

**Fußverletzungen bei PKW-Frontinsassen:
Eine Analyse des GIDAS-Datenbestandes**

Dissertationsschrift

zur Erlangung eines doctor medicinae (Dr. med.)

der Medizinischen Fakultät Carl Gustav Carus

der Technischen Universität Dresden

vorgelegt von

René Schubert

aus Dohna

Dresden 2010

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der mündlichen Prüfung:

gez.:

Vorsitzender der Prüfungskommission

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung zur Unfallforschung in Deutschland	6
2.	Fragestellung	10
3.	Patientengut und Methodik	13
4.	Charakteristische Frakturen und zu Grunde liegende Unfälle	23
5.	Auswertung	28
5.1	Erfasste Verletzungen	28
5.2	Charakterisierung der Fahrzeuge	32
5.2.1	Fahrzeugsegment	32
5.2.2	Unfallort	33
5.2.3	Aufprallrichtung	35
5.2.4	Verletzungsverursachendes Fahrzeugteil	36
5.3	Geschwindigkeitsparameter bei den beobachteten Verletzungen	37
5.4	Fußraumintrusion bei den beobachteten Verletzungen	41
5.5	Häufigkeit von Fußverletzungen	53
6.	Diskussion	54
7.	Zusammenfassung	67
8.	Literaturverzeichnis	69
	Danksagung	95
	Thesen zur Dissertation	96

Abkürzungsverzeichnis

AIS	Abbreviated Injury Scale
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BB	Bodenblech
BMW	Bayerische Motorenwerke
CDC	collision deformation characteristics (Haupt-Impulsrichtung des Unfalls)
cm	Zentimeter
Delta-v	Geschwindigkeitsänderung zum Zeitpunkt des Unfalls
DKW	Dampfkraftwagen bzw. Das kleine Wunder
DREMOD	Dresdner Modell der Unfalldokumentation
EES	energy equivalent speed, Maß für die mit der Geschwindigkeitsänderung einhergehende Energieänderung
etc.	et cetera
Euro NCAP	European New Car Assessment Program
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik
GIDAS	German In-Depth Accident Study
km ²	Quadratkilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
LKW	Lastkraftwagen
MS	Microsoft
ms	Millisekunde
N	Newton
Nm	Newtonmeter
OSG	oberes Sprunggelenk
PKW	Personenkraftwagen
SIR	scientific informaion retrieval

SW	Spritzwand
TU	Technische Universität
UMK	Untere Mittelklasse
VW	Volkswagen

1. Einleitung zur Unfallforschung in Deutschland

Das Ziel der Unfallforschung besteht in der Rekonstruktion der Ursache und des Ablaufes eines Unfalls. Verkehrsunfälle werden am Ort ihrer Entstehung untersucht und nachfolgend statistisch erfasst. Im Ergebnis werden Informationen über Fahrzeugsicherheit, Mängel im Straßenraum, häufige Unfallursachen, Unfallorte, typische Verletzungen und Verkehrsverhaltensprobleme ermittelt. Dies dient dazu, Unfälle zu vermeiden bzw. die Sicherheit bei Unfällen zu verbessern.

Die Unfallforschung hat in Deutschland eine lange Tradition. Als erster Automobilhersteller entwickelte 1937 die Auto-Union – 1932 aus dem Zusammenschluss der Unternehmen Horch, Audi (beide Zwickau), Wanderer (Chemnitz) und DKW (Zschopau) in Chemnitz gegründet – ein fundiertes und empirisch geprägtes Crashprogramm, bei dem Frontal- und Seitenaufprall sowie seitlicher Überschlag simuliert werden konnten.^{1,2} Am 31. August 1938 erfolgte durch das gleiche Unternehmen der erste Überschlagtest auf deutschem Boden: Ein PKW DKW F7 wurde am Ende einer Abrollbahn zum Umkippen gebracht und lieferte so Informationen zum Deformationsverhalten der sich in Entwicklung befindlichen Kunststoffkarosserie. Weitere Überschlagversuche folgten am 29.10.1938:



Abbildung 1: Überschlagtest DKW mit Kunststoffkarosserie (29.10.1938)

Quelle: Firmengeschichtliches Archiv der AUDI AG

Zusätzlich wurden Pendelschlagversuche durchgeführt, wobei ein Baumstamm als Gewicht diente, der mit der Fahrzeugtür aus Kunststoff kollidierte. Bei Katapultversuchen (Abbildung 2) wurde ein Rammwagen beschleunigt und prallte gegen das Fahrzeug.



Abbildung 2: Katapultversuch DKW F7 mit Kunststoffkarosserie

Quelle: Firmengeschichtliches Archiv der AUDI AG

Ziel dieser Untersuchungen war weniger die Verbesserung des Insassenschutzes als vielmehr die Untersuchung des Verhaltens des neuartigen Karosseriewerkstoffes, gleichwohl findet sich in den Unternehmensnotizen auch folgende Beobachtung: „Bei einem gleichartigen wirklichen Unfall wäre bei diesem Wagen auch die Verletzung des Fahrers zum schwersten gewesen.“^{3, 4} Diese hoffnungsvollen Anfänge fanden kriegs- und demontagebedingt ihr jähes Ende.

Nach dem Ende des 2. Weltkrieges war die Unfallforschung zunächst unternehmensgebunden. So liefen bei Mercedes-Benz 1959 die ersten Crash-Tests in Sindelfingen. Durch Filmaufnahmen in Zeitlupe konnten Rückschlüsse gezogen werden, die

zu konstruktiven Änderungen führten. Im Jahr 1969 wurde ein Spezialistenteam zusammengestellt, das seitdem von der Polizei in einem Teil Baden-Württembergs zu jedem Verkehrsunfall mit Beteiligung eines Mercedes-Benz hinzugezogen wird.⁵

Auf dem Gebiet der DDR fanden in den 50er und 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts Überschlagsversuche ähnlich denen der Auto Union mit den Modellen P 70 und Trabant 601 statt.² Von einer kontinuierlichen Unfallforschung konnte bei fehlender Modellpflege jedoch keine Rede sein.

Am 01.02.1973 wurde die Verkehrsunfallforschung Hannover gegründet. Das Forschungsprojekt, finanziert durch die BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen), wurde zunächst in Zusammenarbeit mit dem Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Berlin und ab 1985 ausschließlich durch die Unfallchirurgische Klinik der Medizinischen Hochschule Hannover durchgeführt. Das Projekt „Erhebungen am Unfallort“ wird als kontinuierliche Datenerhebung fortlaufend realisiert.⁶

Im Juli 1999 wurde die Verkehrsunfallforschung der TU Dresden, finanziert durch die FAT (Forschungsverband Automobiltechnik), ins Leben gerufen. Die enge Zusammenarbeit mit dem Hannoveraner Projekt mündete in das Kooperationsprojekt GIDAS (German In-Depth Accident Study), der größten Unfalldatenerhebung in Deutschland. Jährlich werden im Rahmen dieser Studie in den Großräumen Dresden und Hannover im 2-Schicht-Betrieb á 6 Stunden etwa 1.000 Unfälle je Standort erhoben.⁷ Aufgrund eines repräsentativen Stichprobenplanes werden somit Rückschlüsse auf die Verkehrsunfall bedingten Personenschäden in Deutschland gezogen.^{8,9}

2. Fragestellung

Die untere Extremität ist die am zweithäufigsten verletzte anatomische Region (nach den Kopfverletzungen; Schweregrad AIS90 \geq 2).¹⁰ Verletzungen des Komplexes Fuß/oberes Sprunggelenk stellen mit etwa einem Drittel aller Beinverletzungen des Schweregrades AIS \geq 2 die häufigste Form einer Verletzung der unteren Extremität beim Verkehrsunfall dar.¹¹ Bis zu 68 Prozent der Skelettverletzungen von Frontinsassen betreffen die Region distal des Knies und bis zu 30 Prozent aller Bein- und 10 Prozent aller bei Autounfällen beobachteten Verletzungen entfallen auf den Fuß und das obere Sprunggelenk.^{12, 13, 14} Frakturen des oberen Sprunggelenkes sind die häufigsten Frakturen eines Last tragenden Gelenkes, ihre Inzidenz wird mit 107 Frakturen auf 10.000 Personen/Jahr angegeben. Sie machen 11,1 Prozent aller operativ im Krankenhaus behandelten Verletzungen aus.¹⁵

Die erheblichen Fortschritte in der Frühversorgung Schwerstverletzter führten in der Vergangenheit zu immer besseren Überlebenschancen selbst schwerst polytraumatisierter Patienten,¹⁶ durch den Rückgang der Letalität nahm die Zahl der im Krankenhaus behandelten Schwerstverletzten in den letzten Jahren zu.¹⁷ Damit steht der Arzt vor der Behandlungsnotwendigkeit komplexer Fußverletzungen, die früher deshalb nicht überlebt wurden, weil der Patient am Unfallort, auf dem Transport oder in der Initialphase der Intensivbehandlung verstarb. Durch die ständige Verbesserung der passiven Sicherheit der Fahrzeuge hat sich das Überleben von Reasanztraumen kontinuierlich erhöht, die häufig begleitenden Fußverletzungen werden zum Gradmesser der Versorgungsqualität. So ist die verbleibende MdE (Minderung der Erwerbsfähigkeit) nach Polytrauma maßgeblich auf verbliebene Fußprobleme zurückzuführen.¹⁸ Die modernen Rückhaltesysteme haben zu einem besseren Schutz von Kopf und Thorax geführt, im Vergleich dazu ist der Schutz der unteren Extremität weniger effektiv.¹⁰

Verletzungen der unteren Extremität infolge Hochrasanztrauma wie beim Verkehrsunfall haben eine schlechtere Prognose als solche bei geringerer Rasanz.¹¹ In Untersuchungen wurden fast die Hälfte aller Chopart- und Lisfranc-Luxationsfrakturen bei polytraumatisierten Verkehrsunfallopfern beobachtet, auch die Hälfte der Calcaneus- und der Talusfrakturen ist auf Verkehrsunfälle zurückzuführen.¹⁸

Die sozioökonomische Bedeutung von Verletzungen des Fußes und der Sprunggelenksregion ergibt sich aus der Tatsache, dass es sich dabei um die Verletzungen handelt, die am häufigsten zur Arbeitsunfähigkeit führen (0,84 Fälle je 100 Versicherungsjahre), bezüglich der AU-Dauer nehmen diese Verletzungen mit 10,5 Tagen je 100 Versicherungsjahren den 19. Platz (noch vor der AU infolge Hypertonie) ein.¹⁹ In Bezug auf die Behandlungskosten von Verkehrsunfallopfern liegen die Beinverletzungen an zweiter Stelle nach den Behandlungskosten für Schädel-Hirn-Verletzte.²⁰ Beinverletzungen werden für 41 Prozent ausgefallener Arbeitstage verantwortlich gemacht, davon entfallen allein 15 Prozent auf das obere Sprunggelenk.²¹ Unter den 10 volkswirtschaftlich gesehen kostenintensivsten Verletzungen belegen geschlossene Fußverletzungen mit 45 Millionen Euro den 5. Platz.²²

Die vorliegende Arbeit widmet sich der Beantwortung folgender Fragen:

- 1) Wie häufig sind Frakturen und Luxationen im Bereich Fuß/OSG bei PKW-Frontinsassen?
- 2) Welche Konstruktionsmerkmale der Fahrgastzelle sind für das Zustandekommen dieser Verletzungen verantwortlich?
- 3) Welche Merkmale des Crashes lassen sich mit diesen Verletzungen assoziieren?
- 4) Sind in neuen PKW die Füße besser geschützt als in älteren?

3. Patientengut und Methodik

Für die vorliegende Arbeit wurden die Daten des GIDAS-Datenbestandes aus dem Erhebungszeitraum 01/1983 – 03/2007 ausgewertet. Die Daten wurden durch die Unfallforschung Hannover und (seit 01.07.1999) Dresden gesammelt. Die Verkehrsunfälle werden nach einem Stichprobenverfahren erfasst und müssen folgenden Kriterien genügen:

- Verkehrsunfall mit Personenschaden
- Unfall innerhalb des Erhebungsgebietes
- Unfallereignis innerhalb der Erhebungszeiten
- zeitlich am kürzesten zurückliegender Unfall

Das Erhebungsgebiet umfasst zum einen den Großraum Hannover mit einem Radius von 30-35 km um die Landeshauptstadt. Auf einer Fläche von 2.289 km² leben 1,2 Millionen Einwohner, topografisch handelt es sich um meist flaches Gelände. Das Gebiet Dresden schlägt einen Radius von 40-45 km um die Stadt und umfasst eine Fläche von 3.000 km² mit etwa einer Million Einwohnern. Topografisch stehen Flachland im Norden Höhenzüge im Süden bis 700 m ü. NN gegenüber.

Durch die Einsatzzentralen der Polizei, der Rettungsdienste und der Feuerwehr werden den Forscherteams der Verkehrsunfallforschung fortlaufend alle Verkehrsunfälle gemeldet. Das Team wählt daraus nach einem statistisch repräsentativen Stichprobenplan Unfälle aus und dokumentiert sie nach einem umfassenden Erhebungskatalog. Für die vorliegende Arbeit erfolgte keine Gewichtung der Unfallauswahl im Vergleich mit der amtlich erfassten Unfallstruktur für das Erhebungsgebiet. Damit sind die Daten repräsentativ für die Stichprobe, nicht jedoch für das gesamte Bundesgebiet.

Die Unfalldokumentation erfolgt täglich wechselnd während zwei sechsstündigen Einsatzschichten, die wöchentlich wie folgt wechseln:

Erste Woche: von 0 bis 6 Uhr und von 12 bis 18 Uhr

Zweite Woche: von 6 bis 12 Uhr und von 18 bis 24 Uhr

Damit ist gewährleistet, dass über das ganze Jahr verteilt alle Tageszeitintervalle erfasst werden.

In jeder Schicht steht zur Unfallaufnahme ein aus zwei Technikern, einem Mediziner und einem Koordinator bestehendes Aufnahmeteam bereit. Das Team dokumentiert am Unfallort alle relevanten Informationen beginnend bei der Rettung bis zur Fahrzeugausstattung und –beschädigung. Die Beteiligten werden individuell befragt, Unfallstelle und existente Spuren werden vermessen. Die Dokumentation erfolgt digitalisiert. Zusätzlich werden nachträglich verfügbare Informationen in Zusammenarbeit mit Polizei, Krankenhäusern und Rettungskräften erhoben. Maßstabsgetreue Skizzen des Unfallortes werden mittels Fotogrammetrie erstellt.

Der erhobene Datenumfang beinhaltet im Wesentlichen Informationen zu:

- Umweltbedingungen
- baulichen Besonderheiten
- Straßengestaltung
- Verkehrsregelung
- Fahrzeugdeformationen
- Anprallstellen von Insassen bzw. äußeren Verkehrsteilnehmern
- Crashinformationen wie z.B. Kollisions- und Fahrgeschwindigkeit, Delta v, EES, Deformationstiefen
- technischen Kenndaten wie Fahrzeugart und technische Ausstattung

- Unfallhergang und Unfallursachen
- personenspezifischen Informationen wie Körpergewicht, Größe etc.
- Verletzungsmuster, präklinischer und klinischer Versorgung

Unfallbeteiligte Fahrzeuge, die am Unfallort nicht untersucht werden können, werden am Folgetag vermessen. Es erfolgen die Dokumentation der Behandlung der Verletzten im Krankenhaus (Art, Schwere und Lokalisation der Verletzung) und die Erfassung der Verletzungsschwere nach der Abbreviated Injury Scale, Revision 90, update 98, dem so genannten AIS-Score. Anhand der Unfallspuren erfolgen umfassende Unfallrekonstruktionen, so wird der gesamte Unfallablauf von der Unfalleinleitung bis zum Fahrzeugstillstand nachvollzogen. Bremsverzögerungen, Einlauf- und Kollisionsgeschwindigkeiten sowie Winkeländerungen werden nach forensischen Verfahren bestimmt. Zur Dokumentation des Bewegungsablaufes kommt verschiedenste Rekonstruktions-Software zum Einsatz. Auf diese Art und Weise werden pro Unfall bis zu 3.000 Einzelinformationen gesammelt. Die Verarbeitung der darin enthaltenen Personen gebundenen Daten erfolgt unter Beachtung der Bestimmungen des Datenschutzes, der ärztlichen Schweigepflicht und der Persönlichkeitsrechte. Alle Informationen werden in anonymisierter Form in einer gemeinsamen GIDAS-Datenbank gespeichert und für Auswertungen zur Verfügung gestellt.²³ Zur computergestützten Fallbearbeitung, Verwaltung und Auswertung wurde das „Dresdner Modell der Unfalldokumentation“ (DREMOD) entwickelt.²⁴ Neben der technischen und medizinischen Analyse hat sich in den letzten Jahren die verkehrspsychologische Unfallanalyse etabliert.²⁵

Die dokumentierten Frakturen und Luxationen des Fußes und des oberen Sprunggelenkes wurden nach der AIS-Skala klassifiziert. Diese wurde als Bewertungsskala für die Letalität bzw. Schwere von Einzelverletzungen eingeführt, dabei werden Verletzungen mit annähernd

gleicher Letalität zusammengefasst. Es existieren 6 Verletzungsklassen (1=gering bis 6=maximal, d.h. nicht behandelbar) sowie eine Klasse für nicht ausreichend diagnostizierte Verletzungen. Nachdem die Verletzungen zunächst nach dem AIS 1990 Revision (AIS 90) und nachfolgend dem Update 1998 (AIS98) kodiert wurden, konnte mit dem AIS 2005 und seinem Update 2008 eine Abschätzung der langfristigen Beeinträchtigung der verletzten Person durch Verknüpfung mit dem Functional Capacity Index (FCI) erfolgen. Daher wurden für die vorliegende Arbeit die Codierungen des AIS 90 bzw. 98 für den AIS 2008 nachkodiert. Die Verletzungsschwere eines Patienten wird als maximaler AIS-Wert (MAIS) angegeben, bei der Betrachtung der Verletzung von Körperregionen wird für diese ein MAIS-Wert angegeben (z.B. MAIS-Fuß). Für die vorliegende Untersuchung wurden MAIS2+-Verletzungen des Fußes und des OSG betrachtet, MAIS1-Verletzungen wie Zehenfrakturen oder fibulare Bandrupturen wurden nicht erfasst. Da die überwiegende Zahl der OSG-/Fußverletzungen dem Schweregrad MAIS2 zugerechnet werden (MAIS3 nur bei offenen Sprunggelenksfrakturen kodierbar), erfolgt in der Arbeit keine Unterteilung in MAIS2 und -3-Verletzungen.²⁶⁻²⁸

Der FCI ist ein Outcome-Instrument zur Bestimmung des Einflusses von Verletzungen auf die Aktivitäten des täglichen Lebens. Er bestimmt die Funktionsreduktion in 10 Dimensionen (Nahrungsaufnahme, Ausscheidungsfunktion, sexuelle Funktion, Gehfähigkeit, Hand- und Armfunktion, Beugen und Heben, Sehfunktion, Hörfunktion, Sprache und kognitive Funktion). Für jede AIS-Einzelverletzung existiert ein FCI-Wert, der das Ausmaß der Verletzungsfolgen ein Jahr nach dem Unfall beschreibt. Der Grad der Einschränkung wird für jede Dimension auf einer 5-stufigen Skala festgelegt, wobei ein FCI-Score von 1 einer sehr schwerwiegenden Einschränkung, ein Score von 5 dagegen keiner funktionellen Einschränkung entspricht.²⁹⁻³¹

FCI-Score	Funktionelle Einschränkung (englisch)	Funktionelle Einschränkung	Anzahl der FCI codierten AIS2008-Codes
1	Worst Possible State	Sehr schwerwiegend	156
2	Severe State	Schwerwiegend	131
3	Serious State	Ernsthaft	136
4	Moderate State	Gering	194
5	Perfect State	Keine	1279

Definition der anatomischen Region:

Für die Auswertung wurde die Region OSG/Fuß entsprechend den Gelenklinien von oberem Sprunggelenk, Chopart- und Lisfranc-Gelenk untergliedert in:

1. OSG
2. Rückfuß (Talus/Calcaneus)
3. Mittfuß (Os naviculare, Ossa cuneiformia, Os cuboideum)
4. Vorfuß (Metatarsalia und Zehen)

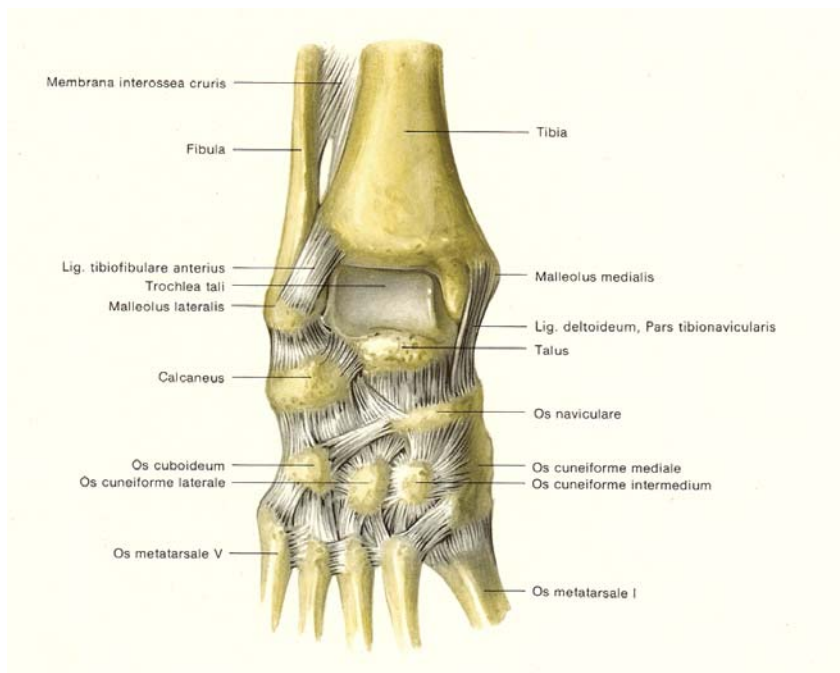


Abbildung 3: Oberes Sprunggelenk (gebildet durch die distale Tibia, die distale Fibula und den Talus) ³²

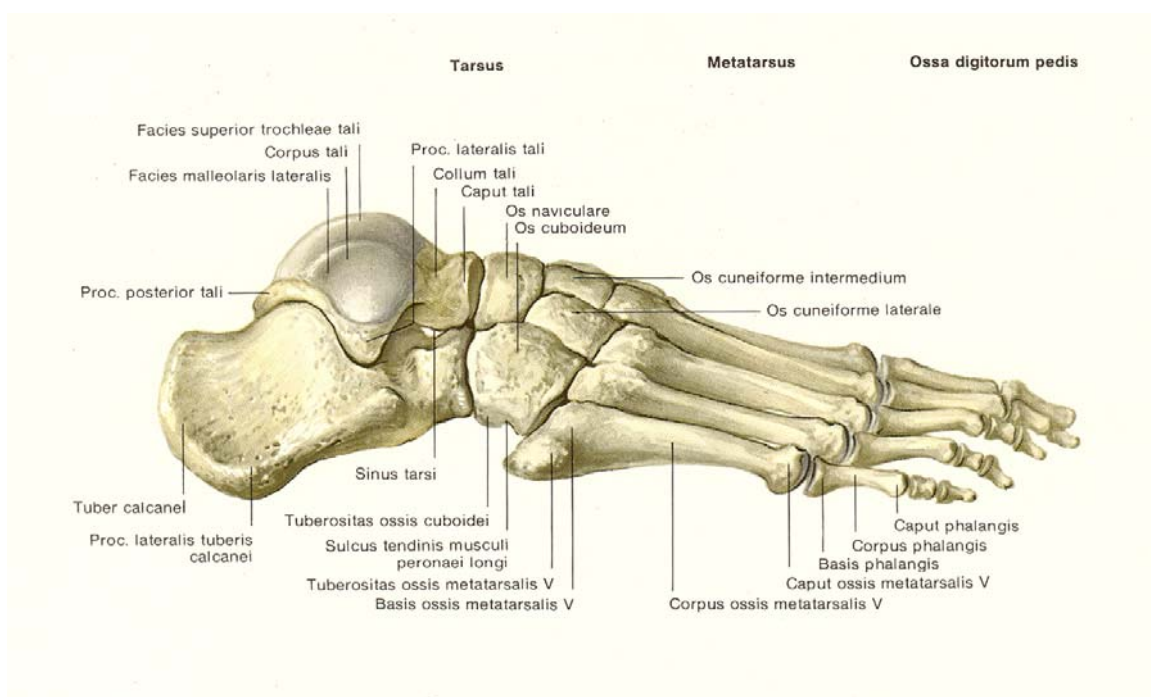


Abbildung 4: Fuß von lateral. Die Chopart-Gelenklinie verläuft zwischen Talus und Calcaneus einerseits sowie Os naviculare und Os cuboideum andererseits. Die Lisfranc-Gelenklinie verläuft zwischen den Ossa cuneiformia und dem Os cuboideum einerseits und den Ossa metatarsalia andererseits. ³²

Hauptimpulsrichtung:

Die Hauptimpulsrichtung des Unfalls wurde als CDC-Wert (collision deformation characteristics) erfasst. Ein Impuls bei 12 (Abbildung 11) entspricht einer frontalen Stoßrichtung, demgegenüber ein Impuls bei 6 einem reinen Heckanprall. Entsprechend liegt bei 3 ein Seitencrash in Höhe der B-Säule der Beifahrer-, bei 9 ein Seitencrash in Höhe der B-Säule der Fahrerseite vor. Kollidierte ein Fahrzeug mehrfach, wurde die für die Verletzung ursächliche Kollision mit der entsprechenden Hauptimpulsrichtung ausgewählt.

Crashparameter:

Als Crashparameter wurden Delta-v (in km/h), der Betrag des Geschwindigkeitsänderungsvektors durch den betrachteten Stoß, und der EES-Wert (energy equivalent speed; in km/h) herangezogen. Letzterer stellt eine Geschwindigkeitsangabe dar, die stellvertretend für die am Fahrzeug verrichtete Verformungsarbeit steht und dazu dient, das Maß an Deformationsarbeit, das ein Fahrzeug bei einem Zusammenstoß geleistet hat, zu beschreiben.

Fußraumintrusion:

Die Fußraumintrusion wurde durch festgelegte Messpunkte an bestimmten Stellen der Karosserie bestimmt (siehe Abbildung 4).

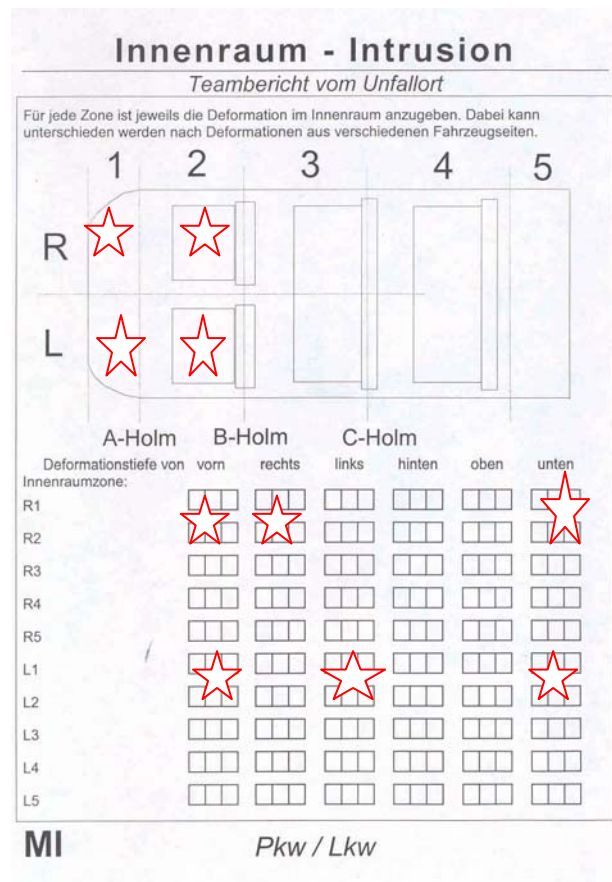


Abbildung 5: Intrusionssektoren (für die Auswertung relevante Sektoren mit Stern markiert)

Quelle: GIDAS Codebook 2009

Die Karosserie wird dazu in 5 Sektoren an der rechten und linken Fahrzeugseite unterteilt. Für jeden dieser 10 Sektoren kann die Deformierung von oben, unten, rechts, links, vorn oder hinten bestimmt werden ähnlich einem Quader, dessen 6 Seiten unterschiedlich eingedrückt werden können. Diese Messungen sind zum Teil durch fehlende Referenzpunkte bei stark deformierten Insassenzellen erschwert. Für die vorliegende Arbeit kamen Intrusionen der Sektoren L1-vorn, L1-links, L1-unten, L2-vorn, L2-links und L2-unten (bei Beifahrern die entsprechenden Sektoren der rechten Fahrzeugseite) zur Auswertung.

Der äußere Verformungsgrad des Fahrzeuges wurde ebenfalls in Sektoren erfasst.

Die verschiedenen Fahrzeuge gliedern sich in folgende Fahrzeugsegmente entsprechend der Einteilung des Kraftfahrt-Bundesamtes: ³³

- Kleinwagen (z.B. VW Polo, Opel Corsa)
- Wagen der unteren Mittelklasse (z.B. VW Golf, Ford Focus) – KBA: Kompaktklasse
- Wagen der Mittelklasse (z.B. BMW 3er, Opel Vectra)
- Wagen der oberen Mittelklasse (z.B. BMW 5er, Mercedes E-Klasse)
- Wagen der Oberklasse (z.B. Mercedes S-Klasse)
- Sportwagen
- andere (z.B. Vans)

Für die Einteilung der Fahrzeuge in jüngere und ältere Autos wurde die Einführung von Crash-Tests durch EuroNCAP herangezogen. Diese Gesellschaft bewertet nach erfolgtem Test die Sicherheit neu auf den Markt gekommener Fahrzeuge. EuroNCAP wurde 1996 gegründet und veröffentlichte ein Jahr später die ersten Bewertungen. Da die Hersteller zu dieser Zeit die Konstruktion ihrer Fahrzeuge für die Testbedingungen optimierten, wurde für die vorliegende Untersuchung das Jahr 1997 als Grenze für jüngere und ältere PKW gewählt: Autos mit einem Baujahr 1997 und älter wurden der pre-EuroNCAP-Ära zugeordnet, während Autos mit einem Baujahr 1998 und jünger die post-EuroNCAP-Ära darstellen.

Im Rahmen der Unfallrekonstruktion wurden jeweils 2 verletzungsverursachende Fahrzeugteile ermittelt.

Statistik:

Zur statistischen Auswertung erfolgte zunächst die Prüfung der Werte auf Normalverteilung mit dem Test nach David, Pearson und Stephens. Normal verteilte Proben wurden mit dem t-Test, nicht normal verteilte Proben mit dem Mann-Whitney-Wilcoxon-Test auf Signifikanz geprüft. Häufigkeitsverteilungen wurden mit der χ^2 -Vierfeldertafel getestet. Die Darstellung der Werte in Diagrammen erfolgte durch Boxplots.

Die Daten wurden mit dem Programm SPSS erfasst und berechnet, die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm Primer. Die Reinschrift erfolgte mit dem Büroprogramm MS Word, die Literaturverwaltung mit Citavi. Die abgebildeten Unfallfotos entstammen der GIDAS-Datenbank.

4. Charakteristische Frakturen und zu Grunde liegende Unfälle



Abbildung 6: Innenknöchelfraktur rechts, zugezogen als Beifahrer in einem Fahrzeug der Mittelklasse (BMW 3er) am 21.07.2001 bei Frontalzusammenstoß mit einem Kia Pride. Die Geschwindigkeitsänderung Delta-v beträgt 37 km/h, der EES-Wert 25 km/h. Eine Fußraumintrusion liegt im Sektor R1-vorn mit 10 cm, im Sektor R1-rechts mit 2 cm vor.

Quelle der Röntgenbilder: Klinikum Pirna



Abbildung 7: Calcaneusfraktur links, zugezogen als Fahrer in einem Kleinwagen Ford Fiesta am 10.01.2001 bei Frontalzusammenstoß mit einem Ford Fiesta. Die Geschwindigkeitsänderung Delta-v beträgt 20 km/h, der EES-Wert 25 km/h. Eine Fußraumintrusion liegt im Sektor L1-vorn mit 10 cm, im Sektor L1-links mit 10 cm und im Sektor L2-links mit 10 cm vor. Quelle der Röntgenbilder: Klinikum Pirna



Abbildung 8: Talusfraktur links, zugezogen von einem Fahrer in einem Wagen der unteren Mittelklasse (Suzuki Baleno) am 17.06.2000 bei Frontalzusammenstoß mit Opel Kadett. Die Geschwindigkeitsänderung Δv beträgt 75 km/h, der EES-Wert 58 km/h. Eine Fußraumintrusion liegt im Sektor L1-vorn mit 30 cm und im Sektor L2-vorn mit 20 cm vor.

Quelle der Röntgenbilder: Klinikum Pirna



Abbildung 9: Fraktur des Os naviculare links, zugezogen von einem Fahrer in einem Kleinwagen am 19.06.2000 bei Frontalaufprall auf stehenden Schilderwagen. Die Geschwindigkeitsänderung Δv beträgt 50 km/h, der EES-Wert 45 km/h. Eine Fußraumintrusion liegt im Sektor L1-vorn mit 5 cm und im Sektor L2-unten mit 3 cm vor.

Quelle der Röntgenbilder: Krankenhaus Radeberg



Abbildung 10: Fraktur des 4. und des 5. Mittelfußknochens rechts, zugezogen von einem Fahrer in einem Kleinwagen (Peugeot 205) am 23.05.2001 bei Frontalzusammenstoß mit BMW 3er. Die Geschwindigkeitsänderung Δv beträgt 33 km/h, der EES-Wert 25 km/h. Eine Fußraumintrusion liegt nicht vor.

Quelle der Röntgenbilder: Krankenhaus Radebeul

5. Auswertung

5.1 Erfasste Verletzungen

Im Untersuchungszeitraum 1983 bis März 2007 wurden von den Unfallforschungen Hannover und (ab 1999) Dresden insgesamt 11.255 Frakturen/Luxationen der unteren Extremität erfasst. Davon waren 10.519 AIS90 0 und 1-Verletzungen, sodass schließlich 736 Beinverletzungen dem Schweregrad AIS90 2 und höher zugeordnet werden konnten. 135 Unfälle, bei denen 141 PKW-Frontinsassen Frakturen und Luxationen im Bereich Fuß/OSG erlitten, wurden registriert. Diese Insassen verteilten sich auf 140 Autos. Es verletzten sich 89 männliche und 51 weibliche Insassen (in einem Fall wurde das Geschlecht nicht erfasst). Das durchschnittliche Alter der verletzten Insassen betrug $38,5 \pm 16,8$ Jahre (Minimum 15, Maximum 83 Jahre). Die Zuordnung auf die Sitzposition ergab 117 Fahrer und 24 Beifahrer. Damit ergab sich eine Frontsitz-Belegungsquote von 1 : 1,2 (Fahrer : Beifahrer). Insgesamt wurden 174 Frakturen und Luxationen an 149 Füßen diagnostiziert. Damit machen diese Verletzungen 23,6 Prozent aller erfassten Beinverletzungen des Schweregrades AIS90 2 und höher aus.

	linker Fuß		rechter Fuß**	
Fahrer	63	42,9%	59	40,1 %
Beifahrer	10	6,8 %	15	10,2 %

Tabelle 1: Seitenverteilung der Frakturen und Luxationen

** in zwei Fällen Seitenlokalisierung nicht erfasst

Verletzte Fußregion	Verletzungen bei Fahrern	Verletzungen bei Beifahrern
OSG	69 40,3 %	13 7,6 %
Rückfuß	32 18,7 %	2 1,2 %
Mittfuß	14 8,2 %	2 1,2 %
Vorfuß	29 17 %	10 5,8 %

Tabelle 2: Anzahl der Frakturen und Luxationen der einzelnen Fußregionen

Bei 3 Unfallopfern konnte aus der Dokumentation der Diagnostik nicht mit einer ausreichenden Sicherheit auf die anatomische Lokalisation der Verletzung geschlossen werden.

Es konnten folgende Einzelverletzungen analysiert werden:

Fußregion	n	preEuroNCAP	postEuroNCAP
OSG: Malleolarfrakturen	80	65	15
- davon offen	2	1	1
- Luxationsfrakturen	6	5	1
Pilonfrakturen	2	2	
Rückfuß: Talusfrakturen	5	4	1
- davon Luxationsfrakturen	2	2	
subtalare Luxationen	2	2	
- davon offen	1		
Calcaneusfrakturen	26	22	4
subtotale Amputation	1	1	
Mittfuß: Chopart-Luxationen	2	2	
Naviculare-Frakturen	4	3	1
Cuboidfrakturen	5	5	
Cuneiformia-Frakturen	3	3	
subtotale Amputationen	1	1	
Decollement	1	1	
Vorfuß: Metatarsale-Frakturen	39	31	8
- davon offen	1	1	

Tabelle 3: Aufschlüsselung der Frakturen und Luxationen der einzelnen anatomischen Regionen

In 10 Fällen wurden beide Füße verletzt (in 9 Fällen in Fahrzeugen mit einem Baujahr 1997 und älter – preEuroNCAP), in ebenfalls 10 Fällen wurden mehrere anatomische Regionen eines Fußes verletzt (in 9 Fällen in Fahrzeugen mit einem Baujahr 1997 und älter – preEuroNCAP).

33 Insassen (23,4 Prozent) waren polytraumatisiert, von diesen verstarben 17. 81 Prozent der Insassen waren angeschnallt.



Abbildung 11: Typische Fußeklemmung durch Intrusion des Bodenblechs/Spritzwand einerseits und Pedalerie andererseits (Polytrauma mit Tod am Unfallort)

Quelle: GIDAS-Datenbank

5.2 Charakterisierung der Fahrzeuge

5.2.1 Fahrzeugsegment

Am häufigsten wurden Frakturen und Luxationen des Fußes und des oberen Sprunggelenkes in Fahrzeugen der unteren Mittelklasse, gefolgt von Kleinwagen und Autos der Mittelklasse, beobachtet.

Die Aufschlüsselung der beteiligten Fahrzeuge auf die einzelnen Fahrzeugsegmente gibt folgende Tabelle wieder:

Fahrzeugsegment	Fahrer		Beifahrer	
Kleinwagen	30	21,4 %	2	1,4 %
Untere Mittelklasse	40	28,6 %	9	6,4 %
Mittelklasse	27	19,3 %	7	5 %
Obere Mittelklasse	13	9,3 %	4	2,8 %
Andere	3	2,1 %	1	0,7 %
Oberklasse	2	1,4 %	0	
Sportwagen	1	0,7 %	1	0,7 %

Tabelle 4: Anzahl der Fahrzeuge je Fahrzeugklasse, in denen sich die Frakturen und Luxationen ereigneten.

33 Prozent der verunfallten Fahrzeuge waren mit einem Front-Airbag ausgestattet, dieser löste in 30 Prozent der Fälle aus.

5.2.2 Unfallort

Nur 19 PKW (13,6 Prozent) verunfallten innerorts, der überwiegende Teil mit 121 (86,4 Prozent) außerorts.

Die Aufschlüsselung der verunfallten PKW auf die verschiedenen Straßenarten ergibt sich aus folgender Tabelle:

	n	Prozent
Autobahn	13	9,3
Bundesstraße	26	18,6
Landes-, Kreisstraße	49	35,0
Stadtstraße	12	8,6
Andere	3	2,1
Unbekannt	37	26,4
Total	140	100,0

Tabelle 5: Unfallort (Straßenart), wo sich die Frakturen und Luxationen ereigneten
(fahrzeugorientierte Darstellung)

Über die Hälfte der Fahrzeuge (82; 58,6 Prozent), verunfallte am Tag, 19 (13,6 Prozent) bei Dämmerung und 38 (27,1 Prozent) in der Nacht (bei einem Fahrzeug waren diesbezüglich keine Angaben verfügbar). 108 Fahrzeuge (77,1 Prozent) verunfallten bei niederschlagsfreiem Wetter, bei 26 Fahrzeugen (18,6 Prozent) regnete und bei 4 Fahrzeugen (2,9 Prozent) schneite es (bei zwei Fahrzeugen waren keine diesbezüglichen Angaben verfügbar).

Jedes zweite Fahrzeug (n=70) hatte ein anderes Fahrzeug als Unfallgegner, 22 Fahrzeuge (15,7 Prozent) hatten 2 und mehr Fahrzeuge als Unfallgegner und 34,3 Prozent (n=48) hatten ein festes Hindernis (Baum etc.) als Unfallgegner.

5.2.3 Aufprallrichtung

Entsprechend der Aufprallrichtung wurden überwiegend Frontalcrashes beobachtet:

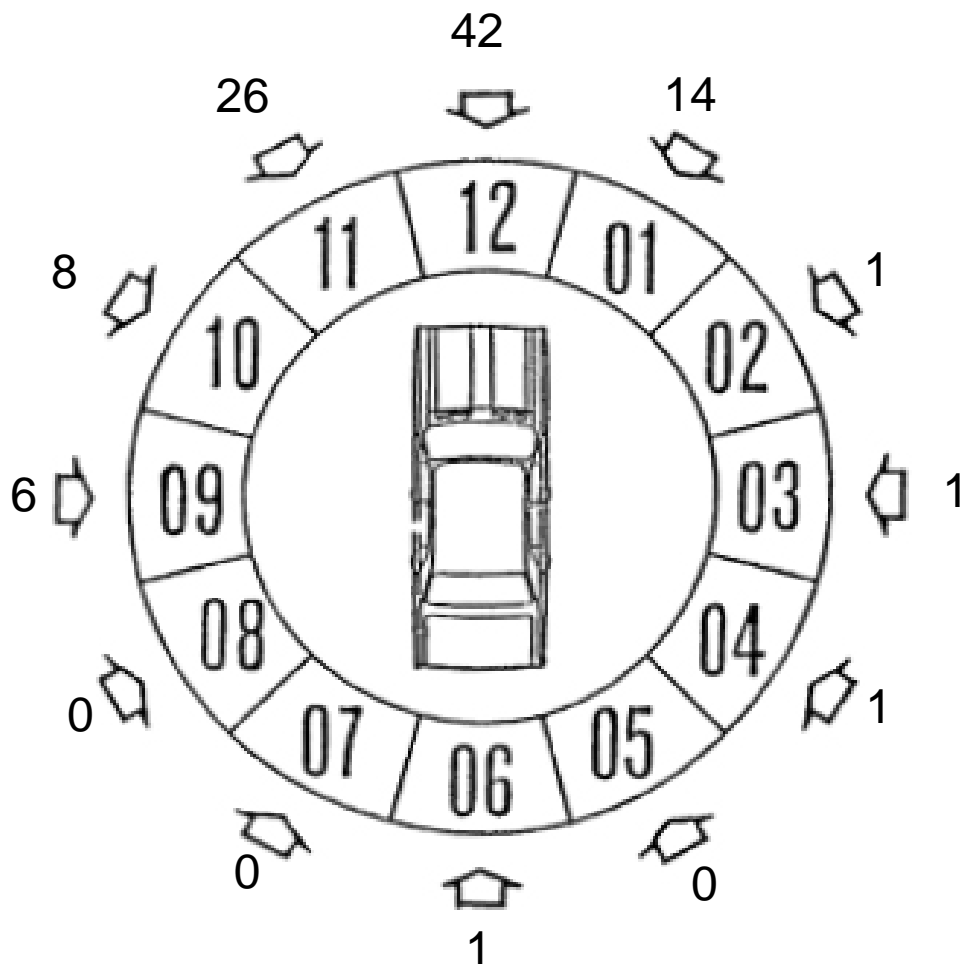


Abbildung 12: Aufprallrichtung. Fahrzeugorientierte Darstellung. n=139

(bei einem Fahrzeug wurde keine Aufprallrichtung erfasst)

Quelle: GIDAS Codebook 2009

5.2.4 Verletzungsverursachendes Fahrzeugteil

Als verletzungsverursachendes Fahrzeugteil wurde dasjenige erfasst, das die Verletzung maßgeblich verursachte. Bei einer Verletzung infolge des Zusammenwirkens mehrerer Teile wurde auch das zweite bei der Verursachung maßgebliche Teil erfasst (nur Fahrer ausgewertet):

Lokalisation des verletzungsverursachenden Teils:		1. verletzungsverursachendes Teil	2. verletzungsverursachendes Teil	Σ	%
Innerhalb Fahrzeug	Pedalerie	17	10	27	31,8
	Spritzwand	22		22	25,9
	Bodenblech	3	1	4	4,7
	Seitenblech	5	1	6	7,1
	Lenksäule	4		4	4,7
	Unterseite	13	2	15	17,6
	Armaturentafel				
	Türverkleidung	4		4	4,7
Außerhalb Fahrzeug	Acker, Wiese		1	1	1,2
	Baum		2	2	2,4
Summe	n	68	17	85	100,0

Tabelle 6: Verletzungsverursachendes Fahrzeugteil (Verletzungsorientierte Darstellung, n=85)

5.3 Geschwindigkeitsparameter bei den beobachteten Verletzungen

Der Betrag der Geschwindigkeitsänderung Delta-v wurde bei den einzelnen verletzten Fußregionen untersucht und zeigte keine signifikanten Unterschiede:

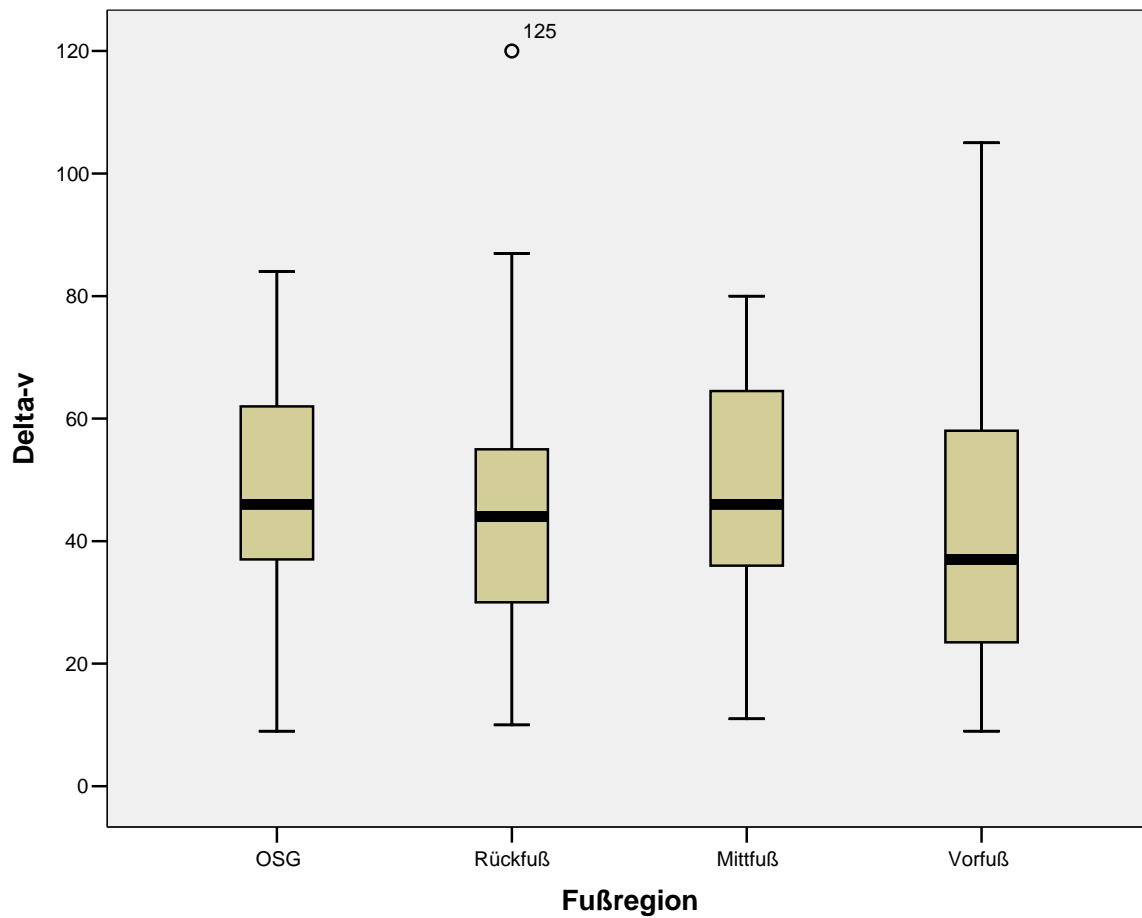


Abbildung 13: Geschwindigkeitsänderung Delta v (in km/h) bei verletzten Fußregionen.

Verletzungsorientierte Darstellung. Unterschiede statistisch nicht signifikant.

Ein identisches Verhalten zeigte auch der EES-Wert:

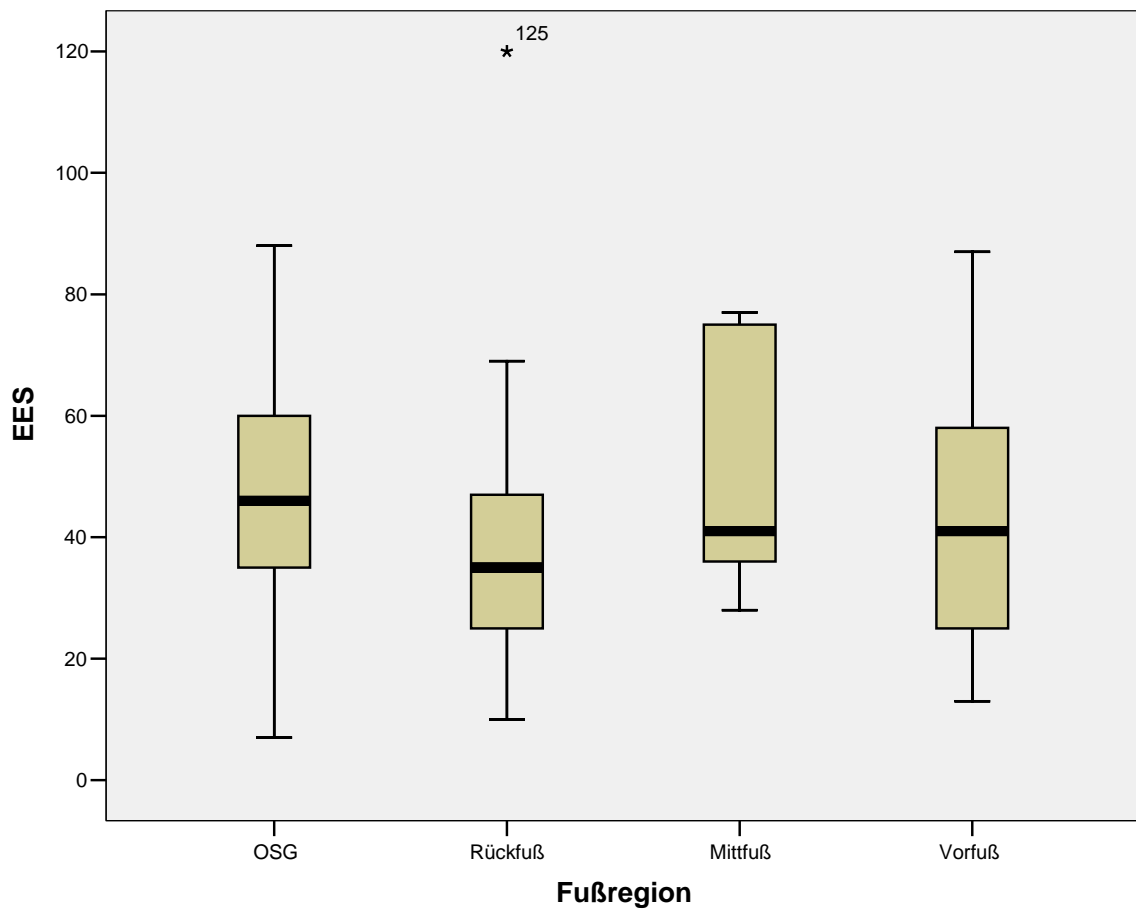


Abbildung 14: EES-Wert (in km/h) bei verletzten Fußregionen. Verletzungsorientierte Darstellung. Unterschiede statistisch nicht signifikant.

Bei gegebenen FCI-Werten (functional capacity index) zeigten sich folgende Delta v-Werte:

			Cases	
			Valid	
Delta-v [km/h]	Functional Capacity Index (Fuß)	EuroNCAP	N	Percent
	FCI 5	pre	3	100,0%
		post	2	100,0%
	FCI 4	pre	38	95,0%
		post	23	100,0%
	FCI 3	pre	15	100,0%
		post	5	100,0%
	FCI 2	pre	2	100,0%
		post	2	100,0%

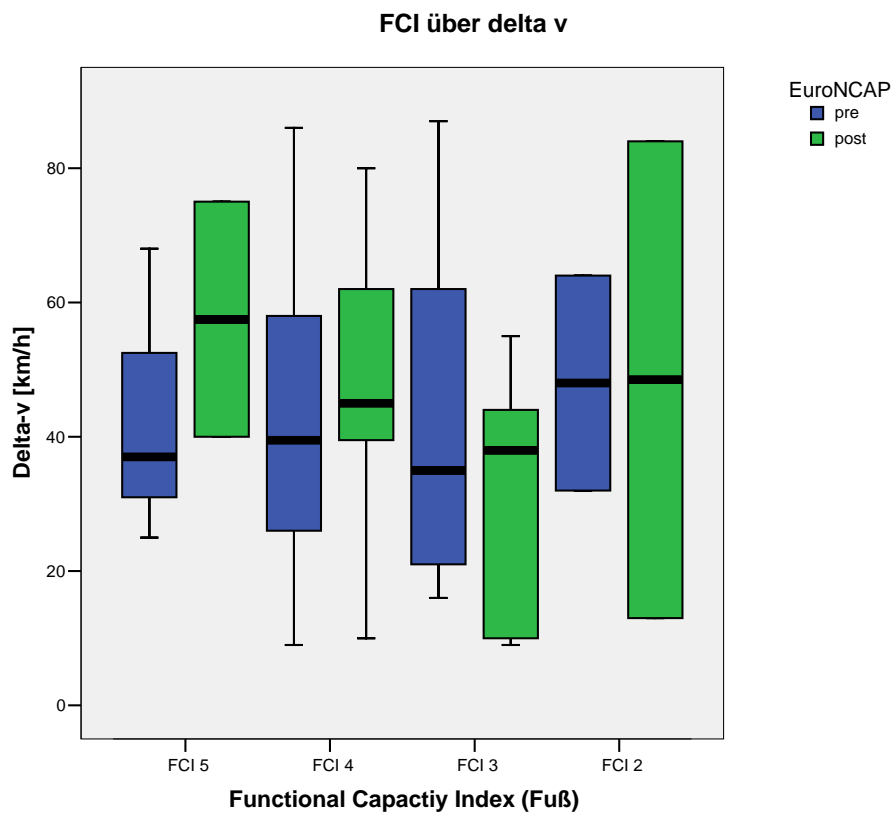


Abbildung 15: Geschwindigkeitsänderung Delta v (in km/h) bei gegebenem FCI-Wert.

Verletzungsorientierte Darstellung. Unterschiede statistisch nicht signifikant.

Bei getrennter Untersuchung älterer (vor Einführung von EuroNCAP) und neuerer (nach Einführung von EuroNCAP) Fahrzeuge zeigte sich für die anatomischen Regionen OSG, Rück- und Mittfuß ein (statistisch nicht signifikanter) Trend zu höheren Delta-v-Werten in neueren Fahrzeugen, während sich für den Vorfuß ein gegenläufiger Trend ergab:

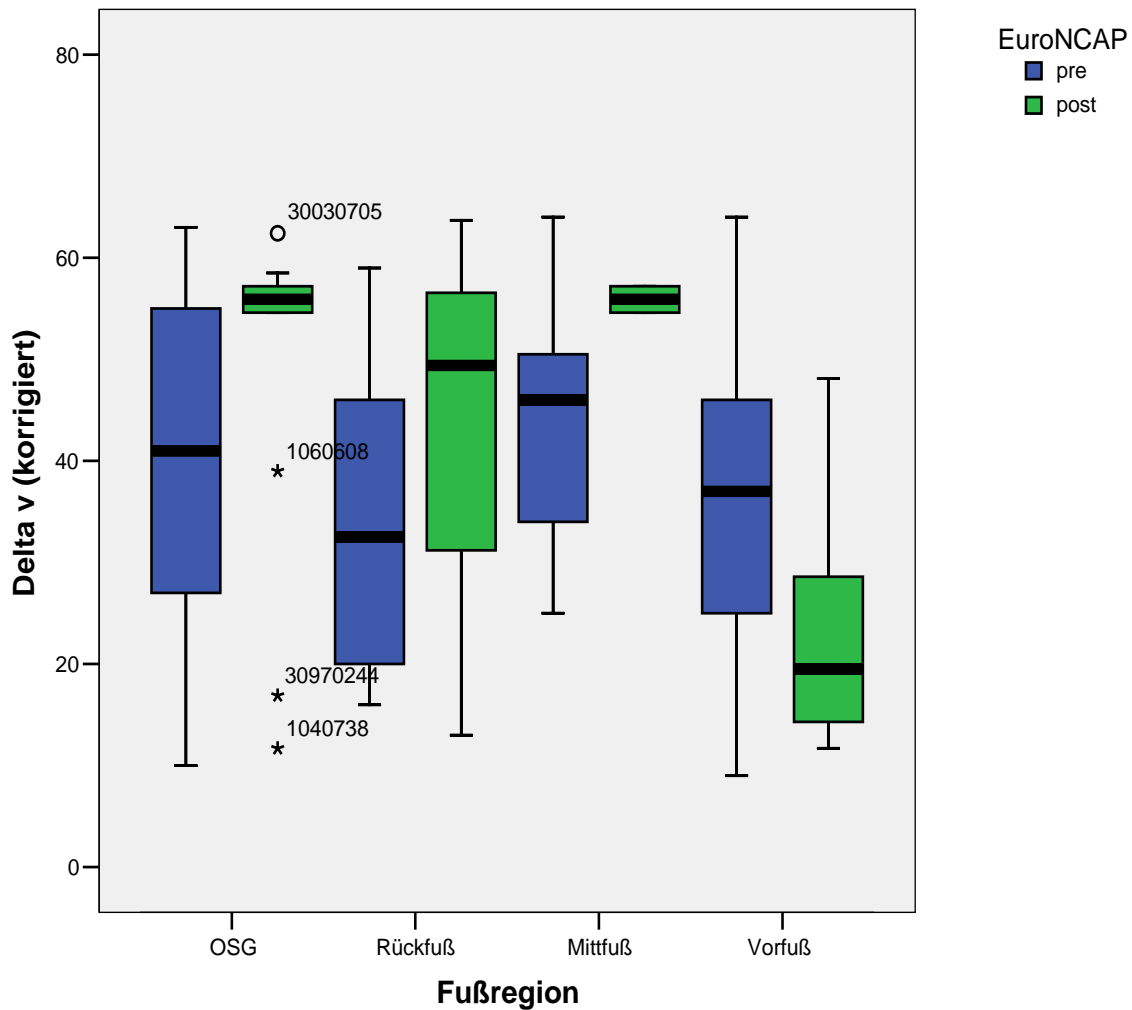


Abbildung 16: Geschwindigkeitsänderung Delta v (in km/h) bei verletzten Fußregionen und aufgliedert nach Fahrzeualter (pre-/post EuroNCAP).

Verletzungsorientierte Darstellung. Unterschiede statistisch nicht signifikant.

5.4 Fußraumintrusion bei den beobachteten Verletzungen

Zwischen den Verletzungen der einzelnen anatomischen Regionen fanden sich keine signifikanten Unterschiede der Fußraumintrusion:

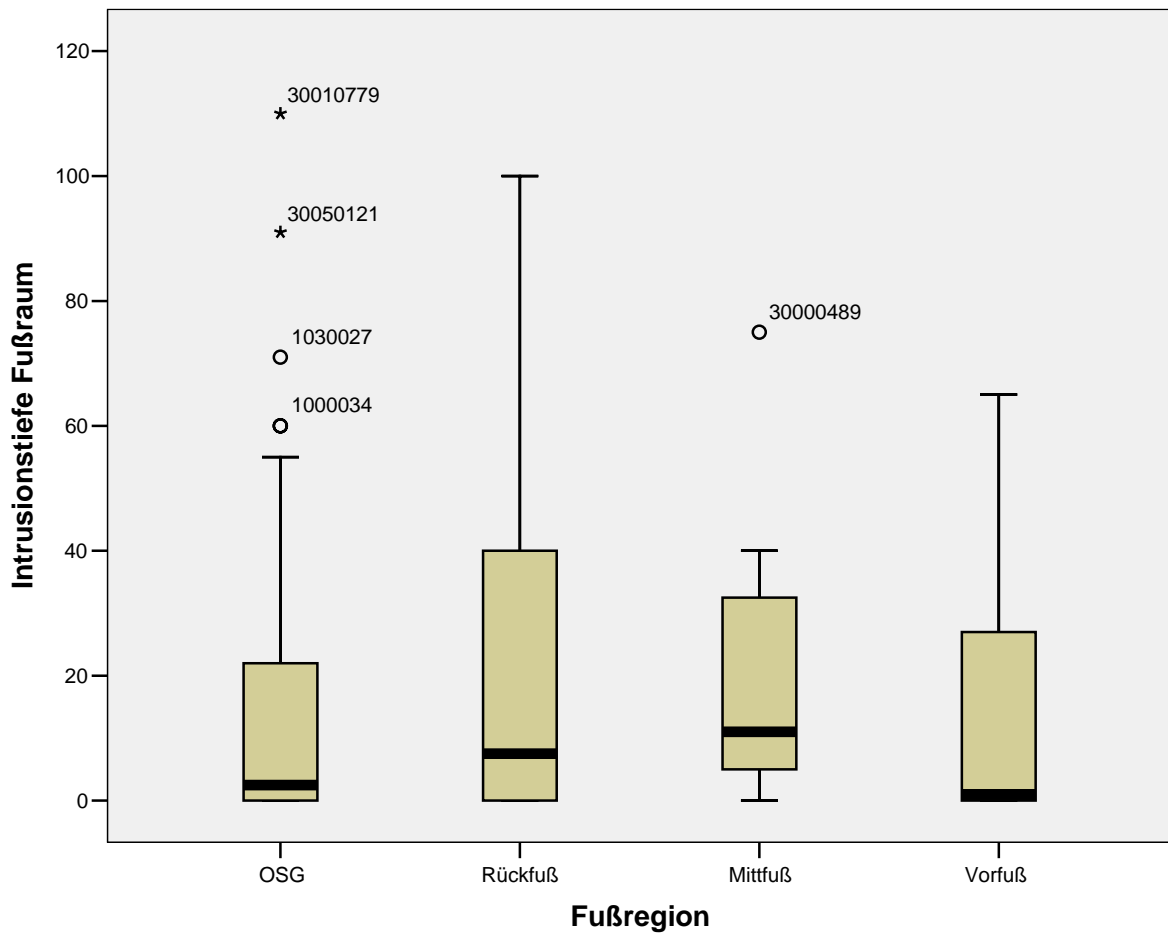


Abbildung 17: Intrusionstiefe des Fußraumes (in cm) bei verletzten Fußregionen.

Verletzungsorientierte Darstellung. Unterschiede statistisch nicht signifikant.

Bei der getrennten Untersuchung neuerer und älterer Fahrzeuge ergab sich ein Trend zu höheren Fußraumintrusionen bei Verletzungen der OSG und des Mittfußes in neueren Fahrzeugen:

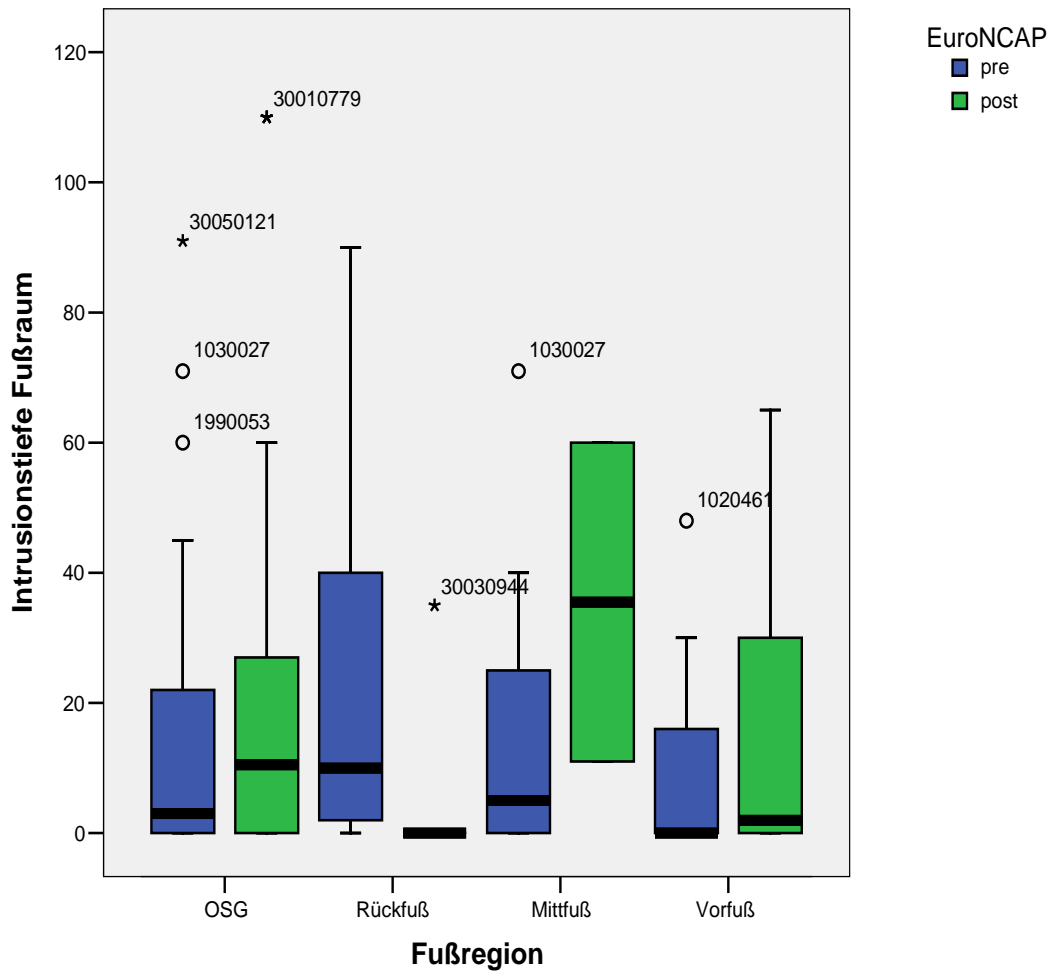


Abbildung 18: Intrusionstiefe des Fußraumes (in cm) bei verletzten Fußregionen, aufgliedert nach Fahrzeugalter pre-/post EuroNCAP). Verletzungsorientierte Darstellung. Unterschiede statistisch nicht signifikant.

Die folgenden Darstellungen schlüsseln die bei den verletzten Fußregionen beobachteten Intrusionswerte auf Fahrer und Beifahrer auf:

Case Processing Summary

			Cases	
			Valid	
	Fußregion	EuroNCAP	N	Percent
Intrusion linker Fußraum [cm]	OSG	pre	26	68,4%
		post	21	77,8%
	Rückfuß	pre	12	63,2%
		post	5	83,3%
	Mittfuß	pre	9	81,8%
		post	2	100,0%
	Vorfuß	pre	10	45,5%
		post	7	63,6%

Fußraumintrusion (Fahrer) über Fußverletzung

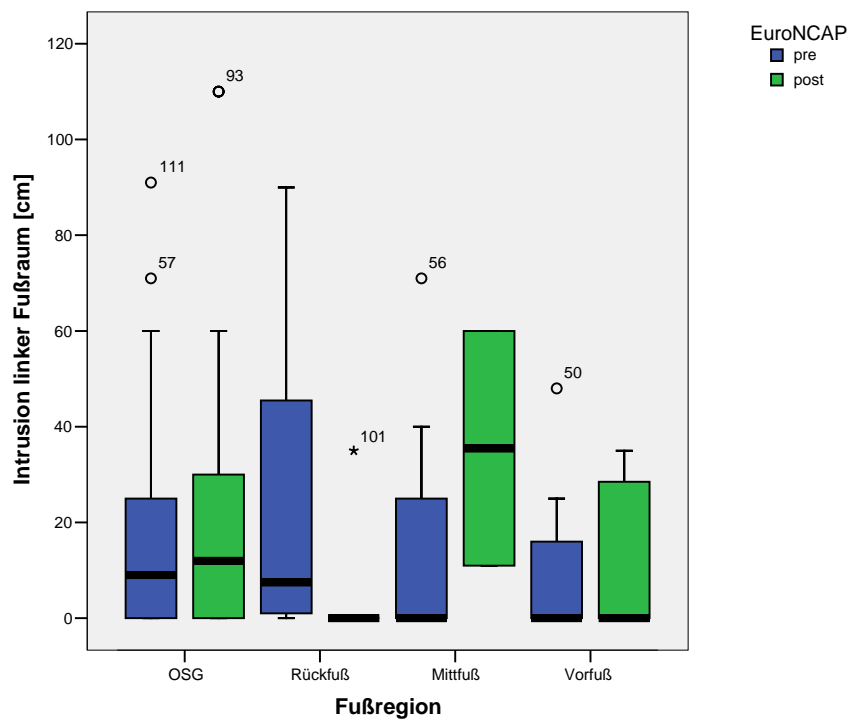


Abbildung 19: Intrusionstiefe des Fußraumes (in cm) bei verletzten Fußregionen von Fahrern, aufgliedert nach Fahrzeugalter pre-/post EuroNCAP). Verletzungsorientierte Darstellung. Unterschiede statistisch nicht signifikant.

Fußraumintrusion (Beifahrer) über Fußverletzung

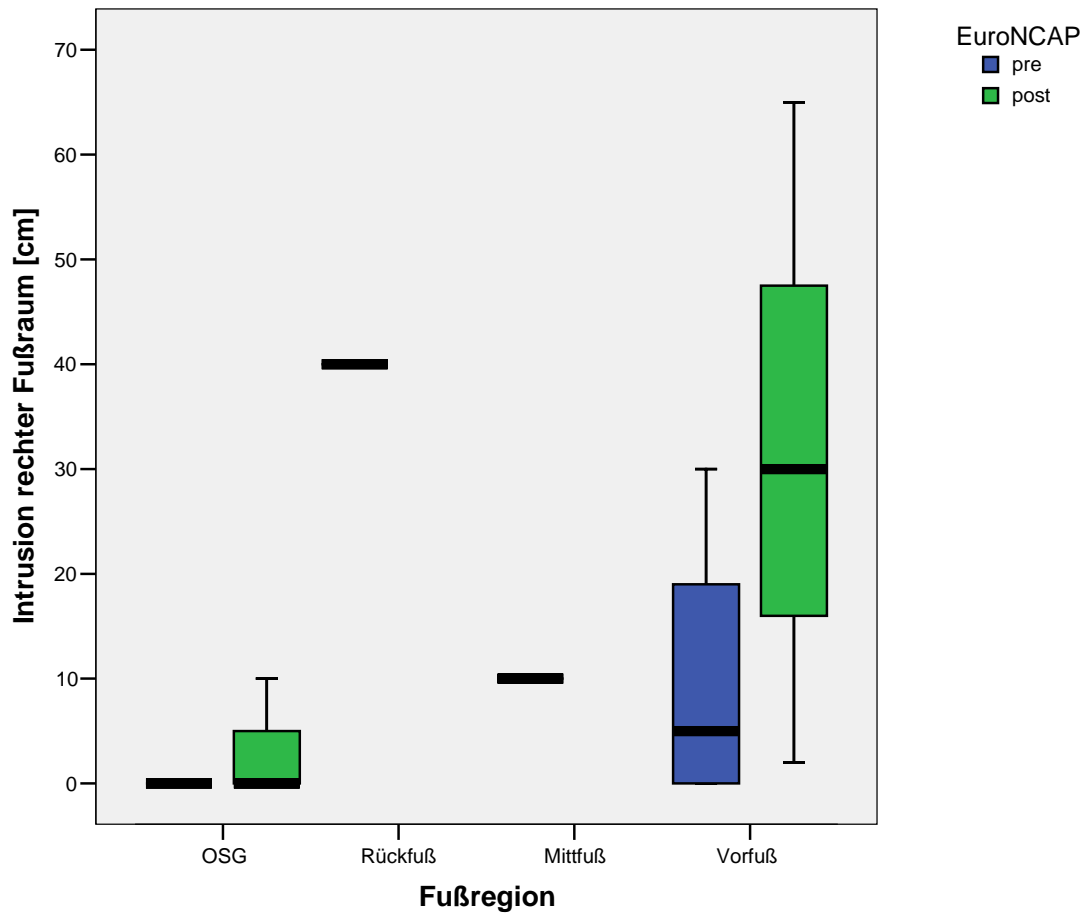


Abbildung 20: Intrusionstiefe des Fußraumes (in cm) bei verletzten Fußregionen von Beifahrern, aufgegliedert nach Fahrzeugalter (pre-/post EuroNCAP).

Verletzungsorientierte Darstellung. Unterschiede statistisch nicht signifikant.

Bei zunehmender Geschwindigkeitsänderung Δv wurden bei einem Teil der Verletzungen auch höhere Intrusionswerte beobachtet, jedoch fanden sich andererseits viele Verletzungen, bei denen es trotz höherer Geschwindigkeitsänderung Δv zu keiner nennenswerten Fußraumintrusion kam:

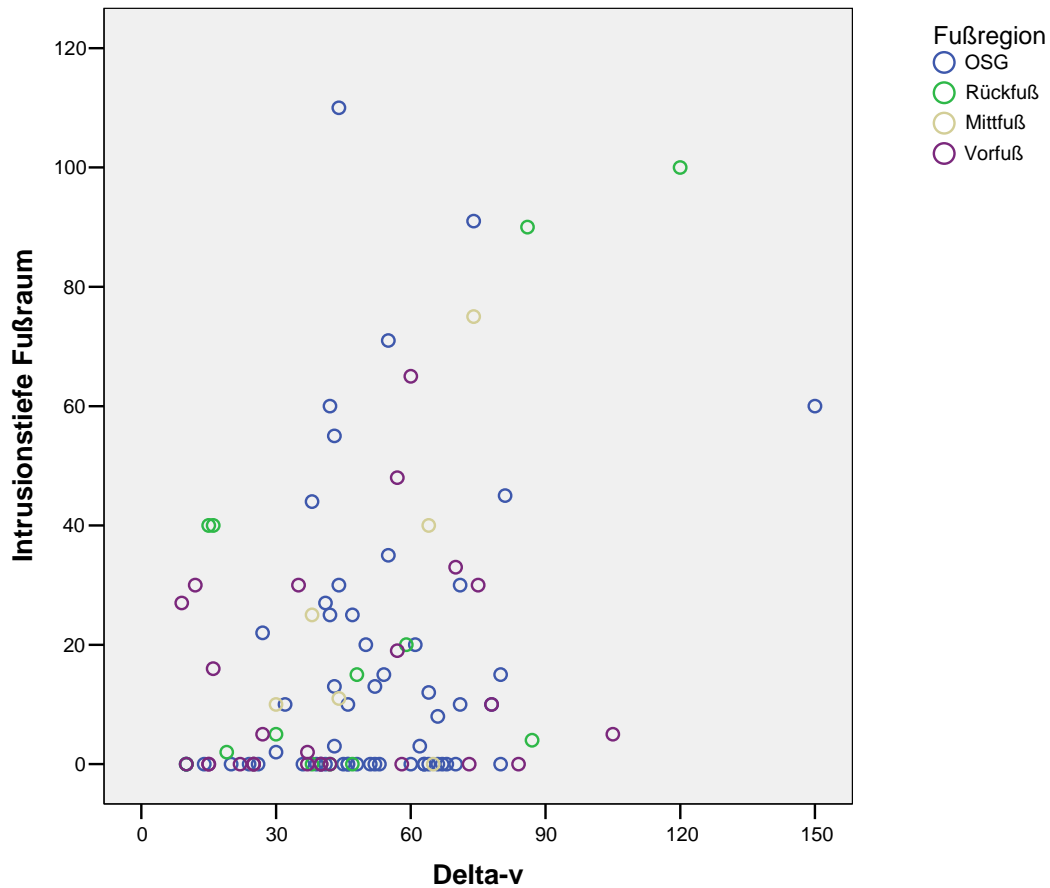


Abbildung 21: Fußraumintrusion (in cm) bei gegebener Geschwindigkeitsänderung Δv (in km/h) in Bezug auf die verletzten Fußregionen. Verletzungsorientierte Darstellung.

Im Folgenden wird die Beziehung zwischen Geschwindigkeitsänderung Delta-v und Fußraumintrusion aufgegliedert in ältere (preNCAP) und neuere (postNCAP) Fahrzeuge:

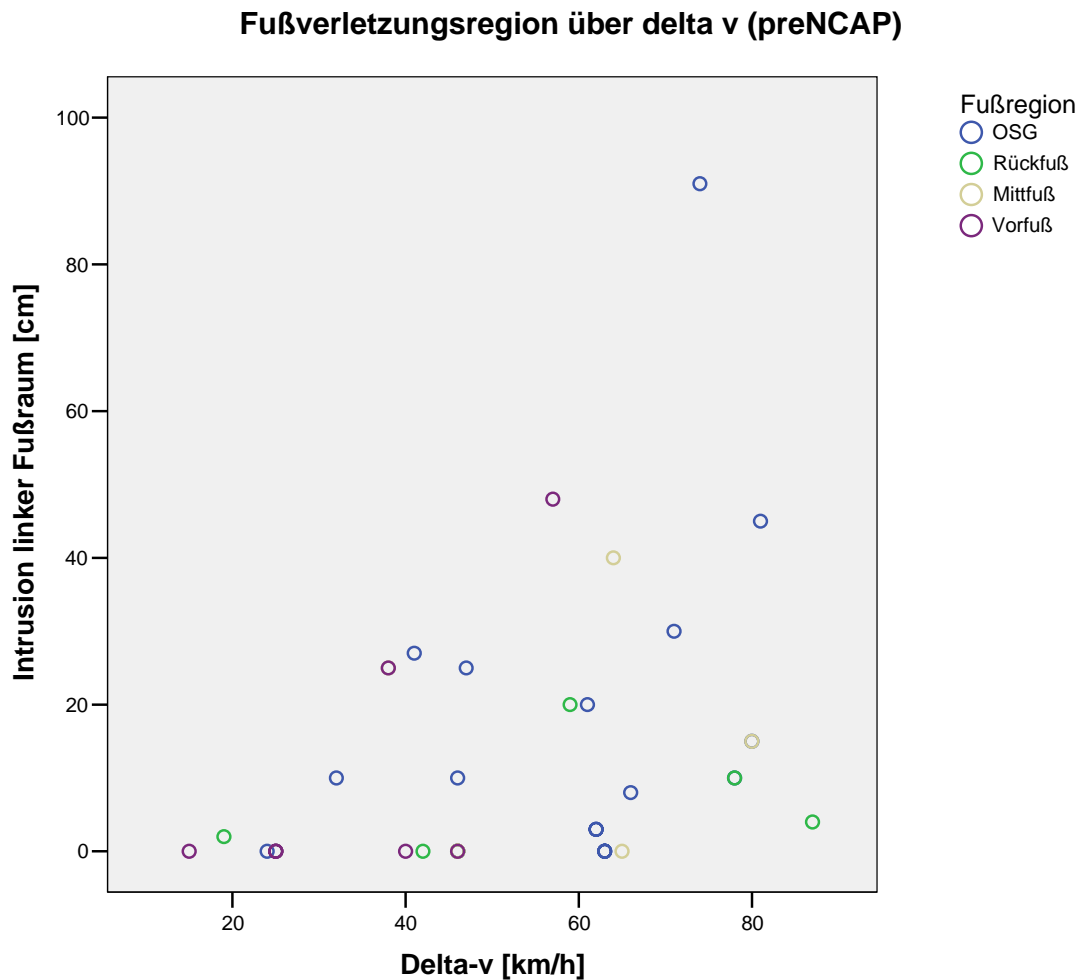


Abbildung 22: Fußraumintrusion (in cm) bei gegebener Geschwindigkeitsänderung Delta v (in km/h) in Bezug auf die verletzten Fußregionen. Ältere Fahrzeuge (pre EuroNCAP). Verletzungsorientierte Darstellung.

Fußverletzungsregion über delta v (postNCAP)

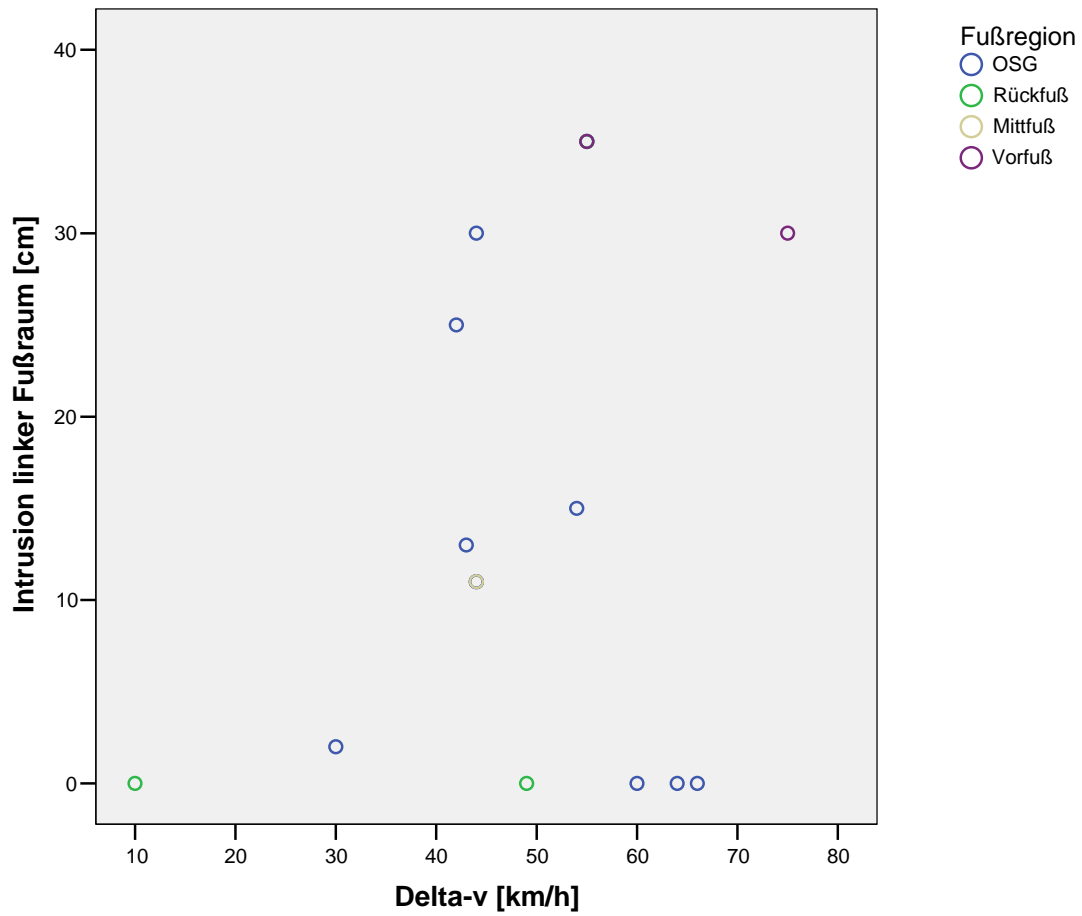


Abbildung 23: Fußraumintrusion (in cm) bei gegebener Geschwindigkeitsänderung Delta v (in km/h) in Bezug auf die verletzten Fußregionen. Jüngere Fahrzeuge (post EuroNCAP). Verletzungsorientierte Darstellung.

Bei Untergliederung in ältere und jüngere Fahrzeuge ergibt sich folgende Darstellung:

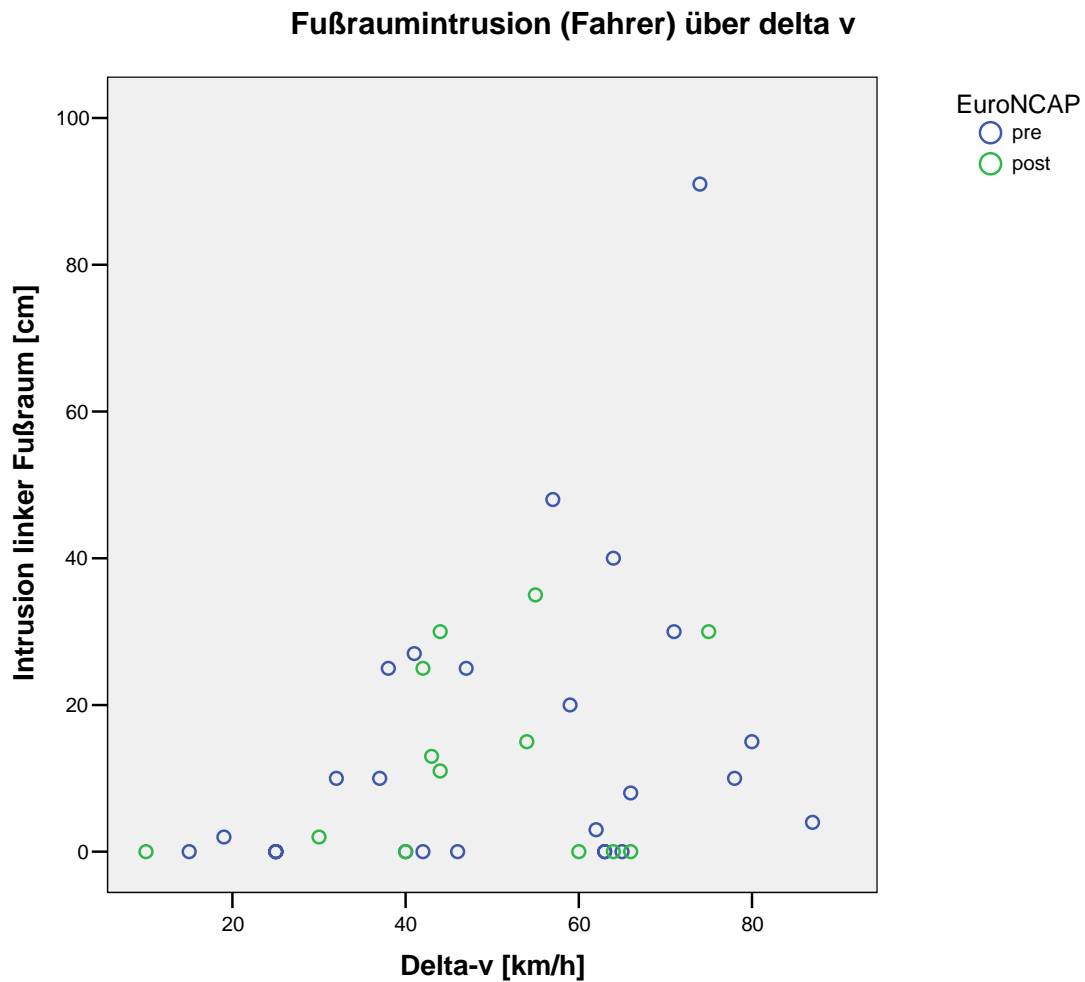


Abbildung 24: Fußraumintrusion (in cm) bei gegebener Geschwindigkeitsänderung Delta v (in km/h) bei Fahrern, aufgliedert nach Fahrzeugalter (pre-/post EuroNCAP) Personenorientierte Darstellung.

Die FCI-Werte zeigten bei älteren (preNCAP) und neueren (postNCAP) Fahrzeugen folgendes Verhalten:

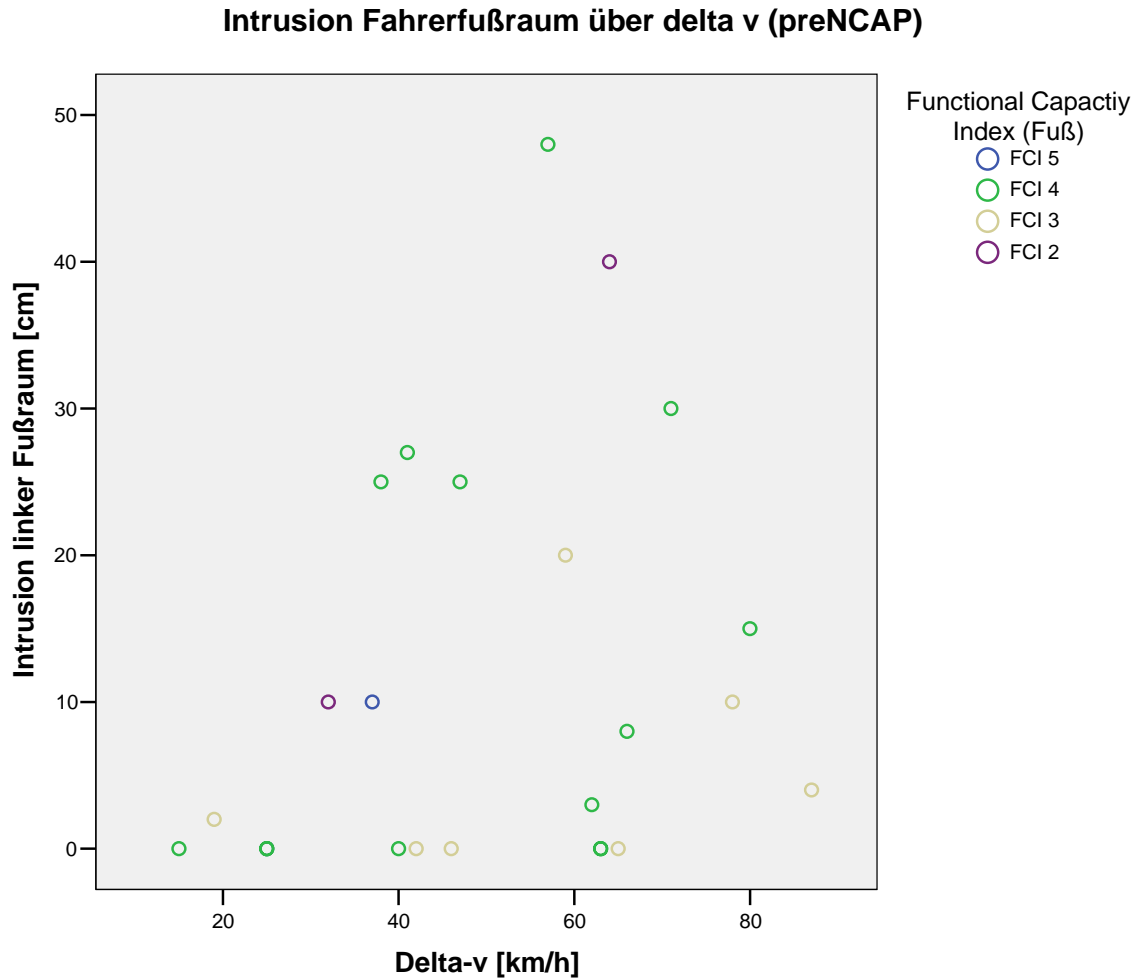


Abbildung 25: Fußraumintrusion (in cm) bei gegebener Geschwindigkeitsänderung Delta v (in km/h) in Bezug auf den FCI-Wert. Ältere Fahrzeuge (pre EuroNCAP). Verletzungsorientierte Darstellung.

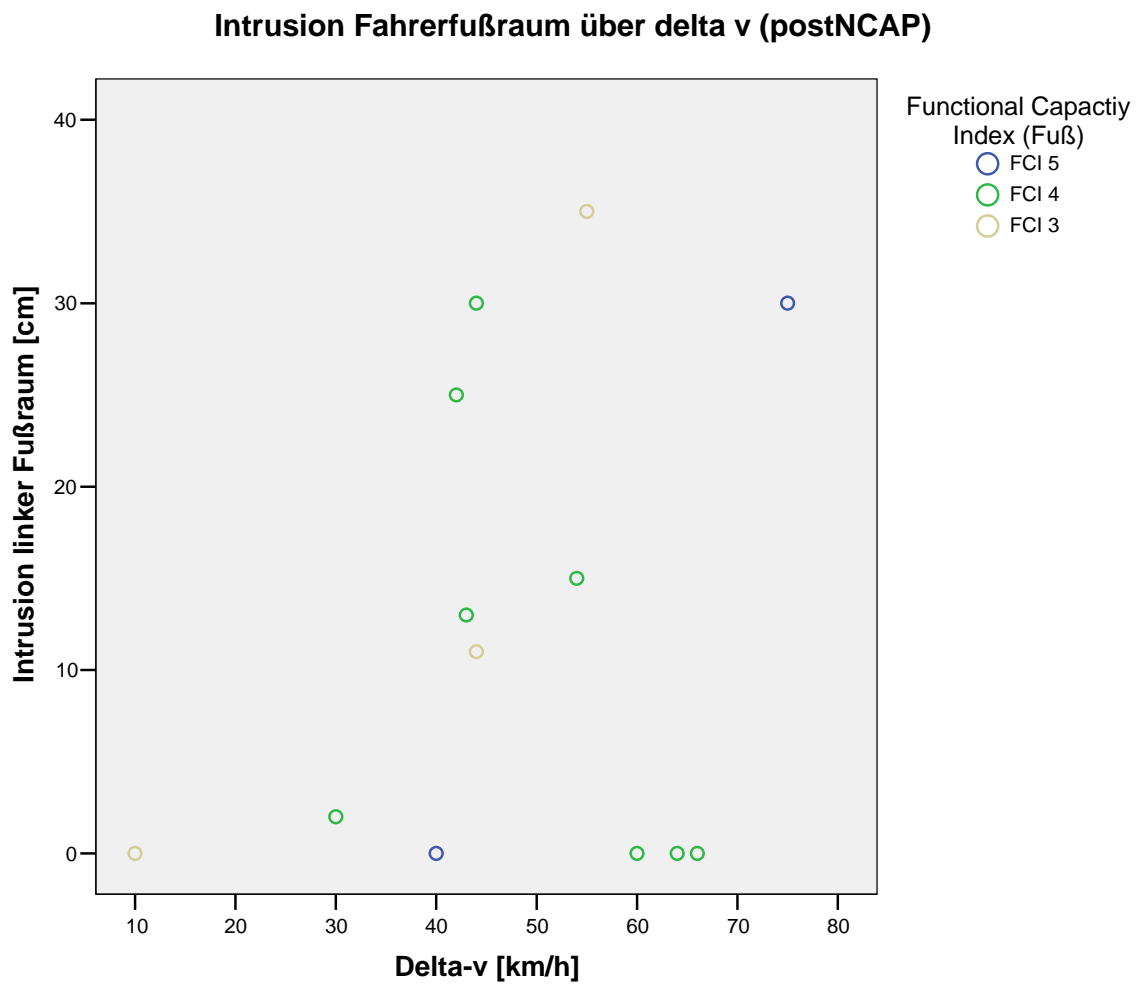


Abbildung 26: Fußraumintrusion (in cm) bei gegebener Geschwindigkeitsänderung Delta v (in km/h) in Bezug auf den FCI-Wert. Jüngere Fahrzeuge (post EuroNCAP). Verletzungsorientierte Darstellung.

Im Folgenden wird die Fahrzeugintrusion der Fußraumintrusion gegenüber gestellt:

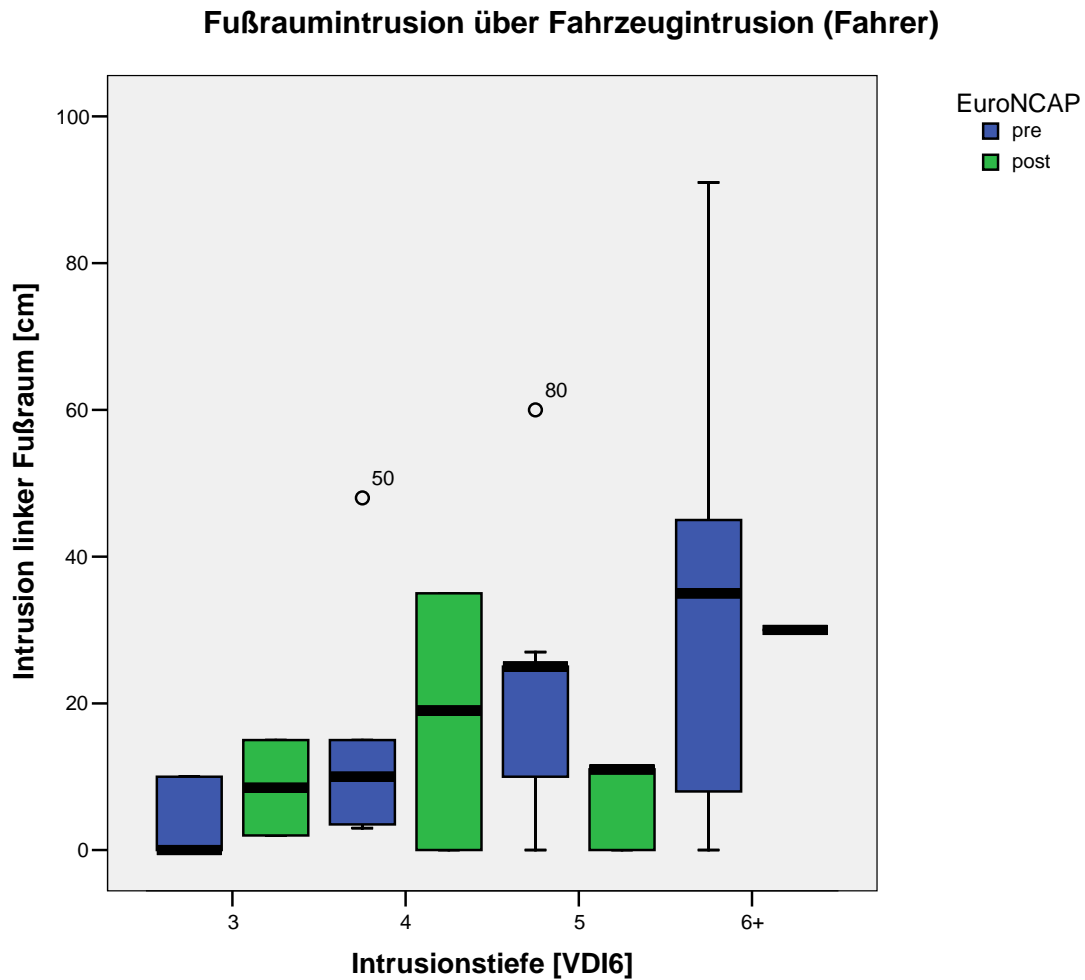


Abbildung 27: Fußraumintrusion der Fahrerseite (in cm) in Abhängigkeit von der Fahrzeugintrusion (Sektoren), aufgliedert nach Fahrzeugalter (pre-/post EuroNCAP). Personenorientierte Darstellung. Unterschiede statistisch nicht signifikant.

Bei der Betrachtung der einzelnen Fahrzeugklassen zeigten sich folgende Intrusionswerte:

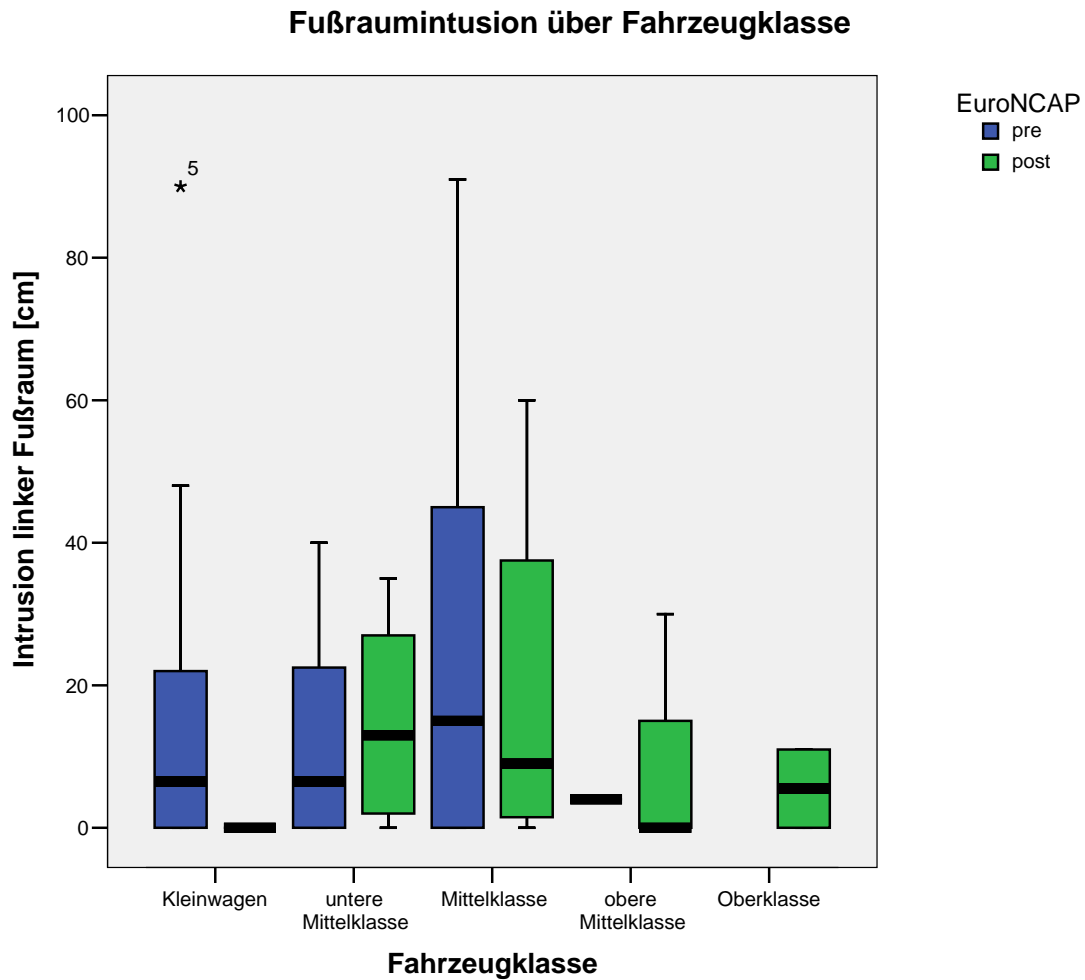


Abbildung 28: Fußraumintrusion der Fahrerseite (in cm) bei einzelnen Fahrzeugklassen, aufgliedert nach Fahrzeugalter (pre-/post EuroNCAP). Unterschiede statistisch nicht signifikant.

5.5 Häufigkeit von Fußverletzungen

Bei älteren Fahrzeugen wurde ein linearer Anstieg der Häufigkeit, bei steigender Geschwindigkeitsänderung Δv eine MAIS2+-Fußverletzung zu erleiden, beobachtet, dahingegen kam es bei neueren Fahrzeugen oberhalb eines Δv -Wertes 60 km/h zu keinem wesentlichen Anstieg der Verletzungshäufigkeit:

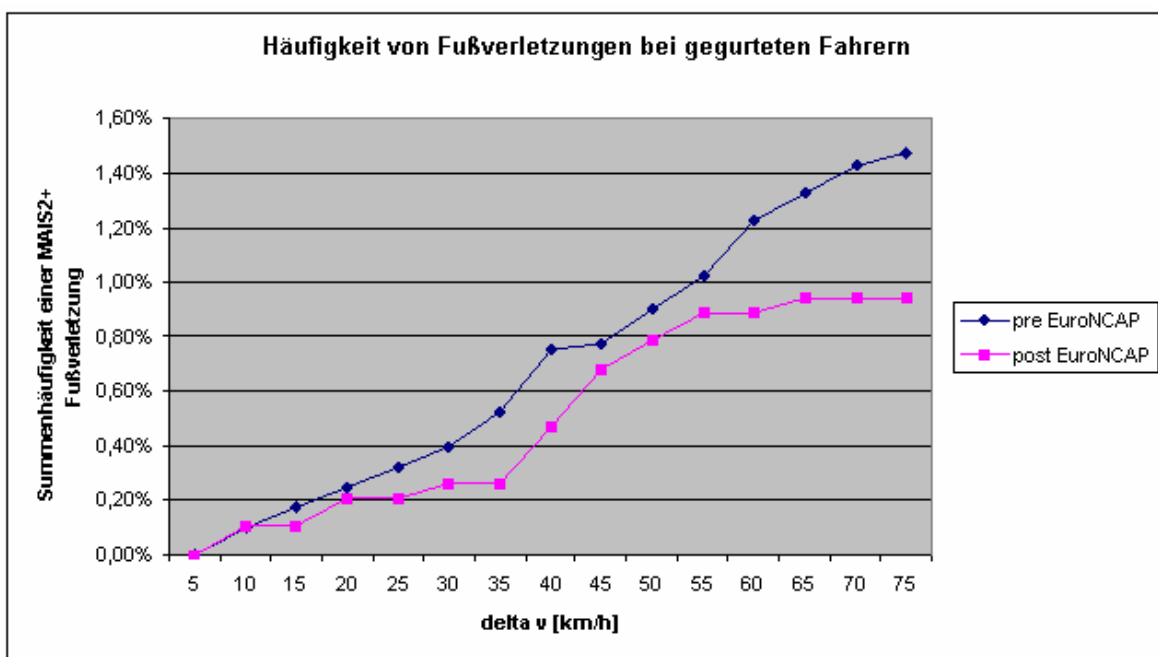


Abbildung 29: Summenhäufigkeit einer MAIS2+-Fußverletzung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsänderung Δv (in km/h), aufgliedert nach Fahrzeugalter pre-/post EuroNCAP). Verletzungsorientierte Darstellung.

6. Diskussion

PKW-Unfälle sind eine häufige Ursache für Verletzungen der unteren Extremität, welche oft eine lebenslange Beeinträchtigung nach sich ziehen.^{34, 35} Sie sind nach den Schädel-Hirn-Verletzungen die zweithäufigste Ursache dauerhafter Behinderung.^{36, 37} Beinverletzungen infolge solcher Unfälle sind meist Hochrasanztraumen und haben dann eine schlechtere Prognose als solche mit geringerer Rasananz.^{11, 38} Es finden sich oft schwere Weichteilschäden, die zu Wundheilungsstörungen, aber auch zu Spät-Komplikationen wie Gelenkinstabilität oder posttraumatischer Arthrose führen. Da bei Verletzungen des Rück- und Mittfußes wie auch des oberen Sprunggelenkes Last tragende Gelenke verletzt werden, ist eine länger dauernde Einschränkung der Gehfähigkeit die Regel.^{34, 16} Verletzungen des anatomischen Komplexes Fuß/Oberes Sprunggelenk stellen mit bis zu einem Drittel aller Beinverletzungen des Schweregrades AIS ≥ 2 die häufigste Form einer Verletzung der unteren Extremität beim Verkehrsunfall dar.^{11, 36, 39, 40, 41, 42} Bis zu 68 Prozent der Skelettverletzungen von Frontinsassen betreffen die Region distal des Knies.¹² Bis zu 30 Prozent aller Bein- und 10 Prozent aller bei Autounfällen beobachteten Verletzungen entfallen auf den Fuß und das obere Sprunggelenk.^{13, 14} So wurden fast die Hälfte aller Chopart- und Lisfranc-Luxationsfrakturen bei polytraumatisierten Verkehrsunfallopfern beobachtet.¹⁸ Die zunehmende Zahl älterer Verkehrsteilnehmer zwingt zur Fokussierung auf diese Altersgruppe, da ältere Fahrer öfter Verletzungen der Hüfte, des Beines und der Knöchel/Fuß-Region erleiden als jüngere.⁴³

Durch die Verbesserung der passiven Sicherheit der Fahrzeuge in den letzten Jahrzehnten konnte insbesondere bei Gurtbenutzung eine Abnahme der Verletzungen beobachtet werden.¹³ Die Einführung der Gurtpflicht 1976 und später des Airbag sowie die zunehmende Versteifung der Fahrgastzelle reduzierte die Zahl der Verletzungen der oberen

Körperhälfte.^{44,45} Bei einem leichten Rückgang der Beinverletzungen nahmen diese jedoch relativ zu den übrigen Verletzungen zu, wobei speziell Verletzungen des Mittfußes eine unveränderte Inzidenz zeigten.^{46, 34, 47} Eine mögliche schützende Wirkung von Gurt bzw. Airbag vor Verletzungen der unteren Extremität und speziell der OSG/Fuß-Region wird kontrovers diskutiert.^{46, 48, 44, 49, 50} Das Problem der Fußverletzungen liegt in der oft unzureichenden Erkennung, ihrer oft schwierigen Behandlung mit hoher Komplikationsrate und einer hohen Spätmorbidity.^{51, 10}

Otte und Schmitt zufolge lassen sich als Mechanismen einer Fußverletzung die direkte Belastung des Fußes (Deformationseffekt) von der indirekten Belastung des Fußes (Gleiteffekt) abgrenzen.^{52, 53}

Durch die 28 Knochen des Fußes mit einer entsprechenden Vielzahl von Gelenken treten neben einer Axial- und Biegekomponente an den Knochen fast immer auch Kompressions- und Zugbelastungen an den Gelenken auf. Bei einer Kollision wird der Beinbereich im Sinne eines Abstützvorganges belastet, was eine Anhebebewegung des Fußes bewirkt. Eine Deformation des Fußraumes bewirkt eine meist seitlich der Abstützbewegung entgegenwirkende Drehbelastung des Sprunggelenkes. Als Mechanismen für das Entstehen einer Fußverletzung kommen das Einklemmen des Fußes durch die Pedalerie, die Plantar- und Dorsalflexion, die Pro- und Supination sowie das Anstoßen des Fußes oder eine reine Abstütz-/Körperbelastung in Frage. Die Zuordnung dieser verschiedenen Verletzungsmechanismen zeigt, dass Frakturen der Metatarsalia in 2/3 der Fälle durch einen Abstützvorgang ausgelöst werden⁵² und damit Folge direkten Kraftkontaktes sind. Talusfrakturen entstehen nach Manning meist durch axiale Kraftwirkung.⁵⁴ Calcaneusfrakturen entstehen nach Untersuchungen von Kitagawa et al meist durch Einklemmen oder seitliche Kompression bzw. axiale Kraftwirkung,⁵⁵ während

Sprunggelenksbrüche in der Regel durch Rotation des Fußes im Sinne einer Pronations- bzw. Supinationsbewegung oder durch Dorsalflexion entstehen.^{56, 57} Beaugonin macht für das Zustandekommen von Navicularefrakturen neben der Fußraumintrusion und dem Kontakt des Fußes mit Steuerungselementen vor allem eine verstärkte Dorsalflexion des Fußes verantwortlich.⁵⁸ Häufig sind kombinierte Bewegungen wie Rotation des Fußes unter Abstützbewegung Fraktur auslösend. Die Drehbewegung des Fußes ist Resultat der oftmals schrägen Crashimpulse mit einer konsekutiven schrägen Relativbewegung des Insassen, wobei das Nachhinken des Pedal- und Fußbereiches diesen Verletzungsmechanismus potenziert. Speziell Kontaktverletzungen der Knöchelregion ereignen sich oft unabhängig vom Grad der Intrusion.⁴⁰ Anderen Autoren zufolge findet sich bei mehr als 50 Prozent aller Fuß/OSG-Verletzungen keine Fußraumintrusion.⁵⁹ Durch den Crash wird der Fuß in eine vulnerable Position gebracht, wodurch die Wahrscheinlichkeit für die verschiedenen Verletzungen steigt.⁵⁷

Bei der direkten Belastung des Fußes lassen sich nach Morgan sechs Mechanismen unterscheiden:

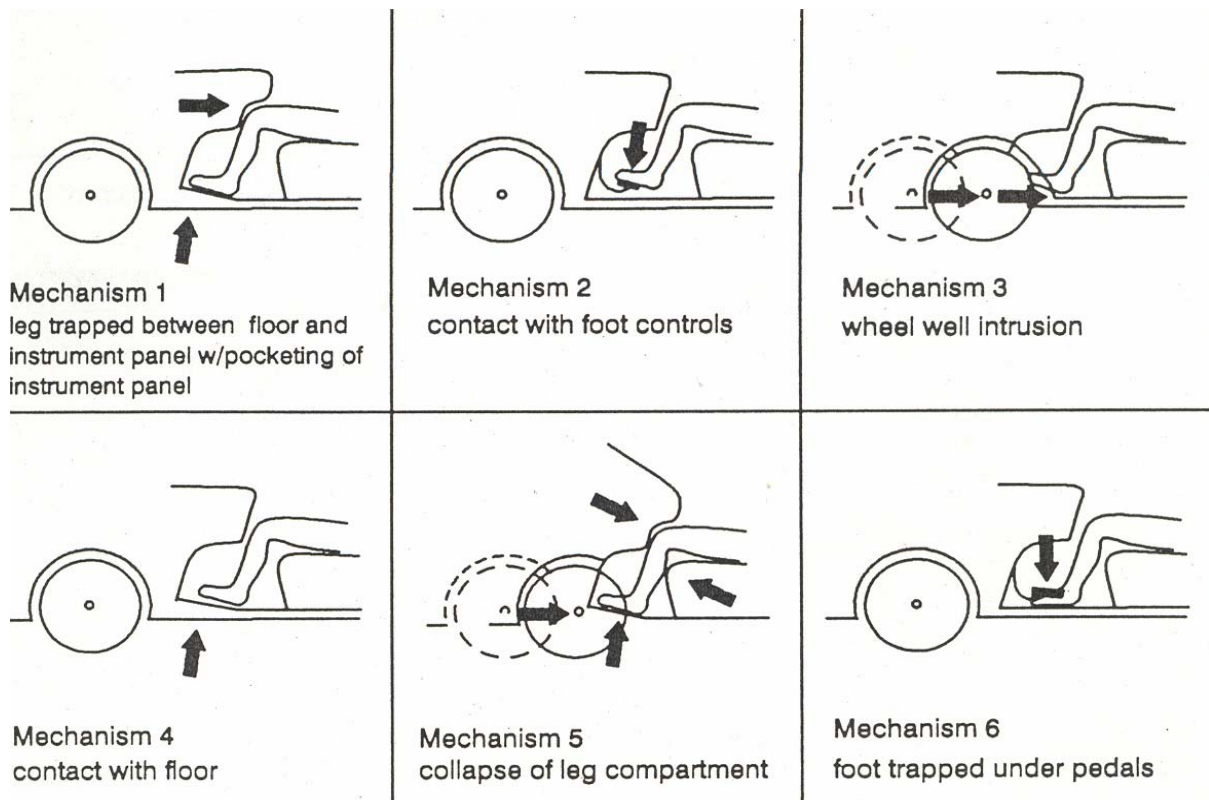


Abbildung 30: Mechanismen der Belastung des Fußes eines Frontinsassen beim Verkehrsunfall (aus⁶⁰)

An Dummy-Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich Verletzungen im Bereich des oberen Sprunggelenkes und des Fußes etwa 40 bis 60 ms nach der Kollision ereignen, wobei die Dauer der Traumatisierung bei 10 ms liegt und damit relativ kurz ist.⁴¹ Zur Entstehung einer Calcaneusfraktur ist im Kadaversversuch eine Kraft von 8115 N erforderlich.⁵⁵ Die nötige verletzungsauslösende Kraft variiert und liegt Begemann zufolge für Dorsal- und Plantarflexion im oberen Sprunggelenk zwischen 270 und 1.300 N (axiale Spitzenbelastung), für die Inversions- und Eversionsmomente wird eine Spanne von 9 bis 120 Nm angegeben.¹¹ Klopp führte Kadaveruntersuchungen durch und beschrieb bei einer Spitzenkontaktkraft von 9,3 kN ein 50 %iges Risiko, eine Verletzung im Bereich Fuß/OSG zu erleiden.¹² Petit beschrieb eine Grenzlast für das OSG von 47 Nm in Dorsalflexion, 40 Nm in Inversion und 35 Nm in Eversion.⁶¹ Die Winkel, ab denen eine Verletzung im OSG entsteht, wurden von

Parenteau mit 44 Grad Dorsalextension und 72 Grad Plantarflexion sowie 34 Grad Inversion und 32 Grad Eversion angegeben.⁶² Diese Ergebnisse konnten durch Rudd bestätigt werden.⁶³ Bedewi beschrieb eine direkte Korrelation einer OSG-Verletzung mit dem Maximalwinkel der Dorsalflexion.⁶⁴ Für die Entstehung von Lisfranc-Verletzungen sind Smith zufolge eine Kraftereinwirkung von $7,8 \pm 3,6$ kN mit einer Geschwindigkeit von $9,0 \pm 4,9$ m/s erforderlich.⁶⁵

In einem Zeitraum von 26 Jahren wurden innerhalb des GIDAS-Forschungsprojektes 174 Frakturen und Luxationen im Bereich des Fußes und des oberen Sprunggelenkes erfasst. Damit machten diese Verletzungen fast 24 Prozent aller Beinverletzungen des Schweregrades AIS 2 und höher aus. Dies war ein deutlich geringerer Anteil als in der Literatur beschrieben; andere Untersuchungen zu Fuß- und OSG-Frakturen kamen auf einen Anteil von bis zu 34 Prozent.⁶⁰ Wie schon früher beschrieben, wurden Sprunggelenksfrakturen am häufigsten beobachtet, gefolgt von Metatarsalefrakturen; Frakturen des Mittfußes (n=16) stellten eine Rarität dar.^{11, 61} Rückfußverletzungen, darunter 26 Calcaneusfrakturen, wurden in 34 Fällen beobachtet; früheren Untersuchungen zufolge machen Calcaneusfrakturen 15-32 Prozent aller OSG-/Fußfrakturen aus.^{60, 66}

Huelke zufolge besteht kein Unterschied in der Häufigkeit von Fuß/OSG-Frakturen zwischen Fahrern und Beifahrern,⁶⁷ in der vorliegenden Untersuchung standen 117 Fahrern allerdings nur 24 Beifahrer gegenüber. Die Literatur liefert für das Verhältnis Fahrer : Beifahrer unterschiedliche Angaben, wobei von einem ausgeglichenen Verhältnis bis hin zu einer deutlichen Häufung dieser Verletzungen bei Fahrern in bis zu 75 Prozent der Fälle berichtet wird.^{40, 68, 11, 69} Als Ursachen für das größere Risiko, als Fahrer eine Verletzung der unteren Extremität zu erleiden, werden die Tatsache, dass sich der Fahrer meist am Ort der Hauptimpulsrichtung des Crashes befindet sowie die Rolle der Pedalerie diskutiert. So fand

sich bei gleicher Intrusion des Fußraumes ein um 54 Prozent größeres Risiko für den Fahrer, eine Verletzung unterhalb des Knies zu erleiden.⁷⁰ Eine signifikante Häufung von OSG-Frakturen bei Fahrerinnen wurde beschrieben.³⁶ Die isolierte Betrachtung von Fahrern und Beifahrern zeigte, dass nach den OSG-Frakturen als häufigster Verletzung bei den Fahrern die Frakturen und Luxationen des Rückfußes die zweithäufigsten Verletzungen noch vor den Metatarsalefrakturen (Vorfuß) waren, wohingegen bei den Beifahrern die Vorfußfrakturen die zweithäufigste Verletzung darstellten. Bei den Fahrern war der linke Fuß etwas häufiger betroffen als der rechte, bei den Beifahrern war das Verhältnis genau umgekehrt. Damit war bei beiden Insassentypen der zur Fahrzeugaußenseite hin positionierte Fuß häufiger betroffen als der zur Fahrzeugmitte hin positionierte. In der Literatur finden sich sowohl Arbeiten, die ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Verletzungen des linken und des rechten Fußes beschreiben als auch Untersuchungen, bei denen der rechte Fuß häufiger als der linke verletzt wurde.^{60, 71, 42, 72, 11, 55, 61, 68, 66}

Der überwiegende Teil der analysierten Fußfrakturen und –luxationen ereignete sich in älteren Fahrzeugen (vor Einführung von EuroNCAP, d.h. Baujahr 1997 und älter), dementsprechend war die Airbag-Ausstattungsrate der PKW mit nur einem Drittel relativ gering. Schwerere Verletzungen wie OSG- oder Talusluxationsfrakturen, subtalare Luxationen oder subtotale Amputationen ereigneten sich nahezu ausschließlich in PKW der pre-EuroNCAP-Ära. In jeweils 10 Fällen wurden beide Füße bzw. mehrere anatomische Regionen eines Fußes verletzt, in beiden Beobachtungen fand sich wiederum ein deutliches Überwiegen von Fahrzeugen der pre-EuroNCAP-Ära (jeweils 9 der 10 Fälle). In der Literatur wurden in bis zu sieben Prozent der Fälle Kombinationsverletzungen OSG + Fuß beschrieben.⁶⁰

Fast ein Viertel der Insassen zog sich Fraktur/Luxation im Bereich des Fußes/OSG im Rahmen eines Polytraumas zu, wovon die Hälfte verstarb. Bei diesen schwerstverletzten

Patienten ist die Fußverletzung als „pars pro toto“ zu sehen.⁷³ Ein Problem stellt das Übersehen von Fußverletzungen bei polytraumatisierten Patienten dar. Vor allem Mittelfußverletzungen im Sinne der Lisfranc-Luxationsfrakturen werden bei diesen Unfallopfern häufig nicht diagnostiziert.^{74, 47} Außerdem können beim polytraumatisierten Patienten Verletzungen der unteren Extremität das Outcome von Verletzungen anderer anatomischer Regionen beeinflussen.³⁶

Etwa 50 Prozent der beteiligten Fahrzeuge waren Kleinwagen und PKW der unteren Mittelklasse; dies spiegelt einerseits den Anteil dieser Fahrzeuge am Straßenverkehr wider, könnte andererseits aber auch ein Hinweis auf die Rolle der Fußraumgröße bei der Verletzungsentstehung sein (Tabelle 4). So fanden sich nur 2 Fahrzeuge der Oberklasse (größer dimensionierter Fußraum), bei denen es zu Frakturen/Luxationen im Bereich des Fußes/OSG kam. Die Deformation des Fußraumes lässt sich als „hohle Pyramide“ skizzieren, wobei sich die Füße in der Pyramidenspitze befinden; diese werden während des Deformationsvorganges zunehmend eingeeengt und zusätzlich in Körperrichtung axial belastet.^{34, 75, 76, 52} Die Fußraumintrusion zeigte zwischen den einzelnen verletzten anatomischen Regionen keine signifikanten Unterschiede, wobei im Bereich OSG und Vorfuß nahezu keine Intrusion stattfand (Abbildung 17). Auch die in der Literatur angegebene mittlere Intrusion bei Calcaneusfrakturen von 36 cm wurde bei weitem nicht erreicht.⁶⁶ Petit zufolge wächst das Risiko für eine Verletzung des Fußraumes linear mit der Fußraumintrusion,⁶¹ nach Thomas korreliert es stärker mit dem Grad der Fußraum-Intrusion als mit dem Delta v-Wert.⁷⁷ Eine andere Arbeit konnte jedoch keinen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Grad der Intrusion und einer Fraktur der unteren Extremität herstellen.⁷⁸ In weiteren Untersuchungen zeigte sich ein uneinheitliches Bild hinsichtlich der Rolle der Intrusion bei der Entstehung von OSG-/Fußfrakturen: Einerseits wurde bei Pilon- und Calcaneusfrakturen häufig keine Fußraumintrusion gefunden;^{55, 72, 79} älteren Studien

zufolge fand bei bis zu 32 Prozent aller OSG-/Fußverletzungen mit einem AIS2+ keine Fußraumintrusion statt,^{80, 48, 57, 81} demgegenüber zeigte sich in einer anderen Untersuchung, dass bei fast 75 Prozent aller Fälle, in 65 Prozent der OSG-Frakturen und bei allen Calcaneusfrakturen eine Intrusion stattfand.⁷⁶ Andere Autoren beobachteten Talus- und Calcaneusfrakturen sowie Lisfranc-Verletzungen bei höheren Intrusionswerten.⁸² Begeman und Pattimore beobachteten in 75-96 Prozent der Fälle eine Fußraumintrusion,^{11, 39} Pilkey zeigte demgegenüber, dass diese bei bis zu 62 Prozent aller Beinverletzungen unterhalb des Kniegelenkes geringer als 2,5 cm ist,⁴⁰ Crandall zufolge ist sie bei 71 Prozent geringer als 3 cm.⁸³ Hyde zufolge sind alle Verletzungen der unteren Extremität unterhalb des Knies auf eine Fußraumintrusion zurückzuführen.⁸⁴ Für das Zustandekommen von Frakturen ohne Intrusion werden andere Ursachen wie Dezelerations- und Trägheitsmechanismen diskutiert.⁸⁵ So bedingen Rotationsbewegungen im OSG (Eversion/Inversion) Malleolarfrakturen, während eine axiale Last Frakturen im Bereich Calcaneus, Talus und Pilon tibiale verursacht.^{86, 87} Zusätzlich spielt die Muskelanspannung im OSG-/Fußbereich während des Crashes eine Rolle.^{88, 89, 90, 53} Demgegenüber machen andere Autoren die Fußraumintrusion für Inversion, Eversion und Dorsalextension des Fußes verantwortlich.^{58, 11} Neuere Fahrzeuge (post-EuroNCAP) zeigten einen Trend zu höheren Fußraumintrusionen (Abbildung 18), d.h. es war eine größere Fußraumdeformierung erforderlich, um zu einer Fraktur/Luxation zu führen. Dieser Trend war bei den Mittfußfrakturen/ -luxationen am deutlichsten, erreichte aber keine Signifikanz. Bei der isolierten Betrachtung von Fahrern und Beifahrern zeigte sich bei ersteren der erwähnte Trend bei den Mittfußfrakturen/-Luxationen (Abbildung 19), bei letzteren fand sich ein Trend zu höheren Intrusionswerten des rechten Fußraumes bei Vorfußfrakturen in Fahrzeugen der post-EuroNCAP-Ära (Abbildung 20; keine Signifikanz). Die Aussagekraft der Auswertung der Beifahrerverletzungen war durch die geringe Fallzahl allerdings limitiert.

Die Intrusionstiefe des Fußraumes und die Geschwindigkeitsänderung Δv stehen im Zusammenhang: Eine höhere Geschwindigkeitsänderung bedingt oftmals eine höhere Fußraumintrusion, infolgedessen steigt das Verletzungsrisiko.⁸³ Dieser Trend war bei den OSG- und Vorfußfrakturen besonders ausgeprägt (Abbildung 21) und zeigte sich auch bei der getrennten Auswertung älterer (pre-EuroNCAP) und neuerer (post-EuroNCAP) Fahrzeuge (Abbildung 22 und 23). Bei der isolierten Auswertung der Fahrer zeigten sich die höchsten Δv - und Intrusionswerte bei pre-EuroNCAP-Fahrzeugen (Abbildung 24). Demgegenüber fand sich bei vielen Frakturen/Luxationen keine Fußraumintrusion trotz relativ hoher Δv (Abbildung 21). Als Erklärung sind Unterschiede in der Fußraumkonstruktion (steif gegenüber weniger steif), aber auch Mängel in der Kodierung im Rahmen der Unfallrekonstruktion zu diskutieren. So ist es wenig wahrscheinlich, dass bei Δv -Werten zwischen 60 und 90 km/h keine Fußraumintrusion stattgefunden haben soll. Kein deutlicher Trend zeigte sich bei der Betrachtung der FCI-Werte der Fahrerfrakturen/-luxationen in Abhängigkeit von Δv und Intrusion des (linken) Fußraumes: Am häufigsten fand sich ein FCI von 4 und zwar sowohl bei niedrigen und hohen Δv -Werten wie auch bei niedrigen und hohen Intrusionswerten. Diesbezüglich fand sich kein Unterschied zwischen pre- und post-EuroNCAP-Fahrzeugen (Abbildungen 25 und 26). Die Fahrzeugintrusion (Verformungsgrad) bedingt die Fußraumintrusion, so führte ein höhere Fahrzeugintrusion auch zu einer tendentiell höheren Fußraumintrusion auf der Fahrerseite (höchste Fußraum-Intrusionswerte bei Fahrzeug-Intrusionstiefe 6+), bezüglich des Fahrzeugalters (pre- gegenüber post-EuroNCAP-Fahrzeugen) ergab sich kein eindeutiger Trend. Bezogen auf die Fahrzeugklasse wurden die höchsten Intrusionswerte bei Fahrzeugen der unteren Mittelklasse und der Mittelklasse beobachtet. Die Trends hinsichtlich älterer und neuerer Fahrzeuge sind uneinheitlich: So wurde bei Kleinwagen der post-EuroNCAP-Ära fast keine Fußraumintrusion beobachtet, wahrscheinlich wurde von den Herstellern hier besonders intensiv an der Verbesserung der Fußraumsicherheit gearbeitet; auch bei den

Mittelklassewagen erreichte die Fußraumintrusion bei post-EuroNCAP-Fahrzeugen niedrigere Werte als bei älteren Modellen. Demgegenüber zeigte sich bei Autos der unteren Mittelklasse ein Trend zu höheren Intrusionswerten bei post-EuroNCAP-Fahrzeugen gegenüber pre-EuroNCAP-Modellen (Abbildung 28). Zu den übrigen Fahrzeugsegmenten (Fahrzeuge der oberen Mittelklasse und Oberklasse) können wegen zu geringer Fallzahl keine Aussagen getroffen werden. In einer früheren Untersuchung fanden sich Verletzungen im Bereich Fuß/OSG häufiger in leichteren Fahrzeugen.⁶⁰ Kleinere Fahrzeugmodelle waren in der Vergangenheit im Knie- und Fußbereich oft zu wenig stabil, was zu starken Intrusionen der Fahrgastzelle führte.⁹¹

Die Unfälle ereigneten sich am häufigsten tagsüber außerorts bei niederschlagsfreien Witterungsverhältnissen auf Landes- und Kreisstraßen, demgegenüber waren Bundesstraßen und Autobahnen seltener betroffen (Tabelle 5). Daraus kann geschlussfolgert werden, dass hohe gefahrene Geschwindigkeiten sowie Sicht- und Witterungsverhältnisse keine wesentliche Bedeutung für die Entstehung von Frakturen bzw. Luxationen im Bereich Fuß/OSG bei PKW-Frontinsassen haben. Als Unfallgegner fand sich in der Hälfte der Fälle ein anderes Fahrzeug, gefolgt von einem festen Hindernis als Unfallgegner in etwa einem Drittel der Unfälle; ähnliche Zahlen wurden schon früher bei der Analyse von Verletzungen der unteren Extremitäten beschrieben.⁷¹ Fast alle Verletzungen wurden bei Frontalcrashes beobachtet (81 Fahrzeuge), bei Fahrer-Verletzungen spielte der Seitenaufprall links (19 Fahrzeuge) eine zusätzliche Rolle (Abbildung 12). Auch in früheren Untersuchungen wurde mehr als die Hälfte der OSG-/Fußfrakturen bei Frontalkollisionen beobachtet,^{48, 49, 92, 85, 14} dabei stellte die Crashrichtung von 11 Uhr das höchste Risiko für die Fußverletzung des Fahrers, die von 1 Uhr das höchste Risiko für die Fußverletzung des Beifahrers dar.⁹³

Der Literatur zufolge sind nach innen kommende Fahrzeugteile ursächlich für bis zu 81 Prozent der Skelettverletzungen,³⁹ 57 Prozent der Fahrer, die sich eine moderate oder schwere OSG-Verletzung zuzogen, hatten den Fuß auf dem Pedal und 25 Prozent aller Verletzungen unterhalb des Knies stehen mit einem Pedalkontakt oder dem Abrutschen von der Pedalerie im Zusammenhang.^{89, 82} Bei der Analyse der für die Frakturen und Luxationen ursächlichen Fahrzeugteile standen erwartungsgemäß die Bauelemente des Fußraumes im Vordergrund: Am häufigsten wurden die Verletzungen durch die Pedalerie, gefolgt von der Spritzwand und der Unterseite der Armaturentafel, verursacht (Tabelle 6).

Die Besonderheit des Fußraumes liegt nach Thomas⁷⁷ im großen Bewegungsumfang, den dieser für die Füße lässt. Während der Bereich Rumpf/Oberschenkel durch die Sitzposition und zusätzlich durch den angelegten Sicherheitsgurt sich in seiner Position nur unwesentlich ändern kann und auch der Kopf beim Unfall durch den ausgelösten Airbag an größeren Bewegungsamplituden gehindert wird, ist die Position der Füße weitestgehend variabel (wechselnde Betätigung der Pedalerie, unbeteiligter linker Fuß bei Fahrzeugen mit Automatik-Getriebe). Außerdem können Verletzungen im Bereich Fuß/oberes Sprunggelenk sowohl durch die sich verformende Fahrgastzelle (Bodenblech, Spritzwand, Mittelkonsole, Türverkleidung) als auch durch die nach innen tretende Pedalerie, ein Abrutschen von derselben oder ein Einklemmen zwischen Pedalen und Fußraum als Kombination der Störgröße Fahrgastzelle/Pedalerie entstehen. Für den Verletzungsmechanismus aus Fußraumintrusion und nach vorn schleudernden Füßen (hohe Kontaktgeschwindigkeit) wurde von Zeidler der Begriff „Prellschlagsyndrom“ („impact shock syndrome“) geprägt.⁹⁴ In der Literatur werden Fußraum und Pedalerie als ursächlich für bis zu 92 Prozent aller Fuß- und OSG-Verletzungen angegeben.^{11, 57} Damit ist eine Vielzahl von Schädigungsmöglichkeiten gegeben.

Die Betrachtung der Geschwindigkeitsparameter Delta v und EES zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen frakturierten/luxierten Fußregionen (Abbildungen 13 und 14), die in der Literatur angegebenen Werte (49 km/h für Calcaneusfrakturen) wurden nicht erreicht.^{66, 95} Der Delta v-Wert unterschied sich auch bei gegebenen FCI-Werten nicht signifikant, allerdings wurden bei Unfällen mit neueren Autos (post-EuroNCAP) tendenziell höhere Werte gemessen; Insassen dieser Fahrzeuge erreichten also ein gutes Outcome trotz höherer Geschwindigkeitsänderung Delta v (Abbildung 15). Dies wird durch Abbildung 16 unterstrichen: Im Bereich OSG, Rück- und Mittfuß zeigte sich ein Trend zu höheren Delta v-Werten in post-EuroNCAP-Fahrzeugen, während der Vorfuß ein gegenläufiges Verhalten zeigte.

Die Betrachtung der Summenhäufigkeit einer MAIS2+-Fußverletzung bei gegebener Geschwindigkeitsänderung Delta v zeigte einen unterschiedlichen Kurvenverlauf für pre- und post-EuroNCAP-Fahrzeuge: Ab einem Delta v-Wert von 10 km/h verlief die pre-EuroNCAP-Kurve steiler, um sich ab einem Delta v-Wert von 60 km/h von der post-EuroNCAP-Kurve zu entkoppeln; während bei älteren Fahrzeugen bei steigender Delta v die Häufigkeit einer MAIS2+-Fußverletzung zunahm, kam es bei neueren Fahrzeugen zu keinem weiteren Anstieg der Verletzungshäufigkeit (Abbildung 29). Speziell die Daten der älteren Fahrzeuge bestätigen damit eine der ersten Studien zu Verletzungen der unteren Extremität, die einen Anstieg von Beinverletzungen mit zunehmender Crashgeschwindigkeit beschrieb.⁹⁶

Als Schlussfolgerung der dargelegten Ergebnisse ist eine weitere Optimierung der Fußraumsicherheit zu fordern. So vermögen in den Bodenbelag rutschsicher eingeschäumte Hartschaumelemente (Styropor) die Stoßbelastung der unteren Extremität zu senken.^{94, 97} Die bereits längere Zeit bekannte Problematik der Pedalerie beim Zustandekommen von Fuß-/OSG-Verletzungen führte zur Einführung von Sollbruchstellen in der Pedalaufhängung,

wodurch die Pedale bei einem starken Impact entkoppelt werden und damit kraftfrei bleiben und durch die reduzierte Blockbildung das Verletzungsrisiko für die Füße minimiert wird. Der Ersatz der Pedalerie durch in den Fußraum integrierte Druck-Sensor-Platten⁹⁸ oder durch einen sogenannten Sidestick des Drive-by-wire-Systems von Mercedes-Benz⁵ wurde bereits in Testfahrzeugen realisiert. Einen interessanten Ansatz stellt der Fuß-Airbag dar, der sich in den Zwischenraum von Ferse und Spritzwand legt und damit den direkten Kontakt der Spritzwand mit dem Fuß vermeidet. Dies führt zu einer Reduktion des Dorsalflexionswinkels und der auf den Fuß wirkenden Belastungen.⁹⁹ Die Kontaktkräfte dürften deutlich geringer sein, da der Fuß nicht mehr mit der Fahrzeugstruktur selbst in Berührung kommt. Der Fuß-Airbag soll besseren Schutz für die Füße bieten als der oben erwähnte Hartschaum.^{100, 98, 78}

Retrospektive Analysen in der Unfallforschung bedeuten Untersuchungen an Fahrzeugmodellen, die bei Abschluss der Analyse meist durch neue, verbesserte Modelle abgelöst sind. So lassen sich die in der vorliegenden Arbeit dargestellten Ergebnisse nicht uneingeschränkt auf aktuelle Kraftfahrzeuge übertragen, zumal bei älteren Fahrzeugen (pre-EuroNCAP) deutlich mehr Frakturen/Luxation im OSG-/Fußbereich als bei jüngeren Modellen (post-EuroNCAP) beobachtet wurden. In der Vergangenheit wurden von den Automobilherstellern große Anstrengungen zur Erhöhung der passiven Sicherheit der Fahrzeuge unternommen, so nahm insbesondere die Steifheit der Fahrgastzelle zu, was einen wesentlichen Beitrag auch zur Erhöhung der Fußsicherheit darstellt. So erzielt bei den Crash-Tests von Euro NCAP der überwiegende Anteil der aktuellen Fahrzeugmodelle der einzelnen Hersteller 4 und 5 Sterne. Von Vertretern der Industrie (hier: BMW) wird eingeschätzt, dass grundlegende Verbesserungen der passiven Fahrzeugsicherheit nicht mehr zu erwarten sind, in Zukunft sind eher neue Wege in Hinblick auf die Verbesserung der aktiven Sicherheit denkbar.¹⁰¹

7. Zusammenfassung

Im Beobachtungszeitraum von 26 Jahren wurden vom GIDAS-Forschungsprojekt 174 Frakturen und Luxationen im Bereich des Fußes und des oberen Sprunggelenkes erfasst, damit entfielen fast 24 Prozent aller Beinverletzungen des AIS-Schweregrades 2 und höher auf diese Verletzungen. Am häufigsten fanden sich OSG-Frakturen und Metatarsalefrakturen. Fahrer (n=117) wurden etwa 5 Mal häufiger verletzt als Beifahrer (n=24). Der zur Fahrzeugaußenseite hin positionierte Fuß war mit n=78 häufiger betroffen als der zur Fahrzeuginnenseite hin positionierte (n=69). Der überwiegende Teil der Fußfrakturen und –luxationen wurde mit 83 Prozent in älteren Fahrzeugen (Baujahr 1997 und älter) beobachtet. Schwerere Verletzungen ereigneten sich fast ausschließlich in diesen älteren Autos der pre-EuroNCAP-Ära. Fast ein Viertel der analysierten Insassen zog sich die Fraktur/Luxation im Bereich Fuß/OSG im Rahmen eines Polytraumas zu, wovon die Hälfte dieser Patienten nicht überlebte. Am häufigsten wurden die Verletzungen in PKW der unteren Mittelklasse (35 Prozent) und Kleinwagen (23 Prozent) beobachtet. Die Fußraumintrusion zeigte zwischen den einzelnen verletzten anatomischen Regionen keine signifikanten Unterschiede. In neueren Fahrzeugen (post-EuroNCAP) war eine tendenziell höhere Intrusion erforderlich, um zu einer Fraktur/Luxation zu führen. Die zugrunde liegenden Unfälle ereigneten sich in knapp 59 Prozent tagsüber, in 86 Prozent außerorts und in 77 Prozent bei niederschlagsfreien Witterungsverhältnissen. Landes- und Kreisstraßen waren mit 35 Prozent die am häufigsten beobachtete Straßenkategorie. Unfallgegner war in der Hälfte der Fälle ein anderes Fahrzeug. 82 Prozent der Unfälle waren Frontalzusammenstöße. Das am häufigsten die Fraktur/Luxation im Bereich Fuß/OSG auslösende Fahrzeugteil war die Pedalerie, gefolgt von der Spritzwand und der Unterseite der Armaturentafel. Zwischen den einzelnen frakturierten/luxierten Fußregionen zeigte sich kein Unterschied bei der

Geschwindigkeitsänderung Δv und dem EES-Wert, Insassen neuerer Autos (post-EuroNCAP) erreichten ein gutes Outcome trotz tendenziell höherem Δv -Wert. Während bei älteren Fahrzeugen bei steigender Δv die Häufigkeit einer MAIS2+-Fußverletzung zunahm, kam es bei neueren Fahrzeugen zu keinem weiteren Anstieg der Verletzungshäufigkeit.

8. Literaturverzeichnis

1. Kirchberg P

10 Jahre Volkswagen Sachsen. Eine Zeitreise durch die Geschichte des sächsischen
Automobilbaus

Volkswagen Sachsen GmbH, Zwickau, 24 (2000)

2. Kirchberg P

Der lange Marsch im Tritt auf der Stelle

In: Kirchberg P

Plaste Blech und Planwirtschaft

Nicolai, Berlin, 403-404 (2001)

3. Auto Union

Denkschrift zur Entwicklung der Kunststoff-Karosserie

Auto Union, Chemnitz, 1-16 (1944)

4. Erdmann T (AUDI Tradition, Ingolstadt)

Die DKW Automobile mit Frontantrieb

In: Erdmann T

Vom Dampfkraftwagen zur Meisterklasse

Autovision, Hamburg, 202-205 (2003)

5. Niemann H

Die Produktoffensive: Vernetztes Denken auf dem Gebiet der aktiven und passiven Sicherheit

In: Niemann H

Béla Barényi. Sicherheitstechnik made by Mercedes-Benz

Motorbuch-Verlag, Stuttgart, 203–205 (2002).

6. Otte D (Medizinische Hochschule Hannover, Verkehrsunfallforschung), Krettek C, Brunner H, Zwipp H

Scientific approach and methodology of a new in-depth-investigation study in Germany so called GIDAS

18. International technical conference on the enhanced safety of vehicles, Nagoya (Japan) (2003)

7. Verband der Automobilindustrie

VDA-Jahresbericht 2009

Verband der Automobilindustrie, Berlin, 199–200 (2009)

8. Hautzinger H (Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung, Heilbronn) ,
Pfeifer M, Schmidt J

Hochrechnung von Daten aus Erhebungen am Unfallort

Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1-77 (2006)

9. Hautzinger H (Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung, Heilbronn),
Pfeiffer M, Schmidt J

Expansion of GIDAS sample data to the regional level: Statistical methodology and
practical experiences

1. International conference on ESAR, Hannover, Paper No. 3 (2004)

10. Beillas P (Bioengineering center, Wayne state university, USA), Begeman PC, Yang KH,
King AI, Arnoux PJ, Kang HS, Kayvantash K, Brunet C, Cavallero C, Prasad P

Lower limb: Advanced FE model and new experimental data

45th Stapp car crash conference, San Antonio (USA), Proceedings, 45,

Report No. 2001-22-0022, 1–25 (2001)

11. Begeman P (Bioengineering center, Wayne state university, USA), Balakrishnan P,
Levine R, King A

Dynamic human ankle response to inversion and eversion

37th Stapp car crash conference, San Antonio (USA), Proceedings, 37, Report No. SAE
933115, 83–93 (1993)

12. Klopp GS (Department of aerospace, mechanical, and nuclear engineering, University of Virginia, USA), Crandall JR, Hall GW, Portier L
Mechanisms of injury and injury criteria for the human foot and ankle in dynamic axial impacts to the foot
IRCOBI conference, Hannover, Proceedings, 77–86 (1997)
13. Crandall JR (Automobile safety laboratory, University of Virginia, USA), Portier L, Petit P, Hall GW, Bass CR, Klopp GS, Hurwitz S, Pilkey WD, Troselle X, Tarrière C, Lassau J-P
Biomechanical response and physical properties of the leg, foot, and ankle
40th Stapp car crash conference, Albuquerque (USA), Proceedings, 40,
Report No. SAE 962424, 173–192 (1996)
14. Funk JR (Automobile safety laboratory, University of Virginia, USA), Tourret LJ, George SE, Crandall JR
The role of axial loading in malleolar fractures
SAE 2000 world congress, Detroit (USA), Proceedings, 2000-01-0155, 9–19 (2000)
15. Rammelt S (Universitätsklinikum Carl Gustav Carus der TU Dresden, Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie), Grass R, Zwipp H
Sprunggelenkfrakturen
Unfallchirurg 111, 421–438 (2008)

16. Regel G (Medizinische Hochschule Hannover, Klinik für Unfallchirurgie), Seekamp A,
Takacs J, Bauch S, Sturm JA, Tscherne H
Rehabilitation und Reintegration polytraumatisierter Patienten
Unfallchirurg 96, 341–349 (1993)
17. Lefering R (Institut für Forschung in der operativen Medizin, Universität Witten)
Entwicklung der Anzahl Schwerstverletzter infolge von Straßenverkehrsunfällen in
Deutschland
Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, BAST-Bericht M 200, 1-37 (2009)
18. Zwipp H (Universitätsklinikum Carl Gustav Carus der TU Dresden, Klinik für Unfall- und
Wiederherstellungschirurgie)
Chopart-Luxationen/Luxationsfrakturen
In: Zwipp H
Chirurgie des Fußes
Springer, Wien – New York, 130-146 (1994)
19. Grobe T (Techniker Krankenkasse), Dörning H.
Gesundheitsreport 2008. Veröffentlichungen zum Betrieblichen Gesundheitsmanagement
der TK
Hamburg, 2008

20. Miller T (Automobile safety laboratory, University of Virginia, USA), Martin P,
Crandall J
Costs of lower limb injuries in highway crashes
Proceedings of the international conference on pelvic and lower extremity injuries,
Washington DC (USA), 47-57 (1995)
21. Ore L (Transportation research center, East Liberty, USA), Tanner B, States J
Accident investigation and impairment study of lower extremity injury
International congress and exposition, Detroit (USA), SAE Technical Paper 930096
(1993)
22. Spörner A (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft), Hummel T, Kühn M
Datenbank - Motorradunfälle. Analyse von Motorradunfällen mit dem speziellen Focus
auf Verletzungen der unteren Extremitäten
Forschungsberichte des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft, Berlin,
1-60 (2006)
23. Brühning E (Medizinische Hochschule Hannover, Verkehrsunfallforschung), Otte D,
Pastor C
30 Jahre wissenschaftliche Erhebungen am Unfallort für mehr Verkehrssicherheit
Zeitschrift für Verkehrssicherheit 51, 175-181 (2005)

24. Brunner H (TU Dresden, Unfallforschung), Hannawald L

Dresdner Modell der Unfalldokumentation

Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 3, 77–78 (2003)

25. Graab B (AUDI AG, Ingolstadt), Donner E, Chiellino U, Hoppe M

Analyse von Verkehrsunfällen hinsichtlich unterschiedlicher Fahrerpopulationen und daraus ableitbarer Ergebnisse für die Entwicklung adaptiver Fahrerassistenzsysteme

Tagung aktive Sicherheit, München, 1-15 (2008)

26. Gennarelli TA (Department of neurosurgery, Medical college of Wisconsin, Milwaukee, USA), Wodzin E.

Abbreviated injury scale 2005. Update 2008

Association of the advancement of automotive medicine, Barrington (2008)

27. Otte D (Medizinische Hochschule Hannover, Verkehrsunfallforschung), Haasper C,

Krettek C

Die neue Abbreviated Injury Scale (AIS) 2005 - Nutzen einer standardisierten

Klassifikation der Verletzungsschwere

Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 10 (2006)

28. Wikipedia

Abbreviated injury scale.

Verfügbar unter http://de.wikipedia.org/wiki/Abbreviated_Injury_Scale (2010)

29. MacKenzie EJ (Department of health policy and management at the Johns Hopkins

Bloomberg school of public health, Baltimore, USA), Damiano A, Miller T, Luchter S

The development of the functional capacity index (FCI)

Journal of Trauma 41, 5, 799–807 (1996)

30. McCarthy ML (Department of health policy and management at the Johns Hopkins

Bloomberg school of public health, Baltimore, USA), MacKenzie EJ.

Predicting ambulatory function following lower extremity trauma using the functional capacity index

Accident analysis and prevention 33, 821–831, (2001)

31. Wikipedia

Functional capacity index

Available at http://de.wikipedia.org/wiki/Functional_Capacity_Index (2010)

32. Bertolini R (Humboldt-Universität Berlin, Institut für Anatomie), Leutert G

Atlas der Anatomie des Menschen

Georg Thieme, Leipzig (1987)

33. Zinke E (Kraftfahrtbundesamt, Flensburg)

Segmente - Kleine Autos sind gefragt

Verfügbar unter

http://www.kba.de/cln_015/nn_212378/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Segmente/2009__b__segmente__kompakt__tabelle.html (2010)

34. Dischinger PC (National study center for trauma and EMS, University of Maryland, USA), Schmidhauser CB, Burgess AR, Shiu MH, Cushing BM, O'Quinn TD, Juliano PJ, Bents FD

Lower extremity trauma in vehicular front-seat occupants: Patients admitted to a level 1 trauma center

Society of automotive engineers SAE-paper 940710, 11–18, (1994)

35. Ward EGW (Research institute for consumer ergonomics, Loughborough,

Großbritannien), Bodiwala GG, Thomas PD

The importance of lower limb injuries in car crashes when cost and disability are considered

Accident analysis and prevention 24, 613–620 (1992)

36. Dischinger PC (National study center for trauma and EMS, University of Maryland, USA), Cushing B, Kerns T
- Lower extremity fractures in motor vehicle collisions: Influence of direction of impact and seatbelt use
- Annual proceedings of the association for the advancement of automotive medicine, 319–325 (1992)
37. States JD (Department of orthopaedics, University of Rochester school of medicine and dentistry, Rochester, USA)
- Adult occupant injuries of the lower limb
- Society of automotive engineers, Report No. SAE 861927, 97–107 (1986)
38. Bosse MJ (Department of orthopaedics and rehabilitation, School of medicine, Vanderbilt University, Nashville, USA), Burgess AR, Brumback RJ
- Evaluation and treatment of the high-energy open tibia fracture
- Advances in orthopaedic surgery, 3–17, (1984).
39. Pattimore D (Research institute for consumer ergonomics, Loughborough, Großbritannien), Ward E, Thomas P, Bradford M
- The nature and cause of lower limb injuries in car crashes
- 35th Stapp car crash conference, San Diego, USA, Proceedings, 35, Report No. SAE 912901, 177–187 (1991)

40. Pilkey WD (Center for applied biomechanics, University of Virginia, USA), Sieveka EM, Crandall JR, Klopp G
- The influence of foot placement and vehicular intrusion on occupant lower limb injury in full-frontal and frontal-offset crashes
- Society of automotive engineers, SAE-paper 94 S4 W 31, 734–741 (1994)
41. Sakurai M (Japan automobile research institute)
- An analysis of injury mechanisms for ankle/foot region in frontal offset collisions
- Society of automotive engineers SAE-paper 962429, 251–267 (1996)
42. Tannous RE (National highway traffic safety administration, Washington DC, USA), Bandak FA, Toridis TG, Eppinger RH
- A three-dimensional finite element model of the human ankle: Development and preliminary application to axial impulsive loading
- 40th Stapp car crash conference, Albuquerque (USA), Proceedings, 40, Report No. SAE 962427, 219–238 (1996)
43. Huelke DF (Department of anatomy and the highway safety research institute, University of Michigan, USA), O'Day J, States JD
- Lower extremity injuries in automobile crashes
- Accident analysis and prevention 14, 95–106, (1982)

44. Loo GT (Departments of surgery and of anatomy, cell biology and injury sciences, New Jersey medical school, USA), Siegel JH, Dischinger PC, Rixen D, Burgess AR, Addis MD, O'Quinn T, McCammon L, Schmidhauser CB, Marsh P, Hodge PA, Bents F
Airbag protection versus compartment intrusion effect determines the pattern of injuries in multiple trauma motor vehicle crashes
Journal of Trauma 41, 935–951 (1996)
45. Mackay M (Accident research unit, University of Birmingham, Großbritannien)
Engineering in accidents: Vehicle design and injuries
Injury 25, 615–621 (1994)
46. Burgess AR (R. Adams Cowley shock trauma center, University of Maryland medical center, USA), Dischinger PC, O'Quinn TD, Schmidhauser CB
Lower extremity injuries in drivers of airbag-equipped automobiles: clinical and crash reconstruction correlations
Journal of Trauma 38, 509–516 (1995)
47. Richter M (Medizinische Hochschule Hannover, Unfallchirurgie),
Wippermann B, Krettek C, Schratt HE, Hufner T, Thermann H
Fractures and fracture dislocations of the midfoot: Occurrence, causes and long-term results
Foot & ankle international 22, 392–398 (2001)

48. Lestina DC (Insurance institute for highway safety, Arlington, USA), Kuhlmann TP, Keats TE, Alley RM
- Mechanisms of fracture in ankle and foot injuries to drivers in motor vehicle crashes
- 36th Stapp car crash conference (Seattle, USA), Proceedings, Report No. SAE 922515, 59–68 (1992)
49. Siegel JH (Maryland institute for emergency medical services systems, University of Maryland, USA), Mason-Gonzalez S, Dischinger P, Cushing B, Read K, Robinson R, Smialek J, Heatfield B, Hill W, Bents F, Jackson J, Livingston D, Clark CC
- Safety belt restraints and compartment intrusions in frontal and lateral motor vehicle crashes: Mechanisms of injuries, complications, and acute care costs
- Journal of Trauma 35, 736–759 (1993)
50. Siegel JH (Maryland institute for emergency medical services systems, University of Maryland, USA), Mason-Gonzalez S, Dischinger PD, Read KM, Cushing BM, Badellino MC, Goodarzi S, Smialek JE, Heatfield BM, Robinson RM, Parkinson K, Hill WJ, Jackson JW, Livingston DJ, Bents FD, Clark CC
- Causes and costs of injuries in multiple trauma patients requiring extrication from motor vehicle crashes
- Journal of Trauma 35, 920–931 (1993)

51. Richter M (Medizinische Hochschule Hannover, Unfallchirurgie), Thermann H,
Rheinbaben Hv
Frakturen der Fußregion bei PKW-Insassen
Unfallchirurg 102, 429–433 (1999)
52. Otte D (Medizinische Hochschule Hannover, Verkehrsunfallforschung)
Anforderungen an eine optimale Fußraumgestaltung im PKW zur Vermeidung von
Fußverletzungen.
VDI-Bericht Nr. 1046, 63–85 (1993)
53. Schmitt KU (Institute for biomedical engineering, University and ETH Zürich, Schweiz),
Niederer PF, Muser MH, Walz F
Leg, knee and foot injury
In: Schmitt KU, Niederer PF, Muser MH & Walz F
Trauma biomechanics
Springer, Berlin – Heidelberg, 192–194 (2010)

54. Manning P (University of Nottingham, Großbritannien), Wallace WA, Roberts AK, Owen CJ, Lowne RW

The position and movement of the foot in emergency manoeuvres and the influence of tension in the achilles tendon

41st Stapp car crash conference, Orlando (USA), Proceedings, 41, Report No. SAE 973329, 195–206 (1997)

55. Kitagawa Y (Nissan motor company, Japan), Ichikawa H, King AI, Levine RS

A severe ankle and foot injury in frontal crashes and its mechanism

42nd Stapp car crash conference, Tempe (USA), Proceedings, 42, Report No. SAE 983145, 1–12 (1998)

56. Huelke DF (Department of anatomy and the highway safety research institute, University of Michigan, USA), Compton TW, Compton CP

Lower extremity injuries in frontal crashes: Injuries, locations, AIS and contacts

Society of automotive engineers, SAE-paper 910811, 99–104 (1996)

57. Thomas P (Vehicle safety research center, Loughborough, Großbritannien), Bradford M

A logistic regression analysis of lower limb injury risk in frontal collisions

39th Stapp car crash conference, Coronado (USA), Proceedings, 39, 287–309 (1995)

58. Beaugonin M (Engineering systems international, Paris, Frankreich), Haug E, Cesari D
A numerical model of the human ankle/foot under impact loading in inversion and eversion
40th Stapp car crash conference, Albuquerque (USA), Proceedings, 40,
Report No. SAE 962428, 239–249 (1996)
59. Digges KH (National crash analysis center, Washington university, Ashburn, USA),
Bedewi PG, Bahouth GT, Bedewi NE
. Determination and modelling of ankle injury causation
Verfügbar unter: www.ncac.gwu.edu/archives/papers/index.html (2001)
60. Morgan RM (National highway traffic safety administration, USA), Eppinger RH
Ankle joint injury mechanism for adults in frontal automotive impact
35th Stapp car crash conference, San Diego (USA), Proceedings, 35,
Report No. SAE 912902, 189–198 (1991)
61. Petit P (Ecole Nationale supérieure d'Arts et Métiers, Paris, Frankreich), Portier L, Foret-
Bruno JY, Trosseille X, Parenteau C, Coltat JC, Tarriere C, Lassau JP
Quasistatic characterization of the human foot-ankle-joints in a simulated tensed state and
updated accidentological data
IRCOBI conference, Dublin, Proceedings, 363–376 (1996)

62. Parenteau CS (Department of injury prevention, Chalmers university of technology, Göteborg, Schweden), Viano DC, Petit PY
Biomechanical properties of human cadaveric ankle-subtalar joints in quasi-static loading
Journal of biomechanical engineering 120, 105–111 (1998)
63. Rudd R (University of Virginia, center for applied biomechanics, USA), Crandall J, Millington S, Hurwitz S
Injury tolerance and response of the ankle joint in dynamic dorsiflexion
48th Stapp car crash conference, Nashville (USA), Proceedings, 1–26 (2004)
64. Bedewi PG (National crash analysis center, Washington university, Ashburn, USA), Bedewi NE
Modelling of occupant biomechanics with emphasis on the analysis of lower extremity injuries
Verfügbar unter: www.ncac.gwu.edu/archives/papers/index.html, (2001)
65. Smith BR (Bioengineering center, Wayne State University, Detroit, USA), Begeman PC, Leland R, Levine RS, Yang KH, King AI
A mechanism of injury to the forefoot in car crashes
IRCOBI conference, Lissabon, Proceedings, 149–162 (2003)

66. Benson E (Orthopaedic trauma and fracture specialist, San Diego, USA), Conroy C, Hoyt DB, Eastman AB, Pacyna S, Smith J, Kennedy F, Velky T, Sise M
Calcaneal fractures in occupants involved in severe frontal motor vehicle crashes
Accident analysis and prevention 39, 794–799 (2007)
67. Huelke DF (Department of anatomy and the highway safety research institute, University of Michigan, USA), Compton DW, Compton CP
Lower extremity injuries in frontal crashes: Injuries, Locations, AIS and contacts
Society of automotive engineers, SAE Technical Paper 91011, 99-104 (1991)
68. Assal M (Orthopedic sciences laboratory, University of Washington, Seattle, USA), Huber P, Tencer AF, Rohr E, Mock C, Kaufmann R
Are drivers more likely to injure their right or left foot in a frontal car crash: a crash and biomechanical investigation
Annual proceedings of the Association for the advancement of automotive medicine 46, 273–288 (2002)
69. Palmertz C (Volvo car corporation, Volvo safety center, Schweden), Jakobsson L, Karlsson AS
Pedal use and foot positioning during emergency braking
IRCOBI conference, Göteborg (Schweden), Proceedings, 135–146 (1998)

70. Morris A (Vehicle safety research center, Loughborough, Großbritannien), Thomas P, Taylor AM, Wallace WA
- Mechanisms of fractures in ankle and hind-foot injuries to front seat car occupants – an in-depth accident data analysis
- 41st Stapp car crash conference, Orlando (USA),. Proceedings Report No. SAE 973328, 181–194 (1997)
71. Otte D (Medizinische Hochschule Hannover, Verkehrsunfallforschung)
- Biomechanics of lower limb injuries of belted car drivers and the influence of intrusion and accident severity
- 40th Stapp car crash conference, Albuquerque (USA), Proceedings, 40, Report No. SAE 973328, 181–194 (1996)
72. Yoganandan N (Medical college of Wisconsin, USA), Pintar FA, Boynton M, Begeman P, Prasad P, Kuppa SM, Morgan RM, Eppinger RH
- Dynamic axial tolerance of the human foot-ankle complex
- 40th Stapp car crash conference, Albuquerque (USA), Proceedings, 40, Report No. SAE 962426, 207–218 (1996)
73. Zwipp H (Universitätsklinikum Carl Gustav Carus der TU Dresden, Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie), Rammelt S, Grass R.
- Komplextrauma des Fußes
- Trauma und Berufskrankheit 3, Supplement 2, S221-S229 (2001)

74. Jarde O (Service d'Orthopédie Traumatologie, Hôpital Nord, Amiens, Frankreich),
Mertl P, Modaine J, Lestang .
Fractures of the navicular bone. Apropos of 48 cases
Annales de Chirurgie 47, 32–35 (1993)
75. Kim DH (Honolulu, Hawaii)
Mechanism of injury in foot fractures
Orthopedics 23, 183 (2000)
76. Otte D (Medizinische Hochschule Hannover, Verkehrsunfallforschung), Rheinbaben Hv,
Zwipp H
Biomechanics of injuries to the foot and ankle joint of car drivers and improvements for
an optimal car floor development
36th Stapp car crash conference (Seattle, USA), Proceedings (37), 43–58 (1992)
77. Thomas P (Vehicle safety research center, Loughborough, Großbritannien), Charles J,
Fay P
Lower limb injuries - the effect of intrusion, crash severity and pedals on injury risk and
injury type in frontal collisions
39th Stapp car crash conference, Coronado (USA), Proceedings, 39,
Report No. SAE 952728, 265–280 (1995)

78. Kippelt U (Passive restraint systems, Deutschland), Buss W, Feldhoff U, Thelen M
Protecting devices and development tools for reducing foot and leg injuries in frontal crashes
IRCOBI conference, Göteborg (Schweden), Proceedings, 161–172 (1998)
79. Klopp GS (Department of aerospace, mechanical, and nuclear engineering, University of Virginia, USA), Crandall JR, Hall GW, Pilkey WD
Risk of ankle injury for humans from longitudinal impacts to the foot
IRCOBI conference, Hannover, Proceedings (1997).
80. Huelke DF (Department of anatomy and the highway safety research institute, University of Michigan, USA), Compton CP
Offset frontal collisions: A review of the literature and analysis of UMTRI and NASS crash data - CDC, AIS, and body area injuries
Society of automotive engineers, SAE Technical Paper 950498 (1995)
81. Digges KH (National crash analysis center, Washington university, USA), Bedewi PG, Ishikawa H
Ankle injury mechanisms in offset crashes
IRCOBI conference, Hannover, Proceedings, 87–98 (1997)

82. Taylor A (University hospital Nottingham, Großbritannien), Morris A, Thomas P,
Wallace A
Mechanisms of lower extremity injuries to front seat car occupants – an in depth accident
analysis
IRCOBI conference, Hannover, Proceedings, 53–66 (1997)
83. Crandall JR (University of Virginia automobile safety lab., USA), Martin PG,
Sieveka EM, Pilkey WD, Dischinger PC, Burgess AR, O'Quinn TD, Schmidhauser CB
Lower limb response and injury in frontal crashes
Accident analysis and prevention 30, 667–677 (1998)
84. Hyde AS
Crash injuries of the extremities
in Hyde AS:
Crash injuries: How and why they happen
Society of automotive engineers, Warrendale (USA) 85–114 (1993)
85. Bedewi PG (National crash analysis center, Washington university, Ashburn, USA),
Digges KH
Investigating ankle injury mechanisms in offset frontal collisions utilizing computer
modeling and case-study data
43rd Stapp car crash conference, San Diego (USA). Proceedings, 43,
Report No. SAE 99SC14 (1999)

86. McMaster J (University of Nottingham, Großbritannien), Parry M, Wallace WA, Wheeler L, Owen C, Lowne R, Oakley C, Roberts AK
Biomechanics of ankle and hindfoot injuries in dynamic axial loading
44th Stapp car crash conference, Atlanta (USA), Proceedings, 44,
Report No. SAE 2000-01-SC23, (2000)
87. Shams T (National Highway Traffic Safety Administration, USA), Beach D, White RP, Rangarajan N, Haffner M, Eppinger R, Pritz H, Kuppa S, Beebe M
Development and Design of Thor-Lx: The Thor Lower Extremity
43rd Stapp car crash conference, San Diego (USA), Proceedings, 43,
Report No. SAE 99SC09, 141–160 (1999)
88. Bedewi PG (Ford Motor company, Dearborn, USA), Bedewi NE.
Modeling of occupant biomechanics with emphasis on the analysis of lower extremity injuries
International journal of crashworthiness 1, 50–72, (1996)
89. Sugiyama T (Toyota central R&D Labs, Japan), Kimpara H, Iwamoto M, Yamada D, Nakahira Y, Hada M
Effects of muscle tense on impact responses of lower extremity,
IRCOBI conference, Maastricht, Proceedings, 127–142 (2007)

90. Nahum AM (University of California, San Diego, USA), Melvin JW

Injury to the extremities

In: Nahum AM, Melvin JW

Accidental injury. Biomechanics and prevention

Springer, New York, 517–522 (2001)

91. Walz F (Institut für biomedizinische Technik der Universität/ETH Zürich, Schweiz)

Biomechanik und Verletzungsverhütung im Straßenverkehr

Therapeutische Umschau 54, 238–241 (1997)

92. Parenteau CS (Department of injury prevention, Chalmers university of Technology,

Göteborg, Schweden), Viano DC, Lövsund P, Tingvall C

. Foot-ankle injuries: Influence of crash location, seating position and age

Accident analysis and prevention 28, 607–617 (1996)

93. Parenteau CS (Department of injury prevention, Chalmers university of Technology,

Göteborg, Schweden)

Foot-ankle injury: Epidemiology and method to investigate joint biomechanics. Thesis for the degree of licentiate of engineering

Chalmers University of technology, Gothenburg, Sweden (1995)

94. Zeidler F (Daimler Benz AG Sindelfingen)
- Die Bedeutung der Verletzungen der unteren Extremitäten bei angegurteten Fahrern
(Prellschlagsyndrom)
- Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 5, 141–143 (1985)
95. Miltner E (Institut für Rechtsmedizin der Universität Hamburg), Salwender HJ
- Frakturen der unteren Extremitäten bei angegurteten Fahrern mit PKW-PKW-
Frontalkollisionen
- Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 4, 95–97 (1996)
96. Nahum AM (University of California, San Diego, USA), Siegel AW, Hight PV,
Brooks SH
- Lower extremity injuries of front seat occupants
- Society of automotive engineers, SAE Technical Paper 680483 (1968)
97. Dubbeldam R (Delphi automotive systems, Troy, USA), Nilson G, Pal B, Eriksson N,
Owen C, Roberts A, Crandall J, Hall G, Manning P, Wallace A
- A madymo model of the foot and leg for local impacts
- 43rd Stapp car crash conference, San Diego (USA), Proceedings, 43,
Report No. SAE 99SC12 (1999).

98. Zwipp H

Passive Sicherheit: Fortschritte und Forderungen aus der Sicht des Unfallchirurgen

Sicherheits-Workshop, Ehra Lessin, 18.-22.05.1992

99. Höglund N (Chalmers university of Technology), Göteborg, Schweden), Lövsund P,

Viano D, Olsén S

Foot and ankle safety evaluation in real life crash situations

IRCOBI conference, Lissabon, Proceedings, 163–175 (2003)

100. Buß W (BSRS Restraint Systems GmbH, Alzenau)

Die Entwicklung des Fußairbags vom Konzept bis zur Realisation

Automobiltechnische Zeitschrift 101, 8–14 (1999)

101. Arndt J. (BMW AG)

Forum der DGU: Verkehrsunfallforschung – klare Ergebnisse, aber wer zieht die

Konsequenzen?

Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie – Mitteilungen und Nachrichten, 16–17 (2007)

Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. med. habil. Zwipp für die Überlassung des Themas, die Begleitung der Arbeit und die vielfältigen Hinweise bedanken. Ihm verdanke ich auch die Anregung, die Ergebnisse auf der 1. Dresdner Unfalltagung 2003 vorzustellen.

Herrn Dr. Junge von Volkswagen verdanke ich ebenfalls wichtige Hinweise und die Durchsicht der Arbeit.

Herrn Dr. Hannawald von der Verkehrsunfallforschung der TU Dresden verdanke ich vielfältige Ratschläge auf unfalltechnischem Gebiet.

Bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Universitätsbibliothek der TU Dresden bedanke ich mich für die Hilfe bei der Literaturbeschaffung.

Herr Dipl.-Ing. Scheunert von Mercedes-Benz erläuterte mir den praktischen Insassenschutz in der Automobilindustrie, wofür ich mich bedanken möchte.

Mein Dank gilt weiterhin den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Sächsischen Staatsarchivs Chemnitz und Herrn Erdmann von Audi Tradition für ihre Hilfe bei der Recherche zum Beginn der Unfallforschung in Deutschland.

Meiner Frau Angelika und meinen Kindern Melanie und Patrick danke ich für ihre Geduld und ihr Verständnis.

Thesen zur Dissertation

1. Frakturen und Luxationen des Fußes und des oberen Sprunggelenkes machen fast ein Viertel der Verletzungen der unteren Extremität bei PKW-Frontinsassen aus.
2. Jeder vierte Betroffene erleidet eine Verletzung des oberen Sprunggelenkes oder des Fußes im Rahmen eines Polytraumas.
3. Fußverletzungen werden fast ausschließlich bei Frontalzusammenstößen beobachtet.
4. Die häufigsten Verletzungen sind OSG- und Metatarsalefrakturen des PKW-Fahrers.
5. Der zur Fahrzeugaußenseite positionierte Fuß wird häufiger verletzt als der zur Fahrzeuginnenseite positionierte.
6. Zwischen den einzelnen anatomischen Regionen finden sich keine Unterschiede hinsichtlich der Geschwindigkeitsänderung Δv und des EES-Wertes.

7. Wesentliche Ursachen für das Zustandekommen dieser Verletzungen sind die Fußraumintrusion und die Pedalerie.
8. Zwischen den Verletzungen der einzelnen anatomischen Regionen unterscheidet sich das Ausmaß der Fußraumintrusion nicht, bei neueren PKW (post-EuroNCAP) sind tendenziell höhere Intrusionswerte erforderlich, um eine Fraktur/Luxation im Bereich OSG/Fuß auszulösen.
9. Schwere Fußverletzungen wie Luxations- bzw. offene Frakturen werden fast ausschließlich in älteren PKW (pre-EuroNCAP) beobachtet.
10. Insassen neuerer Autos (post-EuroNCAP) erreichten ein gutes Outcome trotz tendenziell höherem Delta v-Wert.