werden. Bereits früher war die Möglichkeit geschaffen worden, Belastungen, wie sie an Kniepolstern auftreten, die zum Zweck des Auffangens des Unterkörpers und der unteren Extremitäten unterhalb des Armaturenbrettes entwickelt worden waren, zu messen. Hierzu wurde das Dummy-Kniegelenk so modifiziert, daß sich das obere Ende des Unterschenkels relativ zum Oberschenkel verschieben kann. Der Verschiebungsweg kann gemessen werden. Eine Darstellung der Meßmöglichkeiten am Unterschenkel eines Hybrid III-Dummies zeigt Bild 1.

Besondere Bedeutung hat die Meßbarkeit von Unterschenkelbelastungen am Dummy durch das neue Frontal-Testverfahren gewonnen, das ab Oktober 1998 auf neu auf den Markt kommende Fahrzeugmodelle anzuwenden ist (Richtlinie 96/79/EG und Ergänzung zu RL 70/156/EWG). Bis Anfang Oktober 1996 hat die Kommission den Richtlinienentwurf überarbeitet und insbesondere Testergebnisse des Transport Research Laboratory (TRL, Vereintes Königreich) und der BAST zu den Testverfahren bei der Zertifizierung der instrumentierten Dummy-Unterschenkel aufgenommen. Seit diesem Datum liegt der Regelungsentwurf beim Europaparlament und -Rat zur abschließenden Beratung.

Das neue Frontaltestverfahren sieht einen Aufpralltest mit einem fahrfertigen Pkw gegen ein Verformungselement vor. Bild 2 zeigt die Konstruktion des Verformungselementes. Das Element muß so an einem festen Hindernis befestigt sein, daß im Test Fahrzeugstrukturen oberhalb des Verformungselementes und auf der nicht überdeckten

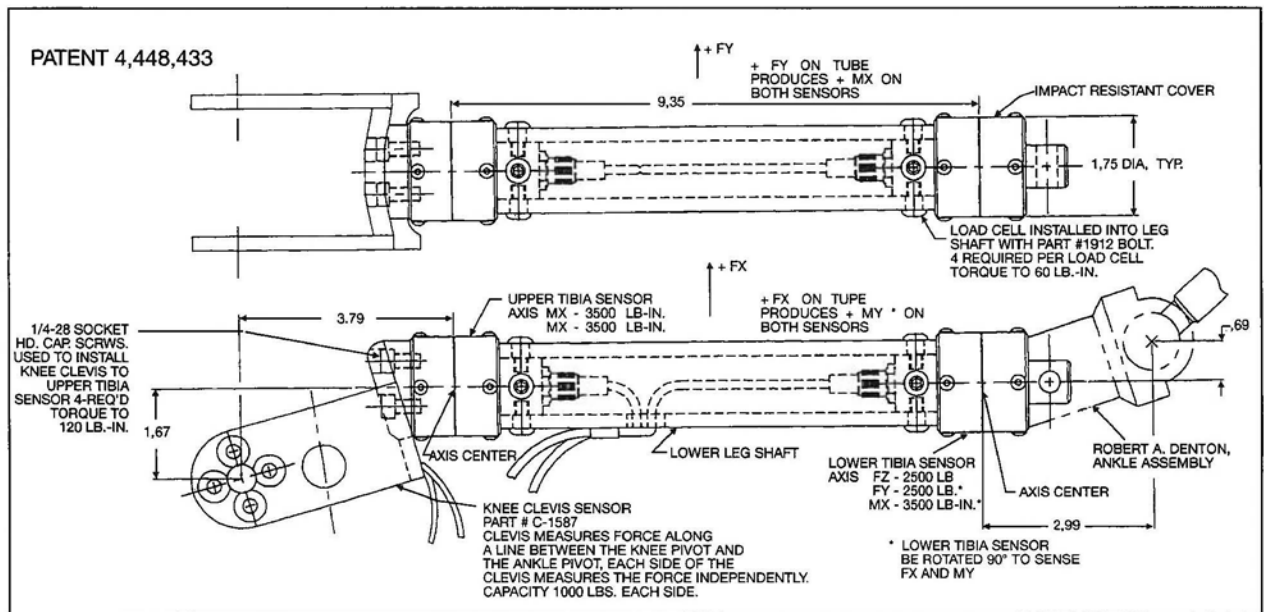
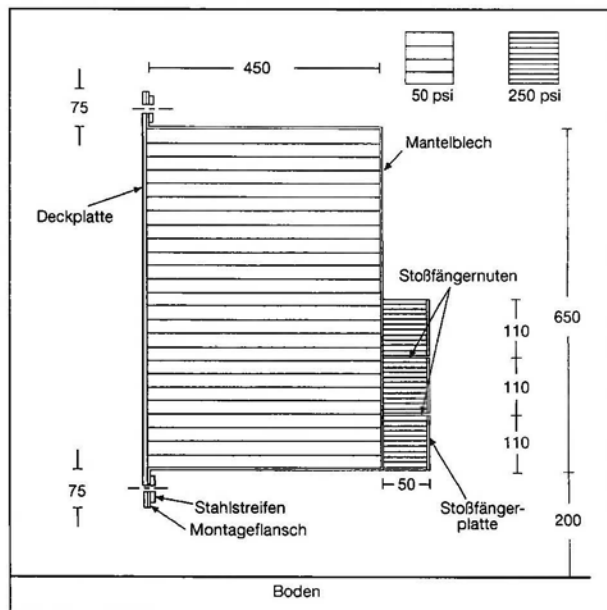


Bild 1: Meßmöglichkeiten am Unterschenkel des Hybrid II-Dummies (Patent der R. Denton Inc.)



Barrierenbreite = 1 000 mm

Alle Abmessungen in mm

Bild 2: Aufbau des Verformungselementes

Seite starre Teile der Aufnahme des Verformungselementes nicht berühren können.

Die Überdeckung an der Fahrzeugfront soll 40 % (± 50 mm) sein. Die Aufprallgeschwindigkeit soll 56 (0,+2) km/h betragen. Das Testgewicht soll das Leergewicht zuzüglich 90 % Tankfüllung sein. Je Sitzreihe soll mindestens eine Fahrzeugtür ohne Werkzeug geöffnet werden können. Die Dummies sollen sich ohne Werkzeug und ohne Verschiebung

der Sitze aus dem Fahrzeug herausnehmen lassen. Auf den beiden äußeren Frontsitzen sollten Hybrid III Dummies (nach FMVSS 208) mit den neuen 45° Fußgelenken eingesetzt werden.

Die Kommission der EU plant, wichtige Parameter des Testverfahrens überprüfen zu lassen und das Testverfahren nach 1998 gegebenenfalls zu überarbeiten. Die wichtigsten ins Auge gefaßten Parameter sind:

- Erhöhung der Aufprallgeschwindigkeit/ggf. Senkung der Belastungsgrenzen
- Änderung der Konstruktion des Verformungselementes
- Überprüfung der Dummy Belastungskriterien.

3 Festlegung der Schutzkriterien für die unteren Extremitäten, Stand 10/96

Obwohl durch den zusätzlichen Verformungsweg am Deformationselement das Testfahrzeug über einen längeren Weg als bei einem Aufprall gegen ein starres Hindernis verzögert wird und somit die Fahrzeugbeschleunigungen zum Teil erheblich niedriger sind, treten an den Versuchsfahrzeugen hohe Deformationen an der Fahrgastzelle und insbesondere im Fußraum auf. Aus diesem Grund ist, wie bereits oben erwähnt, die Messung der Bela-

stungen an den unteren Extremitäten von hoher Bedeutung.

In der Arbeitsgruppe 11 (Entwicklung eines Frontaltestverfahrens) des European Experimental Vehicles Committee (EEVC) wurden verschiedene aus der wissenschaftlichen Literatur bekannte Belastungskriterien zusammengestellt. Entscheidend bei der Kriterienauswahl zur Aufnahme in den Regelungsentwurf zum Frontaltestverfahren war eine Besprechung bei den Biomechanik-Experten des US-amerikanischen Fahrzeug-Hersteller Verbandes (AAMA) am 22.2.1995 in Detroit USA, sowie die Analyse der Meßdaten eines umfangreichen von der EU Kommission geförderten Testprogramms (21 Frontalteste), [3],[4]. Die von der EEVC für die unteren Extremitäten vorgeschlagenen Belastungskriterien wurden vollständig von der Kommission in den Regelungsentwurf aufgenommen.

Oberschenkel

In früheren Regelungsentwürfen wurde gefordert, daß die im Oberschenkel zu messende Längskraft unter 10 kN (dieser Wert entspricht auch der bestehenden US-Norm FMVSS 208) bleiben muß. Bereits länger zurückliegende Biomechanik-Untersuchungen zeigen auf, daß der Grenzwert von 10 kN zu hoch angesetzt ist. Für Stoßdauern über 10 Millisekunden (ms) sollte eine Kraft von etwa 7,6 kN nicht überschritten werden. Da bei sehr kurzer Stoßdauer auch höhere Kräfte ertragbar sind, sollen bei Abnahmetesten auch kurzzeitige Spitzenkräfte bis zu etwa 9,1 kN zugelassen werden. Als Dummy-Schutzkriterium ergibt sich somit eine Grenzkurve bezüglich der maximal zulässigen Längskraft über ihre Einwirkdauer, siehe Bild 3.

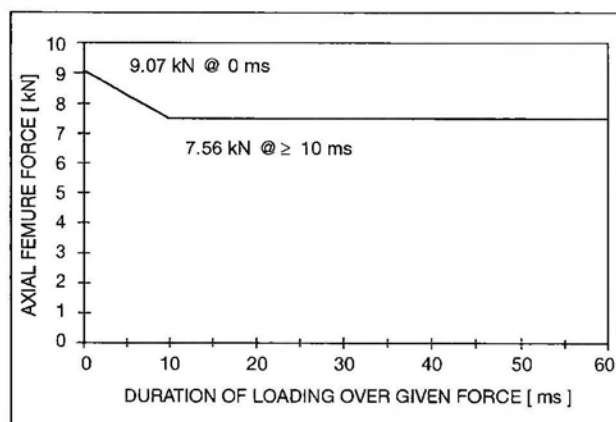


Bild 3: Maximal zulässige Oberschenkelkraft über ihre Einwirkdauer

Knie

Die Meßeinrichtung des Hybrid III Dummies erfaßt diejenigen Kräfte, die unterhalb des Knie gegen das Schienbein aufgebracht werden und nicht die Kräfte direkt gegen das Knie. In den 70er Jahren wurde diese Meßeinrichtung entwickelt, um passive Rückhaltesysteme (z.B. VW-RA) mit Kniepolster bewerten zu können. Trotz Problemen mit Haftreibung beim Gleiten des Unterschenkels in der Führung, hat die AG 11 der EEVC entschieden, dieses Kriterium zur Bewertung extremer Einklemmung im Fußraum beizubehalten. Eine Diplomarbeit der BAST hat gezeigt, daß diese Belastung auch durch die Meßmöglichkeit des Momentes um die Querachse unterhalb des Knies erfaßt werden kann. Der Parameter wurde dennoch weiterhin verfolgt. Als Grenzwert wurde eine Verschiebung des Schienbeins im Kniegelenk um weniger als 15 mm vorgeschlagen.

Unterschenkel

Bezüglich des Unterschenkels sollen auch die Überlegungen dargelegt werden, die zur Formulierung des sogenannten Tibia Index (TI) geführt haben. Die Formel des Tibia-Index wurde aus Festigkeitsbeziehungen für Biegebalken ermittelt. Die kritischen Belastungswerte erhielt man durch Eingabe von Festigkeitswerten ermittelt an den verschiedensten Knochenproben menschlicher Leichen (Herleitung von Harald Mertz/General Motors-USA, auf o.g. Biomechanik-Meeting 22.02.95, Detroit, USA).

Bei Einklemmen bzw. bei Aufbringung einer Stoßkraft auf den Unterschenkel gilt allgemein der Belastungsfall der kombinierten Biege- und Druckbelastung des Unterschenkels:

- kombinierte Spannung in äußerer Faser des Unterschenkelknochens

$$\sigma = \frac{M}{Z} + \frac{F}{A}$$

- die Bruchspannung ist:

$$\sigma_B = \frac{M_c}{Z} + \frac{F_c}{A}$$

- Tibia Index (zu berechnen als Funktion über die Zeit)

$$TI = \frac{\sigma}{\sigma_B} = \frac{M}{M_c} + \frac{F}{F_c}$$

mit:

M_C - Biegemoment ohne Axialkraft bei Bruch des Unterschenkels

F_C - axiale Druckkraft ohne Biegemoment (kurze Säule) bei Bruch des Unterschenkels

M - resultierendes Biegemoment in einem Querschnitt

F - axiale Druckkraft

Z, A - „Hilfsgrößen“.

Nach [5] ergibt sich aus Druck- und Biegeversuchen an Knochenproben von Männern und Frauen für die Altersgruppe 20-30 Jahre und unter Berücksichtigung der geringeren Knochenfestigkeit bei Frauen ein kritisches Bruchmoment für den 50 % Mann zu

$$M_C = 226 \text{ Nm, gerundet } 225 \text{ Nm}$$

und eine kritische Druckbelastung für den 50 % Mann zu

$$F_C = 35,9 \text{ kN.}$$

Nach einer weiteren Studie [6] ergab sich aus Biegebelastungstesten an intakten Beinen (insgesamt 21 Proben, 16 männl. und 5 weibl.) für den 50 % Mann ein Bruch-Risiko von 18,5 % bei einem kritischen Bruchmoment von 225 Nm.

Bereits 1965 veröffentlichte Teste [7] zeigen, daß die Druckbelastbarkeit des Unterschenkels, gemessen an intakten Unterschenkeln bei 8 kN liegt.

Es ergeben sich somit folgende Belastungskriterien für den Unterschenkel:

Längskraft $F_z \leq 8 \text{ kN}$

$$\text{Tibia-Index TI} = \frac{M_{\text{res}}}{225 \text{ Nm}} + \frac{F_z}{35,9 \text{ kN}} \leq 1,3$$

mit $M_{\text{res}} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$ aus den gemessenen M_x - und M_y - Werten und der gemessenen Längskraft F_z .

F_z kann am oberen oder unteren Ende des Unterschenkels gemessen werden. Der Tibia-Index soll am oberen oder unteren Ende des Unterschenkels gemessen werden, der höhere gemessene Wert darf den Grenzwert nicht überschreiten. Der Grenzwert für den Tibia-Index wurde auf zunächst 1,3 gelegt, weil Crashteste gezeigt haben, daß die Meßwerte einer relativ hohen Streuung unterliegen; hierzu werden weiter unten noch Erläuterungen gegeben.

Die neueste Generation des Unterschenkels des Hybrid III -Dummies ermöglicht wie bereits oben erwähnt die Messung verschiedener Größen:

oben: F_z, M_x, M_y (F_z -Längskraft, M_x -Moment um a-p-Richtung, M_y -Moment um Querrichtung)

unten: F_x, F_z, M_y (F_x -Kraft in a-p-Richtung, F_z -Längskraft, der Aufnehmer kann gedreht werden, so daß auch um andere Achsen gemessen werden kann).

Hieraus wird deutlich, daß mit den heute meist verfügbaren instrumentierten Dummy-Unterschenkeln der Tibia-Index nicht vollständig gemessen werden kann.

Bei der aktuellen Version des Hybrid III Dummies kann der Fuß um 45° vorn hochgebogen werden. Außer durch Reibung wird dieses Hochbiegen nicht behindert. Am Ende der Verdrehung des Fußes schlagen bei der aktuellen Version des Hybrid III Teile des Fußes gegen Teile des Schienbeins (Anschlag), hierdurch können die gemessenen Kräfte abrupt ansteigen und hohe Werte erreichen. Das oben beschriebene Problem des „Anschlags“ des Fußes gegen das Schienbein zeigte sich in einer nicht unerheblichen Streuung der TI-Meßwerte (die zu einer Anhebung des Grenzwertes auf 1,3 geführt haben).

Zur Beseitigung der genannten Schwierigkeiten wurde von der EEVC AG 11 eine ad hoc-Arbeitsgruppe ins Leben gerufen. Aufgabe der Arbeitsgruppe war, Lösungsvorschläge vorzulegen und ein Testverfahren zur Zertifizierung von instrumentierten Dummy-Unterschenkel zu erarbeiten. Die Teste wurden bei TRL und der BASt durchgeführt.

4 Testverfahren zur Zertifizierung der instrumentierten Dummy-Unterschenkel

Zu Vermeidung des oben beschriebenen metallischen Anschlags im Fußgelenk wurde von First Technology Systems (FTSS, USA) im Auftrag der US-Verkehrssicherheitsbehörde NHTSA ein spezieller Dämpfungsring entwickelt, der an das untere Ende des Dummyunterschenkels zu schrauben ist. Bei der Erarbeitung und Erprobung des Testverfahrens wurde festgestellt, daß verschiedene Bauformen der Simulation des Fleisches an den Unterschenkeln und den Füßen auf dem Markt sind.

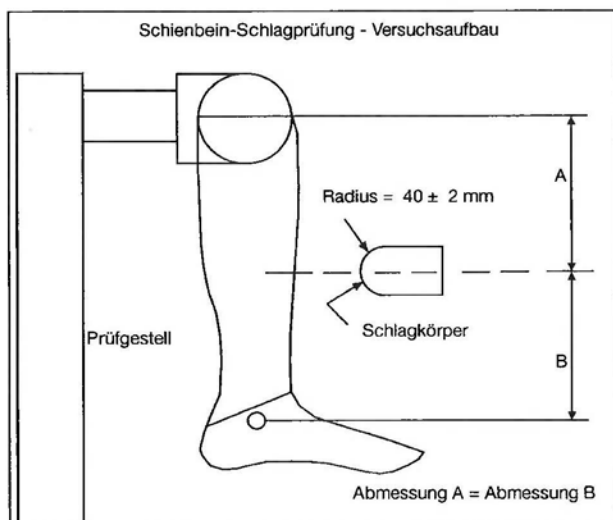


Bild 4: Testverfahren Stoß gegen die Mitte des Unterschenkels

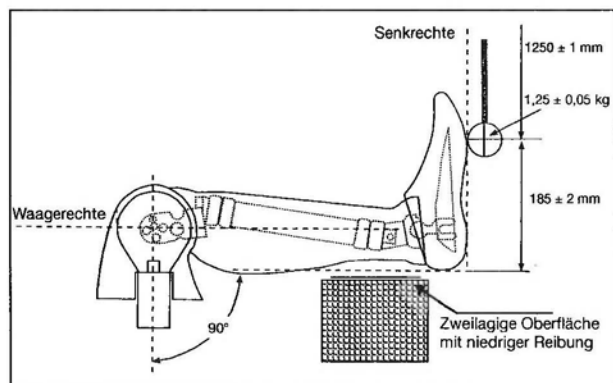


Bild 5: Testverfahren Stoß mit Pendel gegen die Fußsohle

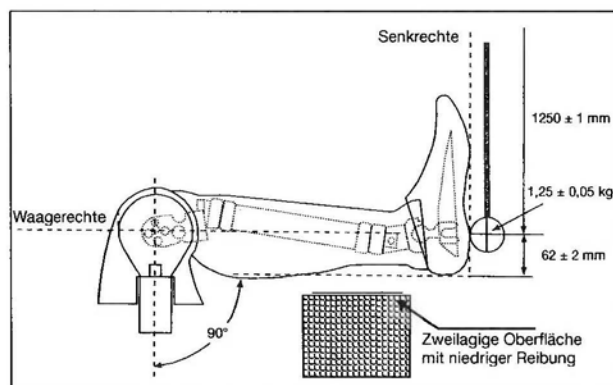


Bild 6: Testverfahren Stoß mit Pendel gegen die Ferse

Daher wurde eine erste wichtige Forderung aufgestellt: die Bauformen der metallenen Bauteile und der Fleisch-Simulation der Unterschenkel und der Füße müssen standardisiert werden. Nach einer Vielzahl von Testen konnte ein mit dem EEVC abgestimmtes Testverfahren erstellt werden. Teste nach dem nachfolgend beschriebenen Zertifizie-

rungsverfahren für die instrumentierten Dummy-Unterschenkel zeigen, daß der Dämpfungsring den metallischen Anschlag dämpft und daß davon ausgegangen werden kann, daß ein vernünftiger Tibia-Index Wert in einem Aufpralltest gemessen wird.

Zur Zertifizierung des instrumentierten Dummy-Unterschenkels wurden drei Testverfahren entwickelt:

- Stoß gegen die Mitte des Unterschenkels (siehe Bild 4)
 - Stoßkörper: Zylinder, Masse $5,0 \pm 0,2$ kg, Durchmesser 80 ± 4 mm, Länge ≥ 80 mm
 - Aufprallgeschwindigkeit $2,1 \pm 0,03$ m/s
 - Stoßkraft (Stoßkörpermasse x Stoßkörperbeschleunigung): $2,8 \pm 0,9$ kN
- Stoß mit Pendel gegen die Fußsohle (siehe Bild 5)
 - Stoßkörper: Zylinder, Masse $1,25 \pm 0,02$ kg (incl. Meßaufnehmer), Durchmesser 50 ± 2 mm
 - Masse des Pendelarms: 285 ± 5 g
 - Aufschlagstelle: 185 ± 2 mm über Aufstandsfläche der Ferse
 - Aufprallgeschwindigkeit $6,7 \pm 0,2$ m/s
 - Biegemoment im Unterschenkel um Y-Achse: 145 ± 20 Nm
- Stoß mit Pendel gegen die Ferse (siehe Bild 6)
 - Stoßkörper wie Stoß mit Pendel gegen die Fußsohle (siehe Bild 5)
 - Aufprallgeschwindigkeit $4,4 \pm 0,2$ m/s
 - Aufschlagstelle: 62 ± 2 mm über Aufstandsfläche der Ferse
 - Pendelbeschleunigung 305 ± 40 g.

5 Schlußfolgerungen

Seit Anfang Oktober 1996 liegt der Regelungsentwurf für das neue Frontal-Testverfahren, das ab Oktober 1998 auf neu auf den Markt kommende Fahrzeugmodelle anzuwenden ist (Richtlinie 96/79/EG und Ergänzung zu RL 70/156/EWG) beim Europa-Parlament und -Rat zur abschließenden Beratung. In dieses Testverfahren sind eine Vielzahl neuer am Hybrid III-Dummy zu prüfender Schutzkriterien insbesondere bezüglich der unteren Extremitäten aufgenommen. Die wichtigsten Probleme bei der Erfassung der Belastungskriterien für die unteren Extremitäten sind behoben, dennoch ist noch eine gewisse weitere Standardisierung der Meßmöglichkeiten und der Konstruktion der einzelnen Baugruppen der unteren Extremitäten erfor-

derlich. Da bisher erst wenige Erfahrungen mit den neuen Schutzkriterien gesammelt worden sind, erwägt die Kommission der EU mögliche Modifikationen bei den Schutzkriterien bis etwa zum Jahre 2003.

6 Zusammenfassung

In den Testen nach dem neuen Frontaltestverfahren (Entwürfe ECE R.94 sowie Richtlinie 96/79/EG und Ergänzung zu RL 70/156/EWG) entstehen hohe Verformungen der Fußräume der Versuchsfahrzeuge. Die Bewertung der Gefährdung der Insassen durch Intrusion, vorwiegend der Spritzwand begleitet von heftigen Bewegungen der Pedale, soll durch am Dummy zu messende Schutzkriterien erfolgen. Es ist vorgesehen, an den Dummies die Verschiebung des Schienbeins gegen das Knie, die Längskraft im Unterschenkel und den sogenannten Tibia Index zu messen. Um dieses zu ermöglichen, mußten an den vorhandenen Dummy-Unterschenkeln konstruktive Änderungen vorgenommen werden.

Über die Herleitung der Schutzkriterien, Fragen bei der Anwendung dieser Kriterien sowie die technischen Einzelheiten und die Zertifizierung der neuen Dummy-Unterschenkel, welche die erforderlichen Messungen erlauben, wird berichtet.

7 Literatur

- [1] ECE-Regelung 33
- [2] ZEIDLER, F. Dr.- Ing.: Promotion
- [3] FAERBER, E.: Neue Entwicklungen bei der Gesetzgebung zur passiven Sicherheit von Pkw, 28. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Verkehrsmedizin, Leipzig, 23.-25. März 1995
- [4] EEVC Working Group 11 Final Report, Impact Test Procedure for Better Protection of Car Passengers in a Frontal Collision, November 1995
- [5] YAMADA: Strength of Biological Materials, Williams & Wilkins Co., 1970
- [6] NYQUIST et al.: Tibia Bending: Strength and Response, SAE 85 1728, 1985
- [7] HIRSCH, G. et al., Experimental Knee Joint Fractures- A Preliminary Report, Acta Orthopaedica Scandinavica, Vol. 36, 1965.

Anschrift des Verfassers

Eberhard Faerber
 Bundesanstalt für Straßenwesen
 Brüderstraße 53

D - 51427 Bergisch Gladbach