

Martin Weinberger, BSc

Untersuchung von Fußgängerbeckenverletzungen beim Anprall an Fahrzeugen mit unterschiedlichen Fahrzeugfrontgeometrien

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

Eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr. techn. Ernst Tomasch

Institut für Fahrzeugsicherheit

Institutsvorstand

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

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

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

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

Graz, am

.....

(Unterschrift)

DANKSAGUNG

Bedanken möchte ich mich bei Univ. Prof. Dr. Hermann Steffan, der in mir das Interesse für die Fahrzeugsicherheit geweckt hat. Mein spezieller Dank gilt meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Tomasch der mir immer unterstützend zur Seite stand und stets die richtigen Worte, motivierender wie auch kritischer Art, zur richtigen Zeit fand. Weiters möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Corina Klug bedanken, die mir oftmals mit wertvollen Ratschlägen zur Thematik weiterhelfen konnte. Außerdem gilt ein Dankeschön Heinz Hoschopf, ohne seine Hilfe wäre das eine oder andere Problem im Bereich der Unfallrekonstruktion nur schwer lösbar gewesen.

Allen Mitarbeitern des Instituts sei für das angenehme und freundliche Arbeitsklima gedankt, ich fühlte mich während meiner Zeit hier sehr wohl.

Mein größter Dank ergeht an meine Eltern, welche mir meinen Lebensweg ermöglichten, diesen immer unterstützend und aufmunternd begleiteten, sowie meiner Schwester, die immer ein offenes Ohr für mich hatte.

Bedanken möchte ich mich auch bei meiner Freundin Martina, welche in schwierigen Zeiten stets aufmunternde Worte für mich fand und beim Erstellen dieser Arbeit eine große Hilfe für mich war.

KURZFASSUNG

In der Verkehrssicherheit konnten in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt werden, so konnte etwa die Zahl der getöteten Personen auf europäischen Straßen von 2001-2010 um etwa 42% auf 31456 gesenkt werden. Im Jahr 2012 wurden lediglich noch 28981 Verkehrsunfallopfer beklagt. Die Anzahl an tödlichen Fußgängerunfällen konnte absolut betrachtet ebenfalls reduziert werden, jedoch auf Österreich bezogen, nehmen diese in Relation zu anderen Verkehrsunfällen zu. 2001 betrug der Anteil an tödlich verunglückten Fußgängern auf Österreichs Straßen ca. 12%, im Jahr 2010 betrug dieser Anteil fast 18% und 2012 ca. 15%. Somit scheint es, als ob umgesetzte Verkehrssicherheitsmaßnahmen den ungeschützten Verkehrsteilnehmer Fußgänger unterdurchschnittlich berücksichtigen.

Bei Fußgängern die in einen Verkehrsunfall verwickelt waren, betreffen ihre erlittenen Verletzungen ab einer Einstufung AIS 3+ nach der Abreviated Injury Scale (AIS) in fast 38% der Fälle den Kopfbereich und in ca. 25% der Fälle die unteren Extremitäten. Aktuell wird eine Diskussion geführt, ob modernere, rundere Fronthaubendesigns sich positiver auf die Verletzungshäufigkeit bezüglich Becken (Pelvis) und Oberschenkel (Femur) auswirken, als ihre Vorgängermodelle mit kantigerem Design. In diversen Studien wird dies bejaht, bei Komponententests der europäischen Verordnung 2009/78/EG entsprechend, konnte diesbezüglich keine positive Auffälligkeit festgestellt werden. Aktuelle Zahlen zeigen, dass von den erwähnten 25% an Verletzungen der unteren Extremitäten, mehr als die Hälfte das Becken oder den Oberschenkel betreffen. Knöcherner Verletzungen des Beckens und des Oberschenkels sind mit einer hohen Sterblichkeitsrate und häufig mit einer permanenten motorischen Einschränkung verbunden. Nach Sheppard [1] sind Fahrzeug-Fußgängerunfälle grundsätzlich verantwortlich für 10 – 20% aller Hüftfrakturen bei Erwachsenen und 60-80% bei pädiatrischen Hüftverletzungen.

Diese Punkte im Auge behaltend wurden Fahrzeug-Fußgängerunfälle untersucht, bei welchen der verletzte Fußgänger Frakturen des knöchernen Beckens und/oder des Oberschenkelknochens erlitt. Dazu wurden Realunfälle aus Österreich mittels der Software PC-Crash rekonstruiert und in weiterer Folge relevante Daten zum Unfall gesammelt und verglichen. Ebenfalls konnte auf vorhandene Datensätze aus Deutschland und Frankreich zurückgegriffen werden.

Eine Auswertung erfolgte für Fahrzeuge mit unterschiedlicher Fahrzeugfrontgeometrie bis einschließlich dem Markteinführungsjahr 2009. Verletzungshäufigkeiten von Pelvis- und Femur-Verletzungen, verursacht durch den Fahrzeuganprall, wurden dabei untersucht und relevante anthropometrische Daten der Unfallopfer gesammelt. Detaillierte Informationen zu den verletzungsverursachenden Frontelementen wurden aufgenommen und die Zusammenhänge bezüglich erlittener Verletzung, deren Verletzungsmechanismen und der allgemeinen Geometrie von Frontstrukturen der Unfallfahrzeuge analysiert.

Die Verbesserung bezüglich des Fußgängerschutzes, allgemein bei Unfällen mit neueren Fahrzeugmodellen, konnte bestätigt werden, jedoch zeigte sich im gesammelten Datenmaterial dieser Umstand in Bezug auf Beckenfrakturen und Frakturen des Oberschenkelknochens nicht. Statistisch gesehen ist eine eher gegenläufige Tendenz festzustellen. Speziell für Fahrzeuge der Klasse Small MPV/Supermini mit Markteinführung

nach dem Jahr 2000 ist ein erhöhtes Risiko von Pelvis Combined (kombinierte Becken und Oberschenkelknochen) – Verletzungen AIS 2+ zu erleiden, gegeben. Ebenso war in diesen Fällen für neuere Fahrzeugmodelle ein stetiger Anstieg der mittleren Höhe der Fronthaubenvorderkante zu beobachten, die durchschnittliche verletzungsverursachende Anprallgeschwindigkeit des Fahrzeugs an den Fußgänger sank hingegen.

Ebenfalls ist die Tatsache zu erwähnen, dass Frakturen des Femur im vorhandenen Datenbestand vermehrt von jüngeren (\bar{x} 45 Jahre), leichteren (\bar{x} 55 kg) und kleineren (\bar{x} 155 cm) Personen erlitten wurden. 57% der erlittenen Femur-Frakturen betrafen Frauen.

Für Pelvisverletzungen ab AIS 3+ kann festgestellt werden, dass vermehrt ältere (\bar{x} 64 Jahre), schwerere (\bar{x} 71 kg) und größere (\bar{x} 166 cm) Personen betroffen waren. Der Frauenanteil betrug dabei etwa 60%.

ABSTRACT

Among pedestrian safety testing, the upper leg form to bonnet leading edge test – procedure has been regularly criticized for not being biofidelic. In this thesis injuries of upper leg and pelvis, suffered from pedestrians at vehicle-pedestrian accidents, are re-examined in terms of relevance, injury mechanisms, injury sources, impact kinematics, risk factors attributable to the pedestrian (age, height, weight, gender) and the vehicle front geometry. For this thesis, vehicle-pedestrian accidents, which happened on Austrian roads, were reconstructed and included to the Austrian database for in-depth analysis of road accidents (ZEDATU). The analysis of the used accident data is based on three European in-depth databases (Austrian, German and French). The Focus was on following parameters: year of market introduction, vehicle type, age, gender, impact location, relative orientation and injury patterns. In total 2405 AIS 2+ and 978 AIS 3+ injuries were analysed. 7,3% of all AIS 2+ injuries affected the pelvis and 3,1% affected the femur. At AIS 3+ injuries especially the number of femur injuries increased up to 7,5%. The bonnet leading edge was responsible for most of the pelvic AIS 2+ injuries (31%) and in 7% for femur injuries. It was found, that the risk for pelvic AIS 2+ injuries increased for newer small MPVs/Superminis, with year of market introduction after 2000. In this cases the mean height of the bonnet leading edge was increasing, while the average impact velocity was decreasing. It was also found that the mean age of pedestrians, which suffered pelvic injuries was significant higher, contrasted with all other injuries and in about 60% of this cases the injured pedestrians were female. Pedestrians which suffered femur injuries were significant younger, smaller and had a lower body weight, compared to pedestrians with other injured body parts. 57% of them were female.

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	IV
ABSTRACT	VI
INHALTSVERZEICHNIS.....	VII
1. EINLEITUNG	1
1.1 RELEVANZ DES FUGGÄNGERUNFALLS.....	1
1.1.1 <i>Betrachtung von Unfallaufkommen und deren Entwicklung</i>	<i>1</i>
1.1.2 <i>Verletzungen nach Körperregionen bei Fußgängerunfällen.....</i>	<i>4</i>
2. LITERATUR	7
2.1 GESETZGEBUNG UND VERBRAUCHERSCHUTZ [8].....	7
2.1.1 <i>Europäische Verordnungen</i>	<i>7</i>
2.1.2 <i>Euro NCAP Fußgängerschutz.....</i>	<i>8</i>
2.2 FAHRZEUGFRONTGEOMETRIE.....	9
2.2.1 <i>Vermessung relevanter Fronthauben-Geometrien.....</i>	<i>9</i>
2.2.2 <i>Kategorisierung der Fahrzeugfronten</i>	<i>11</i>
2.3 UNFALLMECHANIK.....	13
2.3.1 <i>Zeitliche Phasen der Kollisionssituation [8] [17].....</i>	<i>13</i>
2.3.2 <i>Grundbegriffe zur Rekonstruktion von Fußgängerunfällen.....</i>	<i>13</i>
2.3.3 <i>Unterscheidbare Phasen bei Fußgänger-Fahrzeug-Kollisionen</i>	<i>16</i>
2.3.4 <i>Unterscheidbare Stoßarten in Bezug auf Fußgängerunfälle</i>	<i>18</i>
2.4 DIE ABBREVIATED INJURY SCALE (AIS)	20
2.4.1 <i>Anatomische Beschreibung des Pelvis und Codierung möglicher Frakturen</i>	<i>21</i>
2.4.2 <i>Anatomische Beschreibung des Femur und Codierung möglicher Frakturen.....</i>	<i>23</i>
2.5 VERLETZUNGSMECHANISMEN	26
2.5.1 <i>Fraktur der Schambeinäste [29] [30].....</i>	<i>26</i>
2.5.2 <i>Fraktur der Hüftgelenkspfanne</i>	<i>26</i>
2.5.3 <i>Fraktur des Oberschenkelknochens.....</i>	<i>26</i>
2.5.4 <i>Frakturen durch direkte und indirekte Kräfteinwirkung [32]</i>	<i>27</i>
3. MATERIAL	28
3.1 ALLGEMEINE INFORMATIONEN ZUR DATENGRUNDLAGE	28
3.2 DATENMATERIAL ZUR VERLETZUNGSANALYSE	29
4. METHODIK ZUR REKONSTRUKTION VON REALUNFÄLLEN.....	30
4.1.1 <i>Allgemeine Informationen zur Unfallrekonstruktion.....</i>	<i>30</i>
4.1.2 <i>Das Multibody Modell in PC-Crash</i>	<i>31</i>
4.1.3 <i>Das Fahrzeugmodell zur Simulation mit Multibody-Modellen</i>	<i>32</i>
4.1.4 <i>Beispielhafte Darstellung eines Realunfalls.....</i>	<i>32</i>
5. STATISTISCHE TESTMETHODIK	37
5.1 GRUNDBEGRIFFE DER STATISTIK [43]	37
5.1.1 <i>Grundgesamtheit und Stichprobe</i>	<i>37</i>
5.1.2 <i>Merkmale und Merkmalsausprägungen.....</i>	<i>37</i>

5.2	DESKRIPTIVE STATISTIK	39
5.2.1	Häufigkeitsverteilung [43].....	39
5.2.2	Quotenverhältnis oder Odds-Ratio.....	40
5.3	INDUKTIVE STATISTIK (INFERENZSTATISTIK)	41
5.3.1	Grundbegriffe der induktiven Statistik [43].....	41
5.3.2	Stetige Verteilungsfunktionen [43].....	44
5.3.3	Signifikanztests.....	48
5.3.4	Hypothesen zum Mittelwertvergleich	52
6.	EINSCHRÄNKUNGEN	54
7.	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	55
7.1	VERLETZUNGEN NACH MARKTEINFÜHRUNGSZEITRAUM	55
7.1.1	Verletzungshäufigkeit nach Markteinführungszeitraum.....	55
7.1.2	Anprallgeschwindigkeiten bei Fußgängerunfällen	57
7.2	VERLETZUNGEN NACH FAHRZEUGKATEGORIEN UND MARKTEINFÜHRUNGSZEITRAUM	60
7.2.1	Verletzungen bezogen auf den Fahrzeugtyp	60
7.2.2	Verletzungsverursachende mittlere Kollisionsgeschwindigkeiten nach Fahrzeugtyp	63
7.2.3	Detaillierte Verletzungsbetrachtung bezogen auf die Fahrzeugkategorien.....	64
7.2.4	Verletzungshäufigkeit nach Markteinführungszeitraum.....	65
7.2.5	Mittlere Anprallgeschwindigkeiten über die jeweiligen Markteinführungsperioden	67
7.3	ANPRALLREGION AM FAHRZEUG	71
7.3.1	Verletzungshäufigkeit nach Fahrzeugfrontelementen	71
7.3.2	Verletzungshäufigkeit nach der Anprallregion am Fahrzeug	73
7.3.3	Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit des Fußgängers zum Zeitpunkt des Unfalls.....	73
7.4	EINFLUSS DER FAHRZEUGFRONTGEOMETRIE AUF FUßGÄNGERVERLETZUNGEN	75
7.5	RISIKOGRUPPEN	78
7.5.1	Wahrscheinlichkeit von Pelvis Verletzungen	78
7.5.2	Wahrscheinlichkeit von Femurverletzungen	80
8.	ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG	83
9.	AUSBLICK	85
10.	ANHANG	86
11.	GLOSSARE	87
12.	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	88
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	89
	FORMELVERZEICHNIS	91
	TABELLENVERZEICHNIS	92
	LITERATURVERZEICHNIS	93

1. EINLEITUNG

Aktuell wird der Umstand diskutiert, dass Fußgänger bei Kollisionen mit modernen Fahrzeugen mit runderem Fronthaubendesign Statistiken zufolge sehr viel weniger häufig Verletzungen des knöchernen Beckens und des Oberschenkelknochens davontragen als bei Kollisionen mit früheren kantigeren Fahrzeugmodellen. Dies steht im Widerspruch zu Komponententests mittels Hüftimpaktor nach europäischer Verordnung. Hier schneiden neueren Fahrzeugmodelle mit runderen Frontdesigns nicht besser ab als ältere Modelle mit kantigem Frontdesign. In dieser Arbeit werden darum „real World Fußgängerunfälle“ beim Anprall an Fahrzeuge mit unterschiedlichen Fahrzeugfrontgeometrien untersucht und zuvor eine allgemeine Einleitung über die Relevanz von Fußgängerunfällen im europäischen Straßenverkehr gegeben. Ebenso wird auf die Relevanz von Verletzungen des knöchernen Beckens und des Oberschenkelknochens eingegangen, sowie eine Übersicht über Verletzungsverursachende Fahrzeugfrontelemente gegeben.

1.1 Relevanz des Fußgängerunfalls

1.1.1 Betrachtung von Unfallaufkommen und deren Entwicklung

2001 wurde im sogenannten Weißbuch von der Europäischen Union das Ziel ausgegeben, die Anzahl der getöteten Personen im europäischen Straßenverkehr bis 2010 zu halbieren [2]. Dieses ambitionierte Ziel konnte zwar nicht zur Gänze realisiert werden, jedoch konnte ein bedeutender Rückgang an verunglückten Personen verzeichnet werden. Für die Zeitspanne 2011 bis 2020 hat man nun ein ebenso hohes Ziel gesteckt, welches wiederum die Anzahl der getöteten Personen auf europäischen Straßen halbieren soll [3].

Abbildung 1 zeigt den Verlauf an getöteten Personen auf europäischen Straßen von 2001 bis 2012 sowie eine lineare Prognose bis 2020. Bis zum Jahr 2010 konnte eine Reduktion der Verkehrstoten um etwa 42 % erzielt werden. Die gesetzte Marke von 50% wurde damit zwar um etwa 3980 getötete Personen verpasst, eine Erhöhung der Verkehrssicherheit wurde trotzdem in hohem Maße erreicht. Eine weitere Reduktion der Todesopfer auf europäischen Straßen soll nun folgen. Bis 2020 soll es gelingen die Zahl der tödlich Verunglückten auf unter 16000 zu senken. Wurden die Reduktionsziele von 2001-2010 noch vorwiegend durch intensivere Verkehrserziehung, Infrastrukturverbesserungen und der grundlegenden Erhöhung der passiven Sicherheit im Automobilbau erreicht, wird nun verstärkt versucht die Zahlen durch einen zusätzlich Einsatz von Fahrassistenzsystemen (z.B. Notbremssysteme) weiter zu senken [3].



Abbildung 1: Tödliche Verkehrsunfälle auf europäischen Straßen und Ziele der Europäischen Union vgl. [4]

Während innerhalb der Europäischen Union klare Fortschritte in Bezug auf die Verringerung der Zahl der Verkehrstoten erzielt werden konnten, ist die Zahl der Verletzten immer noch äußerst hoch und verringert sich nicht annähernd so schnell. Laut Schätzungen ergibt sich, dass 2010 etwa 1,5 Millionen Menschen innerhalb der Europäischen Union Verletzungen im Straßenverkehr erlitten. Davon wurde eine Viertelmillion schwer verletzt. [5] 2012 konnten auf europäischen Straßen 28000 Todesfälle registriert werden. [4]

In der Europäischen Union kommen auf jede Person, die bei einem Verkehrsunfall ihr Leben verliert, vier Personen welche ihr Leben lang eine Behinderung körperlicher oder geistiger Natur davontragen. Des Weiteren kommen auf einen tödlichen Verkehrsunfall 10 Schwerverletzte und 40 Leichtverletzte. [5]

In Abbildung 2 wird der prozentuelle Anteil von verletzten und getöteten Personen im Jahr 2013 auf Österreichs Straßen in Abhängigkeit ihrer Beteiligung im Straßenverkehr dargestellt. Ungeschützte Verkehrsteilnehmer (Motorradfahrer, Radfahrer, Fußgänger) nehmen hier den Hauptteil an tödlich Verunglückten ein, welcher in etwa bei 52% liegt. In diesem Betrachtungszeitraum verloren 82 Fußgänger ihr Leben und weitere 4196 wurden unbestimmten Grades verletzt. Erkennbar ist auch das erhöhte Risiko (Verhältnis von tödlich verunglückten zu verletzten Verkehrsbeteiligten) für ungeschützte Verkehrsteilnehmer, speziell für Fußgänger, eine tödliche Verletzung durch einen Verkehrsunfall zu erleiden. [6]

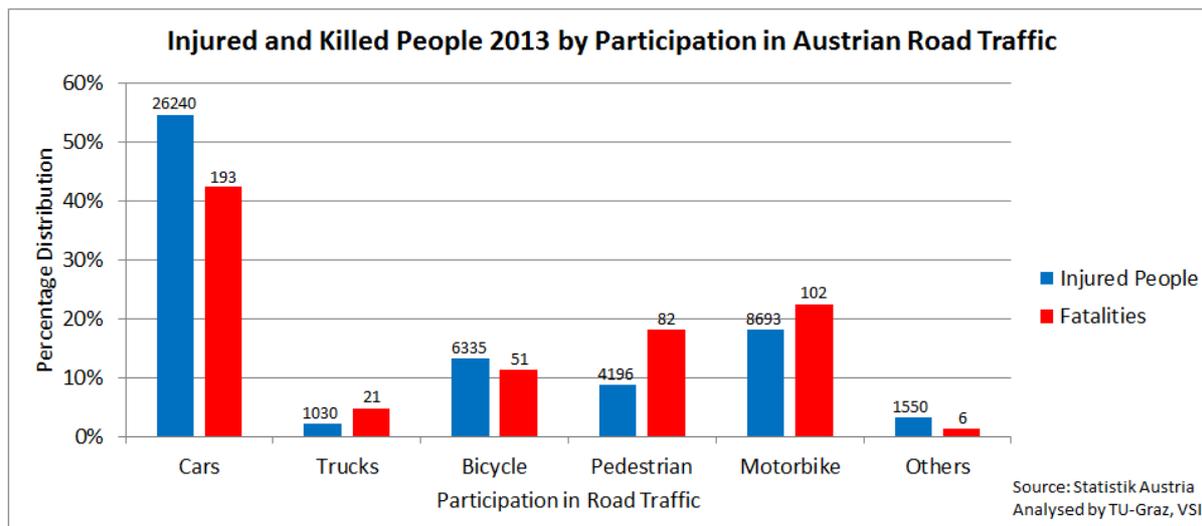


Abbildung 2: Verletzte und Getötete Personen auf Österreichs Straßen nach deren Verkehrsbeteiligung vgl. [6]

Die Entwicklung der Zahl der Verkehrstoten im Zeitraum von 2001 bis 2012 in ausgewählten europäischen Ländern ist sehr unterschiedlich (Abbildung 3). Das Jahr 2001 ist das Referenzjahr mit 100%. In jedem dieser Länder konnte ein Rückgang an Verkehrstoten erzielt werden, das EU-Ziel zur Reduktion (schwarz strichliert) von 50% konnte aber bis zum Stichtag 2010 von keinem dieser Länder erreicht werden. Frankreich (-49%) und Deutschland (-49%) lagen allerdings nur knapp darüber. Polen und Großbritannien stellen das Schlusslicht dieser Betrachtung dar.

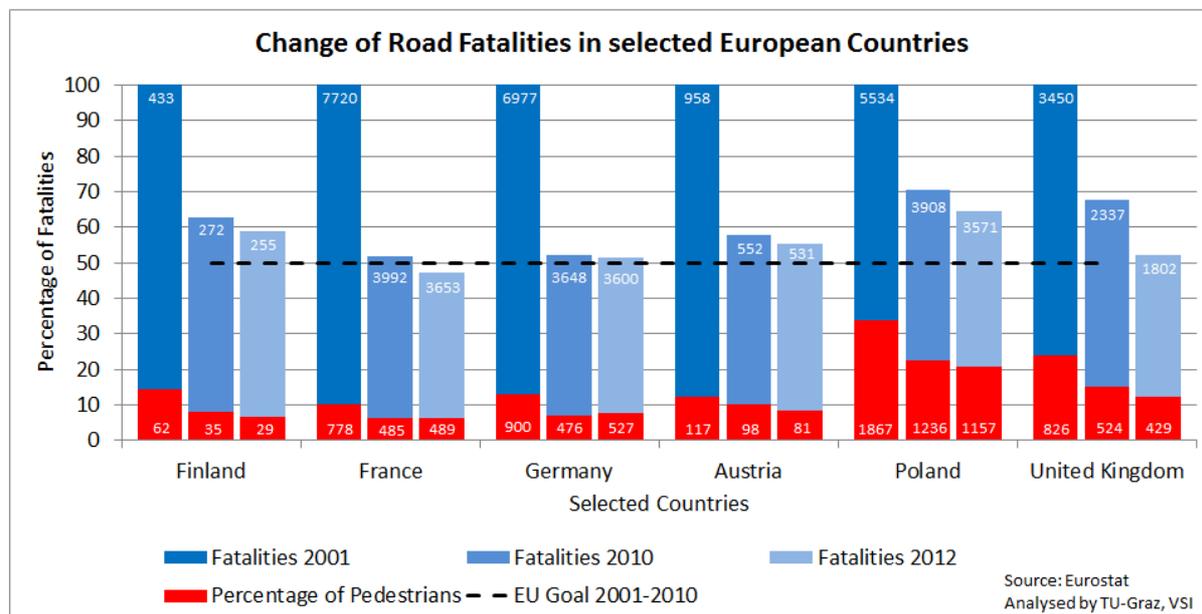


Abbildung 3: Rückgang getöteter Personen im Straßenverkehr von 2001-2012 in ausgewählten europäischen Ländern vgl. [4]. Rot eingezeichnet sind die Anteile an tödlich verunglückten Fußgängern im jeweiligen Betrachtungsjahr bezogen auf das Referenzjahr 2001.

Obwohl nun Fußgängerunfälle insgesamt abgenommen haben (Abbildung 3), nehmen diese speziell in Österreich relativ zu anderen Verkehrsunfällen zu (Abbildung 4). Es scheint als ob Verkehrssicherheitsmaßnahmen in Österreich den ungeschützten Verkehrsteilnehmer Fußgänger unterdurchschnittlich berücksichtigen, was Anlass gibt diese in weiterer Folge näher zu betrachten.

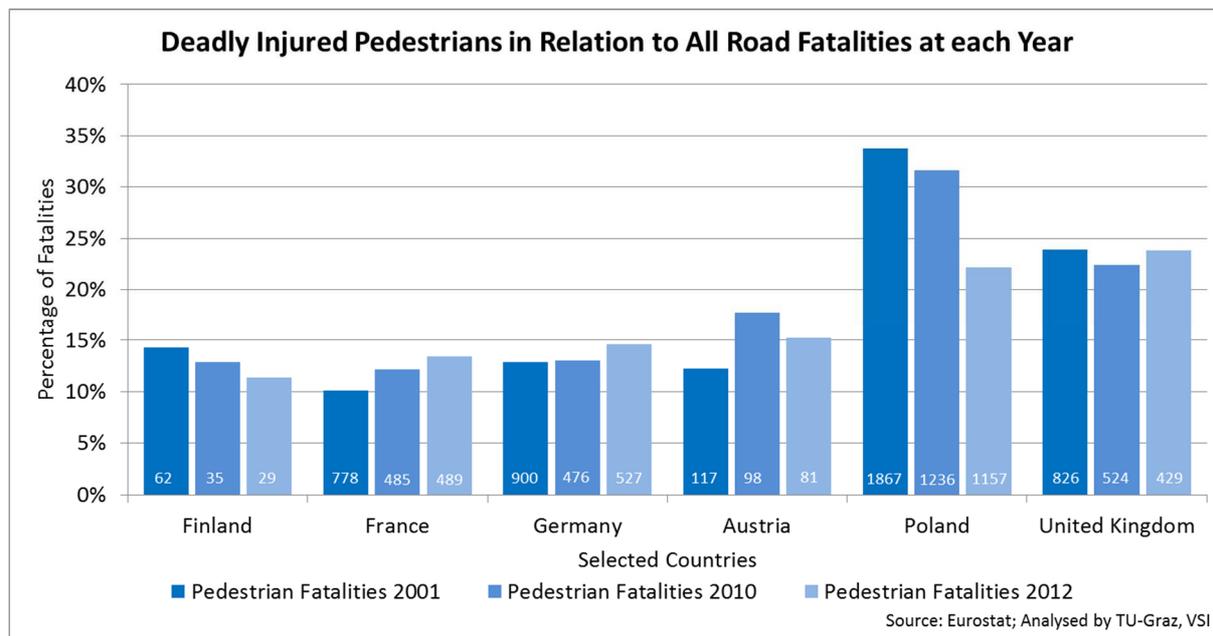


Abbildung 4: Tödlich verunglückte Fußgänger in Bezug auf alle Verkehrsoffer des jeweiligen Jahres vgl. [4]

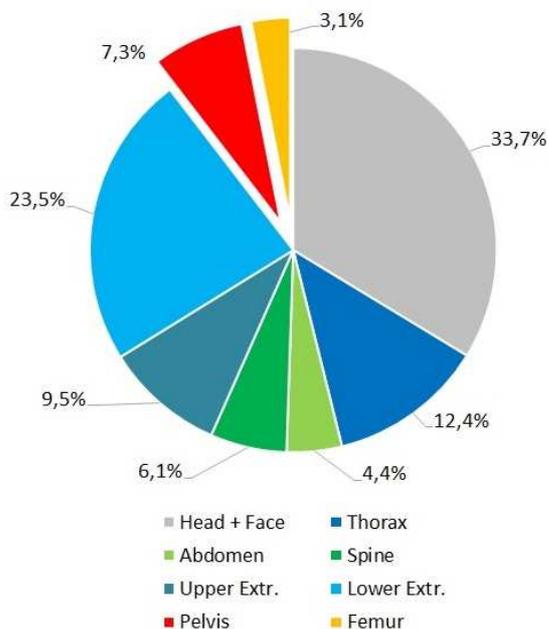
1.1.2 Verletzungen nach Körperregionen bei Fußgängerunfällen

Aus den aktuell zur Verfügung stehenden Daten aus Deutschland, Frankreich und Österreich bis einschließlich dem Jahr 2013 (Abbildung 5) ist ersichtlich, dass der Anteil an Pelvis und Femur Verletzungen aktuell bei etwa 10,4% aller AIS 2+ Verletzungen liegt. 7,3% von diesen betreffen Frakturen des knöchernen Beckens und 3,1% Frakturen des Oberschenkelknochens. Die hauptsächlich von Verletzungen betroffenen Körperregionen sind der Kopf (33,7%) und die unteren Extremitäten ohne das Becken und den Oberschenkel mit einbezogen (23,5%).

Bei Verletzungen der Schwere AIS 3+ betreffen bereits 13,8% aller dokumentierten Verletzungen das Becken (6,3%) oder den Oberschenkelknochen (7,5%). Der Kopf stellt auch in dieser Betrachtung die Körperregion dar, die am häufigsten von Verletzungen betroffen ist (37,9%), gefolgt von Verletzungen des Thorax mit 24,3%. Verletzungen der unteren Extremitäten exklusive Pelvis und Femur sind bei AIS 3+ Verletzungen deutlich reduziert zu finden und können mit 10,9% beziffert werden.

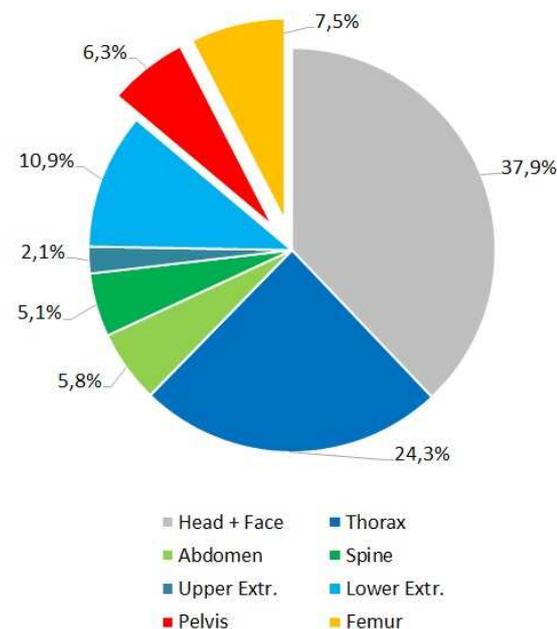
Es wurden nur Unfälle, in welchen das beteiligte Fahrzeug den Fußgänger frontal erfasste und der Fußgänger sich zu diesem Zeitpunkt in aufrechter Position befand, in die Betrachtung mit einbezogen.

AIS 2+ Injury Distribution by Body Region



Source: CEESAR, GIDAS, ZEDATU; Analysed by TU-Graz, VSI
Number of Injuries: 2405

AIS 3+ Injury Distribution by Body Region



Source: CEESAR, GIDAS, ZEDATU; Analysed by TU-Graz, VSI
Number of Injuries: 987

Abbildung 5: Erlittene Verletzungen nach Körperregion und Schweregrad

Speziell knöcherne Verletzungen des Beckens und des Oberschenkels sind mit einer hohen Sterblichkeitsrate und häufig mit einer permanenten motorischen Einschränkung verbunden. Fahrzeug-Fußgängerunfälle sind grundsätzlich verantwortlich für 10 – 20% aller Hüftfrakturen bei Erwachsenen und 60 – 80% bei pädiatrischen Hüftverletzungen [1]. In Bezug auf das Verkehrswesen sollte dieser Fakt durchaus Grund zur Besorgnis geben, vor allem da zu bedenken ist, dass mehr Patienten durch Verletzungen des knöchernen Beckens sterben, als durch jede andere skelettale Verletzung. [7]

Den Verletzungen des knöchernen Beckens sowie den Verletzungen des Oberschenkelknochens werden nun die verletzungsverursachenden Teile der Fahrzeugfront zugeordnet (Abbildung 6). Da entsprechend der AIS (Abbreviated Injury Scale) Klassifikation die gesamte Hüftregion nicht separat codiert werden kann, werden das Becken sowie der proximale Teil des Oberschenkelknochens als „Pelvis Combined“ zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass Frakturen des knöchernen Beckens hauptsächlich durch die Fronthaubenvorderkante und die Fronthaube selbst verursacht worden sind. Beckenverletzungen wurden somit in über 50% der Fälle durch einen Anstoß an eine dieser beiden Fahrzeugfrontkomponenten verursacht. Lediglich 6% der Verletzungen wurden durch den Sekundäraufprall auf der Straße oder durch Infrastruktureinrichtungen neben der Straße verursacht. In 30% der vorhandenen Fälle konnte keine Zuteilung zu einer einzelnen Verletzungsquelle vorgenommen werden, den Verletzungen bzw. Frakturen liegen mehrere Fahrzeugkomponenten verletzungsverursachend zu Grunde.

Femurverletzungen erfolgen hauptsächlich durch einen Anstoß gegen die Stoßstange des Fahrzeugs (34%). Diese Frakturen können auch durch einen Anprall der Stoßstange gegen das Knie des betroffenen Fußgängers verursacht werden. Dadurch werden hohe Momente in den Oberschenkelknochen eingeleitet, wodurch Frakturen speziell im distalen Bereich des Oberschenkelknochens auftreten können, sowie Frakturen am Schaft, vgl. Kapitel 2.5. Die Fronthaube sowie deren vordere Kante konnte hier für 16% aller Frakturen des Femur identifiziert werden.

Bei Verletzungen des proximalen Oberschenkelknochens in Kombination mit Frakturen der Hüfte („Pelvis Combined“), ist eine Verletzung hervorgerufen durch die Frontstoßstange des Fahrzeugs eher unwahrscheinlich und trat in lediglich einem Prozent der betrachteten Fälle auf. Der Großteil der Frakturen wurde wiederum von der Fronthaube selbst und deren vorderen Kante verursacht.

Distribution of AIS 2+ Injuries by Source

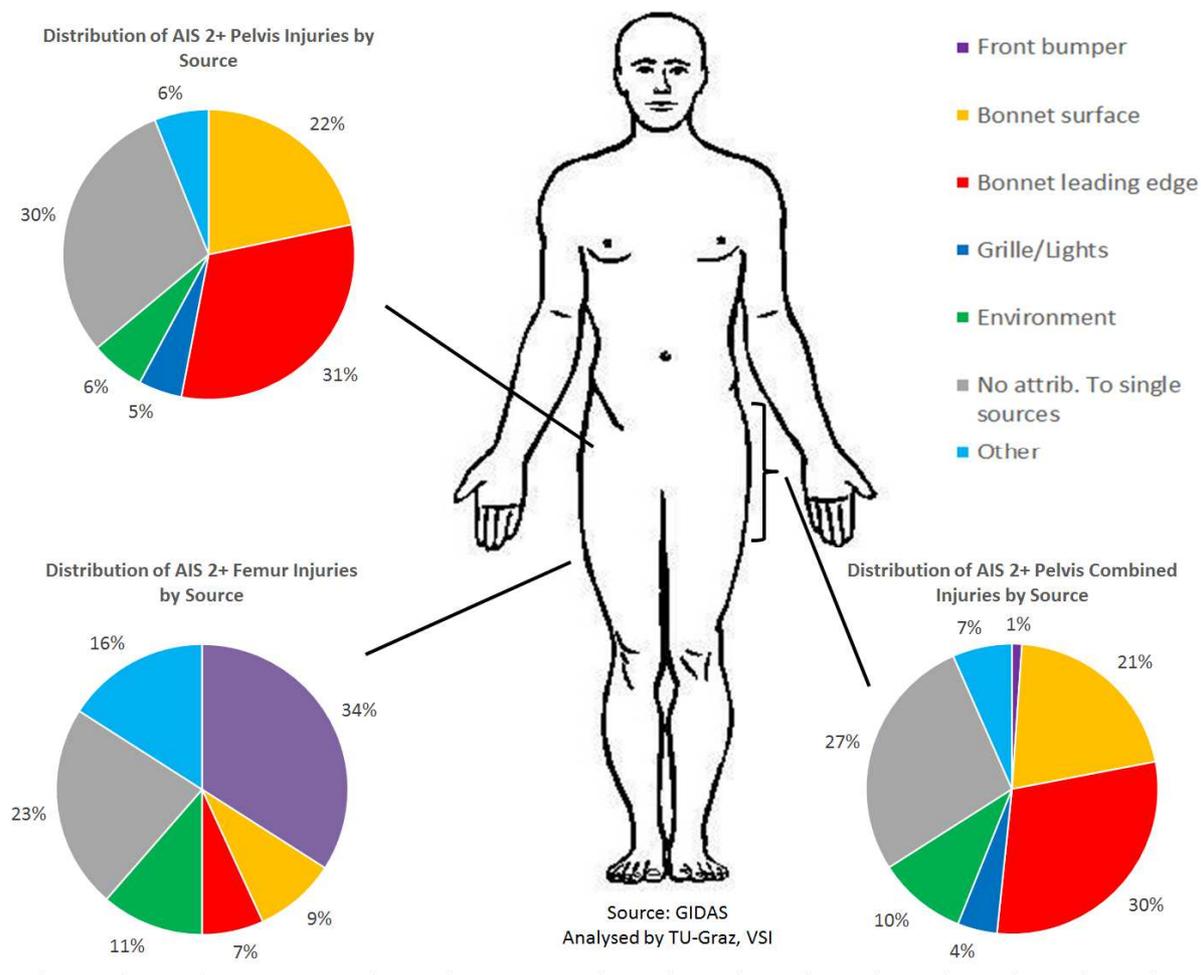


Abbildung 6: Verletzungsverursachende Teile der Fahrzeugfront vgl. [8]

2. LITERATUR

Um detailliert auf die Thematik des Fußgängerunfalls, Testmethodik sowie auf die Thematik Becken- und Femurverletzungen eingehen zu können sind einige Grundbegriffe notwendig, welche nachstehend beschrieben werden.

2.1 Gesetzgebung und Verbraucherschutz [8]

2.1.1 Europäische Verordnungen

Am 17.11.2003 haben das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union die Verordnung 2003/102/EG zum Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern vor und bei Kollisionen mit Kraftfahrzeugen erlassen. Sie trat am 1. Jänner 2004 in Kraft [8]. [9]

Neu auf den Markt kommende Modelle müssen seit Oktober 2005 die Anforderungen der Phase I erfüllen und ab September 2010 die Anforderungen der Phase II. Seit Dezember 2012 ist in den Mitgliedstaaten die Zulassung, der Verkauf und die Inbetriebnahme von Neuwagen untersagt, wenn diese den Komponententest der Phase I nicht erfüllen.

Der Komponententest der Phase I beinhaltet einen Kopfprüfkörper-Test und einen Beinprüfkörper-Test. Prüfungen der Fronthaubenvorderkante und des Windschutzscheibenbereichs erfolgen lediglich zur Beobachtung und sind nicht zulassungsrelevant. Für die Phase II-Komponententests nach Verordnung 2003/102/EG waren der Hüftimpaktortest gegen die Fronthaubenvorderkante und eine Prüfung in welcher der Erwachsenenkopf-Impaktor gegen die Frontscheibe bewegt wird als verpflichtend bzw. als zulassungsrelevant geplant. Diese Verordnung wurde allerdings wieder aufgehoben und durch die Verordnung 2009/78/EG ersetzt. Die Phase-II-Komponententests, nach Verordnung 2009/78/EG, sind in der Verordnung 2009/631/EG detailliert beschrieben [10]. Grenzwerte und Art der Durchführung sind in der Verordnung 2009/78/EG des Europäischen Parlaments und des Europäischen Rates festgelegt. Abbildung 7 stellt eine Prinzip-Skizze der Komponententests zum Fußgängerschutz dar.

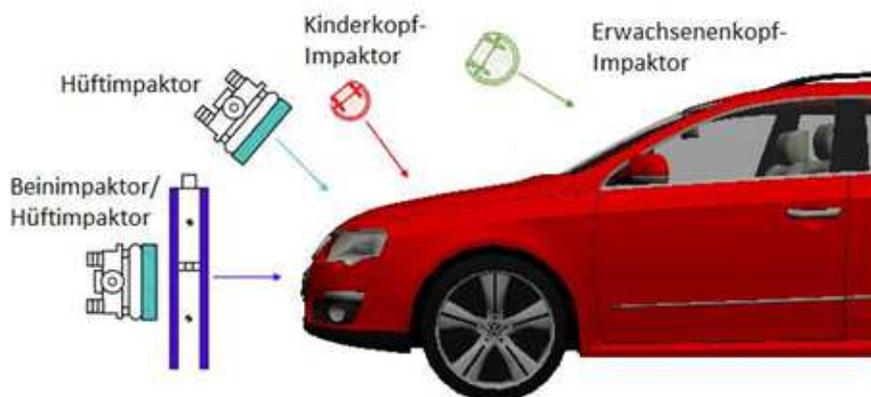


Abbildung 7: Komponententest der Phase II nach Verordnung 2009/78/EG [8]

Vorgeschriebene Prüfkomponenten Phase-II-Komponententests:

- Wahlweise Beinprüfkörper gegen Stoßfänger oder Hüftprüfkörper gegen Stoßfänger
- Kinderkopfform bzw. kleine Erwachsenenkopfform gegen die Fronthaubenfläche

Des Weiteren gibt es noch Prüfungen die nicht zulassungsrelevant sind, sondern nur zu Überwachungszwecken durchgeführt werden:

- Erwachsenenkopfform-Prüfkörper gegen die Windschutzscheibe
- Hüftprüfkörper gegen die Fronthaubenvorderkante

In Bezug auf Pelvis- und Femurverletzungen werden nun aus der aktuellen Verordnung (2009/78/EG) der Test mittels Beinprüfkörper sowie der Test mittels Hüftprüfkörper kurz beschrieben.

- Beinprüfkörper

Der Beinprüfkörper hat eine Masse von 13,4 kg und wird mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h gegen die Stoßstange im freien Flug bewegt. Er besteht aus zwei Teilen, die mit einem deformierbaren Gelenk miteinander verbunden sind. [10]

- Hüftprüfkörper

Der Hüftprüfkörper hat eine Masse von 11-18 kg und wird mit einer Geschwindigkeit von 20-40 km/h unter einem Winkel von 10-44° auf die Fronthaubenvorderkante geführt. Diese Parameter variieren je nach Fahrzeugfrontgeometrie. Die Prüfpunkte an der Fronthaubenvorderkante müssen dabei mindestens 75 mm von den seitlichen Eckpunkten entfernt sein und mindestens 150 mm auseinanderliegen. Die Anprallkraft des Prüfkörpers an die Fronthaubenvorderkante soll dabei einen Wert von 5 kN nicht übersteigen. Das auf den Impaktor einwirkende Biegemoment soll kleiner als 300 Nm sein. Alternativ zum Beinprüfkörper kann dieser auch bei Fahrzeugen mit einer Stoßfängerunterkantenhöhe von mehr als 500 mm, wie es z.B. bei SUVs (Sport Utility Vehicle) vorkommt, verwendet werden. [10]

2.1.2 Euro NCAP Fußgängerschutz

Das NCAP (New Car Assessment Programme) wurde 1978 in den USA ins Leben gerufen. In den 90er Jahren wurde dann auch in Europa der NCAP mit Standort in Brüssel mit der Bezeichnung Euro NCAP formiert. Im Gegensatz zur europäischen Gesetzgebung soll nicht auf Grenzwerte geprüft werden, sondern vielmehr soll eine Bewertung des Fahrzeugs auf Insassenschutz sowie Fußgängersicherheit erfolgen. Das NCAP ist somit keine gesetzliche Vorgabe sondern ein Verbraucherschutzprogramm, welches durch eine einfach verständliche Klassifikation (Sterne-Bewertung), das sicherheitstechnische Abschneiden bei den NCAP Tests

aufzeigen soll. Das Euro NCAP-Protokoll des Fußgängerunfalls beschreibt ein Testverfahren, das nach dem Prinzip der europäischen Phase II Verordnung arbeitet. [11]

Beim Euro NCAP Fußgängerschutz werden grundsätzlich vier verschiedene Tests mit einer Anprallgeschwindigkeit von 40 km/h durchgeführt:

- Beinprüfkörper auf die Stoßstange
- Hüftprüfkörper auf die Fronthaubenvorderkante
- Kinderkopfform auf verschiedene Stellen der Fronthaube
- Erwachsenenkopfform auf verschiedene Stellen der Fronthaube sowie Windschutzscheibe und A-Säule

Typ und Masse der Prüfkörper entsprechen jenen, welche in der europäischen Verordnung 2009/631/EG angeführt sind. Es werden 18 verschiedene Anprallpunkte gewählt (12 für die Kopfform und jeweils 3 für den Bein- und Hüftprüfkörper) und getestet. Pro Anpralltest werden 2 Punkte vergeben, was in Summe 36 Punkte als Maximalwert ergibt. Je nach Punkteanzahl wird in Sterne unterteilt, 5 Sterne werden für das Erreichen von 60% der möglichen Punkte vergeben. [12] [11]

Bewertungen zum Fußgängerschutz werden im Rahmen des NCAP Programms ausschließlich in den vereinigten Staaten und Europa durchgeführt. NCAP Prüfungen etwa in Japan oder Australien sehen lediglich Tests zum Insassenschutz vor.

2.2 Fahrzeugfrontgeometrie

Die Front eines Fahrzeuges hat einen entscheidenden Einfluss auf den Ablauf des Unfalls bzw. auf die Verletzungssituation des Fußgängers. Die Kinematik des Fußgängerunfalls wird primär durch die Form und die globale Steifigkeit der Fahrzeugfront beeinflusst. Lokale Steifigkeiten sind für die kinematische Betrachtung von sekundärer Bedeutung, sie beeinflussen allerdings ebenfalls entscheidend die Verletzungsschwere des Fußgängers [13].

2.2.1 Vermessung relevanter Fronthauben-Geometrien

Beschränkt man sich lediglich auf die Geometrie und lässt die jeweiligen lokalen Steifigkeiten dieser Teile außer Acht, so sind die Fronthaubenkantenhöhe, die Stoßstangenhöhe sowie der Abstand, welche die Stoßstange vorsteht relevant.

Die Messung dieser Parameter erfolgt nach den aktuellen EEVC (European Enhanced Vehicle-Safety Committee) Richtlinien bzw. den Beschreibungen des „NCAP-Pedestrian-Protocols“ [11].

- Messung der Fronthaubenkantenhöhe

Zur Höhenmessung der Fronthaubenvorderkante wird als erster Schritt die Bezugslinie der Fronthaubenvorderkante definiert. Diese Kante ist die Ortslinie der Berührungspunkte

zwischen der Fronthaubenoberfläche und einem 1000 mm langen geraden Richtstab, der parallel zur senkrechten Längsebene gehalten und um 50° nach hinten geneigt quer über die Frontfläche des Fahrzeugs geführt wird. Dabei hält er ständigen Kontakt mit der Fronthaubenvorderkante, während sich sein unteres Ende 600 mm über der Fahrbahn befindet (Abbildung 8). Bei Fahrzeugen deren Fronthaube in wesentlichen Bereichen um 50° geneigt ist, so dass sie von dem Richtstab nicht in einem Punkt, sondern in mehreren Punkten oder linear berührt wird, ist die Bezugslinie mit einem um 40° nach hinten geneigten Richtstab zu bestimmen. Ist die Fahrzeugfront so geformt, dass in bestimmten seitlichen Positionen das untere Ende des Richtstabs zuerst mit dem Fahrzeug in Berührung kommt, sind die Berührungspunkte in diesen Positionen als Punkte der Bezugslinie der Fronthaubenvorderkante zu betrachten. Wird bei diesem Verfahren die Oberkante des Stoßfängers von dem Richtstab berührt, ist auch sie als Fronthaubenvorderkante zu betrachten. [14]

Als Höhe der Fronthaubenvorderkante wird nun der vertikale Abstand zwischen der Standfläche und der definierten Bezugslinie bezeichnet, eine normale Fahrstellung des Fahrzeugs vorausgesetzt.

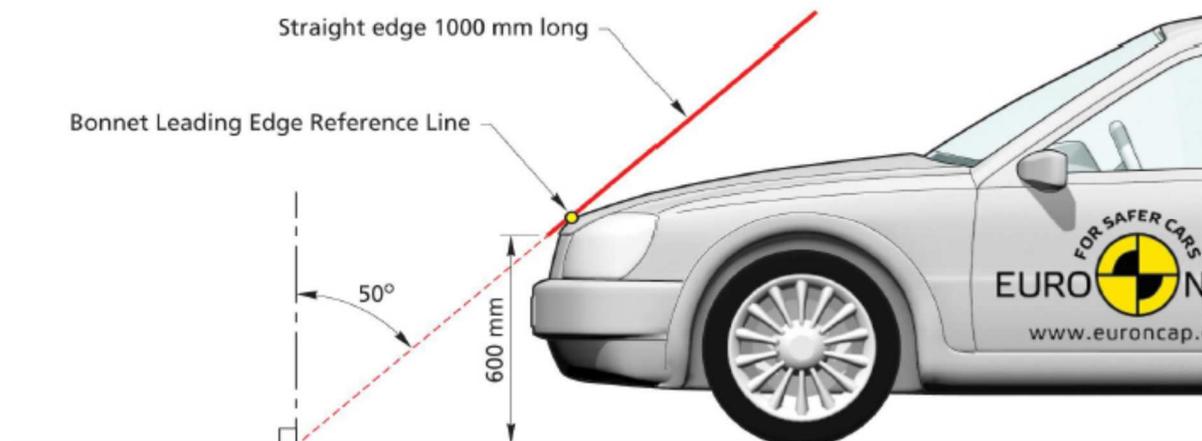


Abbildung 8: Vermessung der Fronthaubenkantenhöhe [11]

- Messung der Stoßfängerhöhe

Zur Stoßfängerhöhenmessung wird eine Bezugslinie definiert, welche die Obergrenze signifikanter Berührungspunkte zwischen Fußgänger und Stoßfänger darstellt. Diese ist eine Ortslinie der obersten Berührungspunkte zwischen dem Stoßfänger und einem 700 mm langen geraden Richtstab, der parallel zur senkrechten Längsebene des Fahrzeugs gehalten und um 20° nach hinten geneigt quer über die Fahrzeugfront geführt wird. Dieser hält dabei ständig Kontakt mit der Oberfläche des Stoßfängers und der Standfläche (Abbildung 9). [14]

Als Höhe des Stoßfängers wird nun jener senkrechte Abstand zwischen der Standfläche und der Stoßfängerbezugslinie bei normaler Fahrstellung des Fahrzeugs verstanden.

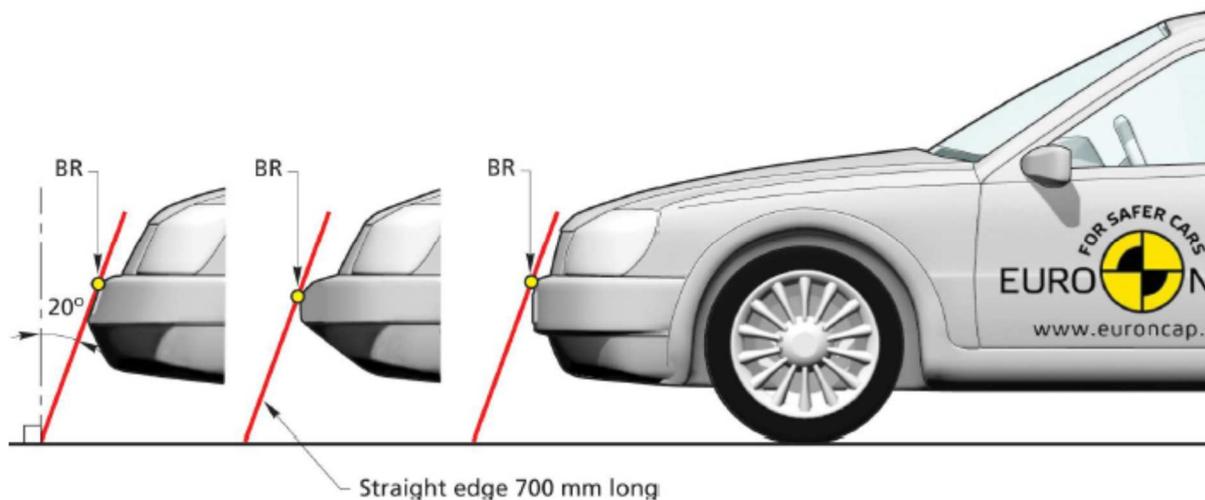


Abbildung 9: Vermessung der Stoßstangenhöhe [11]

- Messung des Stoßfängervorsprungs

Die Messung des Stoßfängervorsprungs erfolgt durch die Bestimmung der Stoßfängerbezugslinie und der Bezugslinie der Fronthaubenvorderkante. Als Stoßfängervorsprung wird schließlich der horizontale Abstand dieser beiden Bezugslinien bezeichnet. [14]

2.2.2 Kategorisierung der Fahrzeugfronten

Eine Einteilung von Fahrzeugen, welche den Umständen verschiedener Fahrzeugfronten Rechnung trägt, kann in der Fahrzeugfrontkategorisierung nach APROSYS (Advanced Protection Systems) gefunden werden. Dabei wurden die Fahrzeuge in fünf Klassen unterteilt: [15]

- Large & Small Family Cars
- Small MPV/Supermini
- SUV
- Large MPV/1-box
- Roadster

Einen Auszug diverser Fahrzeuge und ihrer Zuteilung in die jeweiligen Klassen erfolgte ebenfalls in APROSYS (Tabelle 1).

In Abbildung 10 ist für jede Fahrzeugklasse ein entsprechendes Fahrzeugmodell stellvertretend dargestellt. Fahrzeuge der Kategorie „SUV“ heben sich nach dieser Einteilung am stärksten von den restlichen Fahrzeugen ab. Als markantestes Merkmal ist bei SUVs die hoch angesetzte Fronthaubenkante zu erwähnen.

Im Gegensatz dazu liegt bei Fahrzeugen der Klasse „Roadster“ die vordere Kante der Fronthaube sehr tief. Ausgeprägte Stoßstangen sind bei Fahrzeugen dieser Klasse nicht

vorzufinden, des Weiteren ist die lange und in der Regel flach oder keilförmig verlaufende Fronthaube zu erwähnen.

Fahrzeuge der Kategorie „Small MPV/Supermini“ (SMPS) unterscheiden sich von der Klasse „Large & Small Family Car“ (LSFC) durch kürzere Fronthaubenlängen. Ebenfalls weisen SMPS Fahrzeuge häufig größere Radien im Bereich der Fronthaubenvorderkante und eine stärkere Haubenneigung auf.

„Large MPV /1-Box“ Fahrzeuge haben in der Regel eine sehr kurze Fronthaube mit starker Neigung. Im Bereich der Fronthaubenkante sind Fahrzeuge dieser Klasse häufig mit großen Radien versehen.

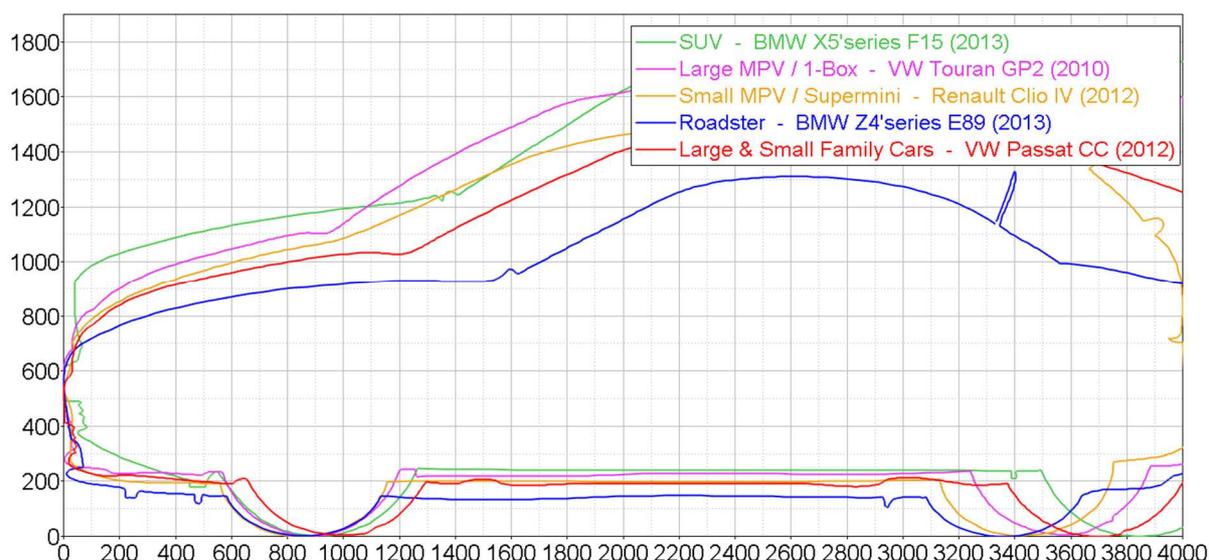


Abbildung 10: Fahrzeugklassifizierung nach APROSYS [16]

Tabelle 1: Fahrzeugkategorisierung nach Frontgeometrie, Fahrzeugbeispiele [15]

Classification Groups According to APROSYS	Examples
Large & Small Family Cars	Audi A4 (2000), BMW 5-Series (1999), Renault Megane (2004), VW Passat (2001), Opel Vectra (2003), VW Scirocco III (2010), BMW 3-Series F30 (2012)
Small MPV/ Supermini	Skoda Fabia (2000), Renault Twingo (1993), VW Touran (2003), Ford Fiesta (2002), Peugeot 206 (1998), Renault Clio IV (2012), Opel Adam (2012)
SUV	BMW X5 (2000), Jeep Grand Cherokee (1999), Suzuki Grand Vitara (2004), Hyundai Santa Fe (2001), Honda CR-V (2004), VW Tiguan (2011), Opel Mokka (2012),
Large MPV/1-Box	Nissan Serena (1996), Toyota Previa (1996), VW Touran GP2 (2010)
Roadster	Mazda MX-5 (1994), Opel Tigra (1997), BMW Z4-Series E89 (2013), BMW 6-Series F13 (2011)

2.3 Unfallmechanik

2.3.1 Zeitliche Phasen der Kollisionssituation [8] [17]

Verkehrsunfälle aller Art können grundsätzlich in drei Phasen gegliedert werden: In eine Vorkollisionsphase, eine Kollisionsphase und in eine Nachkollisionsphase.

- Vorkollisionsphase

Die Vorkollisionsphase beschreibt die unfallbezogene Vorgeschichte, sowie die Einlaufbewegung der Unfallkontrahenten vom Erkennen der kritischen Situation bis zum ersten Kontakt. In dieser Zeit vor der Kollision sollte in der Regel der Unfallbeteiligte die Gefahr erkennen und auf die Situation reagieren (bremsen, lenken, beschleunigen, kombiniert).

- Kollisionsphase

Die Kollisionsphase beinhaltet den Erstkontakt der Unfallgegner und enthält mindestens eine Kontaktphase sowie eine Auslaufphase. Dabei können hohe Beschleunigungskräfte auftreten, welche Fahrzeuginsassen, Zweiradfahrer oder Fußgänger erheblich gefährden. Durch diese aufeinander wirkenden Beschleunigungskräfte entstehen Deformationen des Unfallfahrzeugs sowie Verletzungen der beteiligten Personen.

- Nachkollisionsphase

Die Nachkollisionsphase beschreibt den Auslaufvorgang der beteiligten Unfallkontrahenten bis zur Endlage.

2.3.2 Grundbegriffe zur Rekonstruktion von Fußgängerunfällen

An einem Fußgängerunfall sind in der Regel der Fußgänger selbst, ein Fahrzeug und die Umgebung beteiligt.

Jede dieser Einflussgrößen hat wiederum mehrere Parameter, deren Variation sich sehr stark auf den kinematischen Ablauf des Unfalls auswirken. [18]

Beim Fußgänger sind vor allem die Körpergröße, Gewicht, Bewegungsgeschwindigkeit und die Bewegungsrichtung relativ zum Fahrzeug relevant. Beim beteiligten Fahrzeug spielen Karosserieform und Steifigkeit, die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt des Anstoßes, wie auch das Bremsverhalten eine wesentliche Rolle. Ebenfalls beeinflussen Fahrbahnzustände wie Neigung der Straße oder durch die Witterung beeinflusste Verschlechterungen der Reibwerte des Straßenbelags das Unfallgeschehen wesentlich.

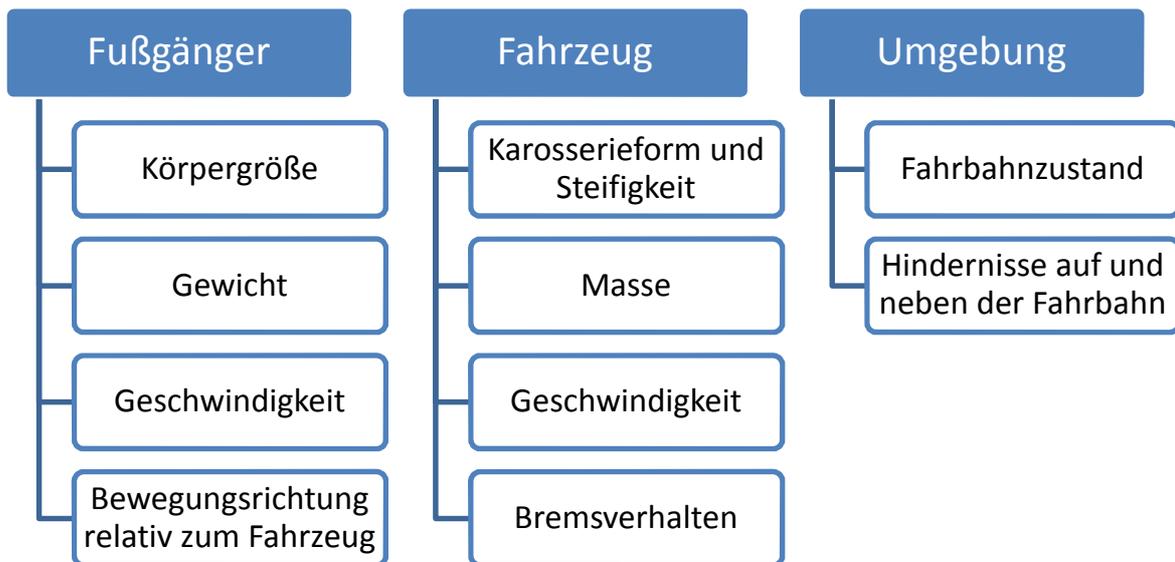


Abbildung 11: Wesentliche Einflussfaktoren in Bezug auf Fußgängerunfälle und deren Rekonstruktion [18]

Die wichtigsten Begriffe zur Beschreibung eines Fußgängerunfalls sollen nun erläutert werden, eine grafische Veranschaulichung dazu ist in Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellt. [17]

- Längswurfweite

Die Längswurfweite beschreibt den Abstand zwischen Erstkontakt des Fußgängers am Fahrzeug und der Endlage des Fußgängers, bezogen auf dessen Schwerpunkt, parallel zur Achse des Fahrzeugs. Sie addiert sich aus Flug- und Rutschweite.

Mithilfe dieser Größe ist es möglich eine erste Abschätzung der Fahrzeuggeschwindigkeit zum Kollisionszeitpunkt zu treffen. Die Längswurfweite ist des Weiteren stark abhängig vom Reibwert zwischen Straßenbelag und dem Körper des betroffenen Fußgängers und dessen Gewicht.

- Querswurfweite

Die Querswurfweite beschreibt den Abstand zwischen dem Erstkontakt des Fußgängers am Fahrzeug und der Endlage des Fußgängers, bezogen auf dessen Schwerpunkt, normal zur Achse des Fahrzeugs.

Hauptinflussfaktoren für diese Größe sind die Fahrzeuggeometrie, die Gehgeschwindigkeit des Fußgängers sowie dessen Gehrichtung in Bezug auf die Fahrtrichtung des Fahrzeugs.

- Beulenversatz

Dieser beschreibt den seitlichen Abstand zwischen Erstkontaktstelle am Fahrzeug, welcher in der Regel das Bein oder die Hüfte des Fußgängers betrifft und der Kopfanprallstelle, quer zur Fahrzeuglängsachse gemessen. Der Hauptinflussfaktor für den Beulenversatz ist die

Bewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers zum Zeitpunkt des Erstanpralls, quer zur Fahrtrichtung.

- Aufwurfweite

Die Aufwurfweite beschreibt den Abstand zwischen dem Erstkontakt des Fußgängers am Fahrzeug und dem Kopfaufprallpunkt, parallel zur Achse des Fahrzeugs.

Wesentliche Einflussfaktoren sind hierfür die Körpergröße des Fußgängers, die Kontur der Fahrzeugfront, sowie die gefahrene Geschwindigkeit zum Zeitpunkt des Anstoßes.

Bei pontonförmigen Fahrzeugfronten wird etwa der Kopf eines ca. 170 cm großen Fußgängers die hintere Fronthaubenkante berühren, eine Kollisionsgeschwindigkeit zwischen 30 und 40 km/h vorausgesetzt. Die Frontscheibe wird bei Anstoßgeschwindigkeiten von 40 bis 50 km/h erreicht. Ein Kopfanprall an der vorderen Dachkante, wird bei Geschwindigkeiten von etwa 50 bis 60 km/h eintreten. Ist die Fahrzeugfront keilförmig gestaltet, kann ein Kopfanprall an die Frontscheibe bereits bei Kollisionsgeschwindigkeiten unter 40 km/h erfolgen.

- Abwickellänge

Die Abwickellänge ist die Wegstrecke von der Fahrbahn weg gemessen, bis zum Kopfanprallpunkt am Fahrzeug, gemessen entlang der Fahrzeugkontur. Dieser Messwert ist jedoch oftmals schwer zu erheben, darum wird in der Unfallanalyse und Rekonstruktion die Aufwurfweite bevorzugt.

Wesentliche Einflussfaktoren sind hier wiederum die Körpergröße des Fußgängers, die Kontur der Fahrzeugfront, sowie die gefahrene Geschwindigkeit zum Zeitpunkt des Anstoßes.

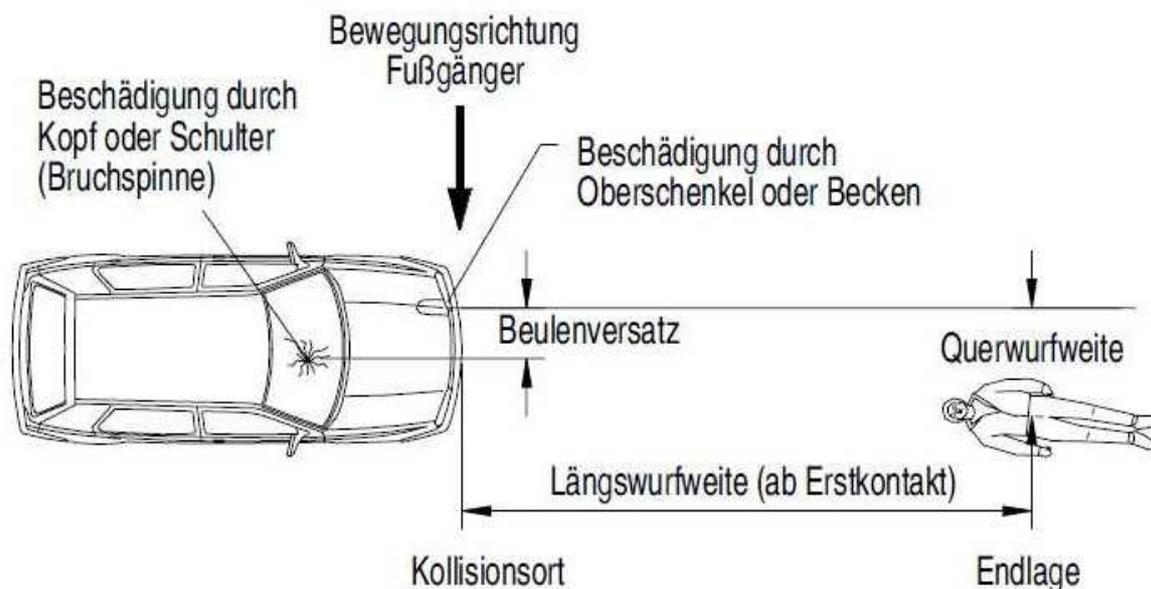


Abbildung 12: Grafische Begriffsdefinition eines Fußgängerunfalls – Draufsicht [19]

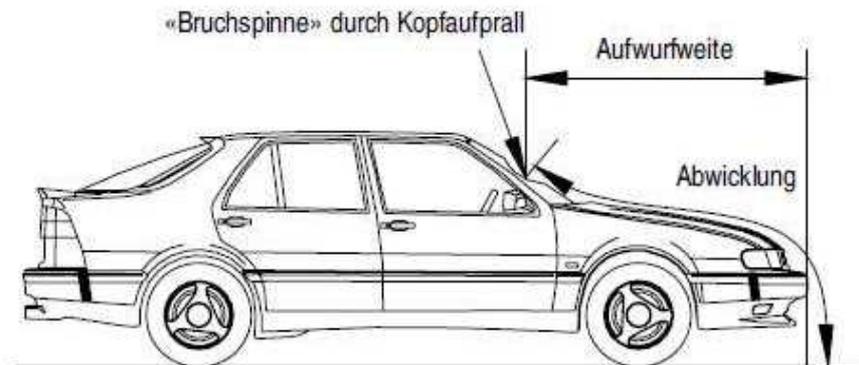


Abbildung 13: Grafische Begriffsdefinition eines Fußgängerunfalls - Seitenansicht [19]

2.3.3 Unterscheidbare Phasen bei Fußgänger-Fahrzeug-Kollisionen

Bei Kollisionen von Kraftfahrzeugen mit Fußgängern können nach der Vorkollisionsphase folgende typische Mechanismen beobachtet werden (siehe Abbildung 14): [8] [17]

1. Der primäre Fahrzeuganprall

In den meisten Fällen wird zunächst der querende Fußgänger, je nach Körpergröße und Fahrzeugtyp an den Beinen oder am Becken mit der Fahrzeugfront erfasst. Der Schwerpunkt eines Menschen befindet sich ca. in der Höhe des Abdomens, wodurch es aus mechanischer Sicht zu einem Schiefen-Exzentrischen-Stoß kommt. Der Körper der Verunfallten wird somit in eine rotierende Bewegung versetzt.

2. Aufladen des Fußgängers

Innerhalb des Aufladevorgangs spielen Faktoren wie Körpergröße, Gewicht, Körperhaltung und Gehgeschwindigkeit des Fußgängers, sowie Fahrgeschwindigkeit und eine bereits eingeleitete Bremsung des beteiligten Fahrzeugs eine Rolle. Bei kleineren Personen wird die Aufwurfweite beispielsweise bedeutend geringer sein als bei großen Personen. Ebenso kommt es bei Bremsvorgängen zu einer Nickbewegung des Fahrzeugs, was dazu führt, dass die Fahrzeugfront geringere Höhenniveaus in allen Bereichen aufweist und der Fußgänger somit weiter unterhalb seines Schwerpunktes angefahren wird. Dies erhöht ebenfalls die Aufwurfweite.

Bei pontonförmigen Fahrzeugfronten erfolgt nach dem Anprall der Beine gegen die Stoßstange der Kontakt zwischen Fronthaubenvorderkante mit dem Oberschenkelbereich oder Beckenbereich des Fußgängers. Bei keilförmigen Fahrzeugen und Fahrzeugen in Kastenform entfällt in der Regel dieser Kontakt.

Zu diesem Zeitpunkt beginnt das sogenannte Aufladen des Fußgängers, dabei wird der Fußgänger ca. auf die Geschwindigkeit des Fahrzeugs beschleunigt und rotierend Richtung Windschutzscheibe bewegt. Bei Fahrzeugen in Kastenform findet dieser Aufladevorgang nicht

statt. Der Körper prallt fast zeitgleich mit seiner gesamten Länge gegen die stabile und in der Regel verformungssteife Fahrzeugfront. Eine Rotation des Körpers und allmähliche Angleichung der Fußgängergeschwindigkeit an die Geschwindigkeit des Fahrzeugs findet nicht statt. Der Fußgänger wird unmittelbar auf die Fahrzeuggeschwindigkeit beschleunigt. Der Fußgänger wird durch diesen zentralen Stoß in Fahrzeughauptrichtung abgeworfen. Bei keilförmigen Fahrzeugfronten führt der Fußgänger aufgrund eines größeren Hebelarms eine stärkere Rotationsbewegung aus und kann weiter Richtung Frontscheibe bzw. Dach geschleudert werden.

Befindet sich die Anstoßstelle sehr weit seitlich an der Fahrzeugfront, oder handelt es sich beim Anstoß um eine Teilüberdeckung mit der Fahrzeugfront (siehe Kapitel 2.3.4), rutscht der betroffene Fußgänger weiter auf die Frontpartie auf. In diesem seitlichen Bereich der Frontpartie befinden sich bei allgemeiner Bauweise, Teile mit erhöhter Steifigkeit wie etwa der Kotflügel-Haubenübergang oder seitliche Abschlusskanten der Fronthaube. Dies führt in solchen Fällen zu einem erhöhten Verletzungspotential für den ungeschützten Verkehrsteilnehmer Fußgänger [8].

3. Abwurf des Fußgängers

In dieser Zeitspanne erfolgt das Lösen des Fußgängers vom Fahrzeug. Wird das Fahrzeug bereits in den zuvor beschriebenen Phasen gebremst, löst sich der Fußgänger vom Fahrzeug und prallt in weiterer Folge auf die Straße. Bei geringen Kollisionsgeschwindigkeiten oder geringer Fahrzeugverzögerung kann sich der Vorgang des Lösens auch als ein Abrutschen des Fußgängers entlang der Fronthaube darstellen. Ist eine ausgeprägte Abwurfbewegung gegeben, löst sich der Körper vom Fahrzeug, fliegt entlang einer ballistischen Kurve und führt dabei die ihm im Erstkontakt aufgeprägte Drehbewegung fort. Bei ungebremster Weiterfahrt oder bei Anprallgeschwindigkeiten größer als 80 km/h fliegt oder rutscht der Fußgänger nach hinten über das Fahrzeugdach hinweg.

4. Rutschen oder Abrollen auf der Fahrbahn

Nach dem Auftreffen auf der Fahrbahn rutscht der Fußgänger, je nach Kollisionsgeschwindigkeit eine gewisse Wegstrecke auf der Fahrbahn bis zur Endposition bzw. rollt auf der Fahrbahn bis es zum Bewegungsstillstand kommt ab. In dieser Phase des Rutschens oder Rollens baut der Körper die kinetische Energie in Form von Reibungswärme und viskoser Dämpfung in den weichen Strukturen des Körpers durch Muskelarbeit und plastische Verformung (Knochenbrüche) ab. Die dabei zurückgelegte Strecke zwischen Kollisionspunkt und Endposition des Fußgängers ergibt die Wurfweite. Dieses Maß ist im Wesentlichen durch die Kollisionsgeschwindigkeit und der Reibung zwischen Fußgänger und Untergrund bestimmt.

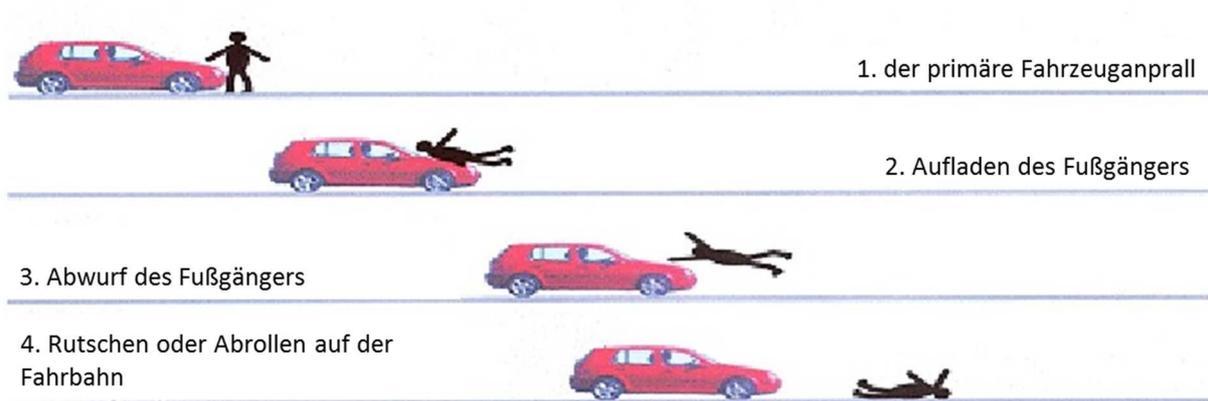


Abbildung 14: Zeitliche Phasen einer PKW-Fußgänger Kollision [17]

2.3.4 Unterscheidbare Stoßarten in Bezug auf Fußgängerunfälle

Bezüglich des Erstkontakts zwischen Fahrzeugfront und Fußgänger lässt sich grundlegend zwischen Vollstoß, Teilstoß und einem Streifstoß bzw. dem Überrollen oder Überfahren des Fußgängers unterscheiden. [18]

- Vollstoß

Von einem Vollstoß wird in der Unfallmechanik gesprochen, wenn sich der gesamte Körper des Fußgängers innerhalb der vorderen Fahrzeugkontur befindet. Es spielt dabei in Bezug auf die Stoßart keine Rolle ob sich der Fußgänger in Bewegung befindet oder steht bzw. ob sich dieser von rechts oder links annähert. Gehend oder laufend tritt im realen Unfallgeschehen am Häufigsten ein, ebenso ist zu beobachten dass die Anzahl von links kommender Fußgänger im Rechtsverkehr größer ist als jene der von rechts kommenden [8]. Ebenso lässt sich laut Hausmann sagen, dass es sich in 40% aller Unfälle mit Fußgängerbeteiligung um Kollisionen mit einer Vollüberdeckung handelt [20].

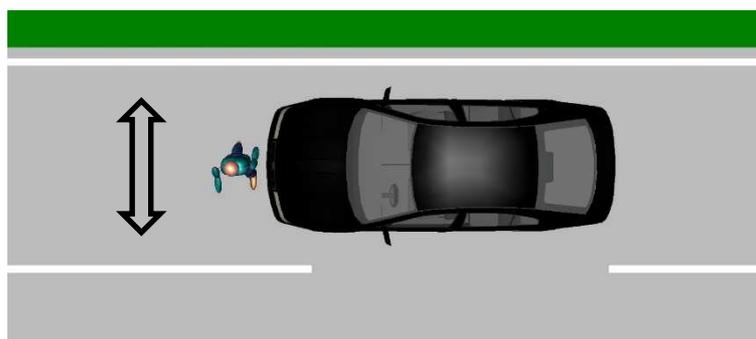


Abbildung 15: Vollstoß [18]

- Teilstoß

Von einem Teilstoß wird gesprochen, wenn sich der Fußgänger nicht zur Gänze innerhalb der vorderen Fahrzeugkontur befindet. Der Fußgänger wird hierbei von der äußersten Seite der Fahrzeugfront erfasst. Durch die meist stark abgerundeten seitlichen Kanten erfährt der Fußgänger durch den Stoß eine erhöhte Querwurfweite. Wie bereits erwähnt beschreibt dieses Unfallszenario ein erhöhtes Verletzungsrisiko des Fußgängers, da sich seitlich am Fahrzeug Bauteile mit erhöhter Steifigkeit befinden [8]. In 57% aller Unfälle, bei denen Fußgänger von der Fahrzeugfrontpartie erfasst wurden, liegt eine Teilüberdeckung vor. In Abbildung 16 sind schematisch zwei Arten von sogenannten Teilstößen dargestellt, der hinausgehende Teilstoß, sowie der sogenannte hineingehende Teilstoß, diese treten in etwa gleich häufig auf. [20]

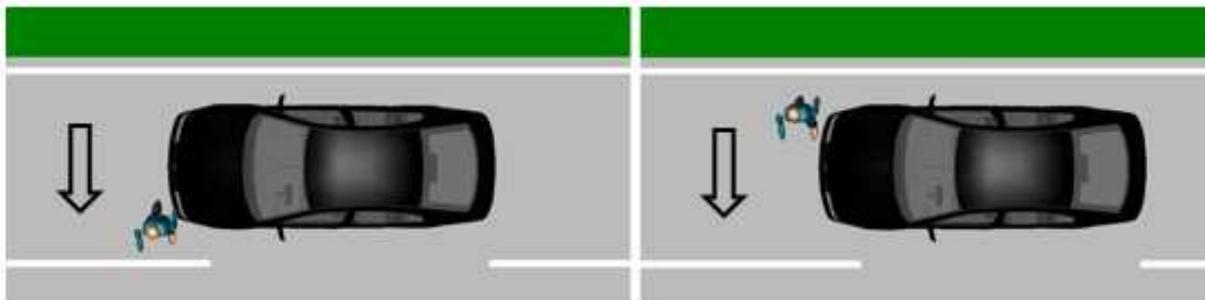


Abbildung 16: Teilstoß [18]

- Streifstoß und Überrollen/Überfahren

Ein Streifstoß tritt in lediglich 3% aller Fußgängerunfälle auf [20]. Dabei handelt es sich um einen Unfall bei dem der Fußgänger von der Fahrzeugseite gestreift wird. Durch Reibungskräfte zwischen Fahrzeug und Fußgänger wird in dieser Situation häufig eine Drehbewegung des Fußgängers eingeleitet, ein Kontakt zwischen dem Kopf des Fußgängers und der A-Säule des Fahrzeugs ist dabei denkbar (siehe Abbildung 17).

Von Überrollen spricht man, wenn ein auf der Fahrbahn liegender Fußgänger von einem Fahrzeug mit dessen Rädern überrollt wird. Beim Begriff überfahren kommt es hingegen zu keinem Kontakt des Fußgängers mit den Fahrzeugrädern.



Abbildung 17: Streifstoß [18]

2.4 Die Abbreviated Injury Scale (AIS)

Die Grundidee zur Abbreviated Injury Scale hatte De Haven bereits Anfang der 1950er Jahre. Im Rahmen einer Untersuchung zu Flugzeugunfällen versuchte er eine Skala zur Bewertung von Insassenverletzungen zu erstellen. Ende der 1960er Jahre wurde diese für Verletzungen im Zuge von Verkehrsunfälle adaptiert und weiterentwickelt. Sie dient seither als Bewertungsskala für die Letalität von Einzelverletzungen. Diese AIS-Skala wird laufend überarbeitet bzw. verbessert und ist mittlerweile allgemein einsetzbar, so zum Beispiel auch für Brand- oder Schussverletzungen (aktuelle Version: AIS 2005, Update 2008). Mit dieser Skala ist ein standardisiertes System zur Einteilung von Typ und Schwere der erlittenen Verletzungen geschaffen worden. Diese Skala ist eine anatomische, was bedeutet, dass jede Verletzung in Hinblick auf anatomische Lage, den Verletzungstyp und die relative Verletzungsschwere beschrieben wird. Es werden die Verletzungen selbst und nicht die Konsequenzen beurteilt [21]. [22]

Abbildung 18 zeigt den Aufbau des 7-stelligen Codes. Die erste Ziffer beschreibt die allgemeine Körperregion (Kopf, Thorax, Untere Extremitäten usw.). Die zweite Ziffer gibt Aufschluss über die betroffene anatomische Struktur. Etwa ob die Nerven, Venen oder das Skelett betroffen sind. Die 3. und 4. Ziffer der Codierung beschreibt die anatomische Struktur genauer, also um welchen Körperteil es sich genau handelt. Im Falle einer Verletzung der unteren Extremitäten etwa, ob es sich um eine Verletzung des Oberschenkelknochens oder des Wadenbeins handelt. Die 5. und 6. Ziffer der Codierung, der Level, gibt detailliertere Auskunft über die zuvor eingeschränkte Körperregion. Ist etwa der Oberschenkelknochen betroffen, so wird hier beschrieben an welcher Stelle dieser genau verletzt ist, etwa am Schaft oder am Oberschenkelhals. Die 7. und damit letzte Ziffer liefert die Information des Schweregrads der Verletzung (Tabelle 2) [22]. [21]

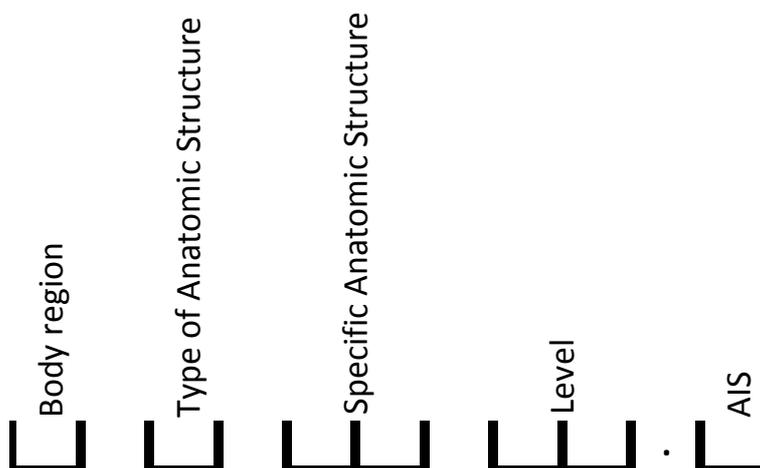


Abbildung 18: AIS Codierung [21]

Tabelle 2: Grad der Verletzungsschwere nach AIS [21]

AIS Code	Severity Score	Verletzungsschwere
0	no injury	unverletzt
1	minor	gering
2	moderate	ernsthaft
3	serious	schwer
4	severe	sehr schwer
5	critical	kritisch
6	Maximum (currently untreatable)	maximal (i.a. nicht behandelbar)
9	NFS (Not Further Specified)	nicht genauer angegeben

Knöchernen Strukturen von Becken und Oberschenkel werden nachfolgend im Detail beschrieben und Frakturen dieser Regionen nach AIS 98 codiert dargestellt. [23]

2.4.1 Anatomische Beschreibung des Pelvis und Codierung möglicher Frakturen

Das knöcherne Becken (Pelvic) besteht grundlegend aus den beiden Hüftbeinen (Ossa Coxae), dem Kreuzbein (OS Sacrum) und dem Steißbein (OS Coccygis).

Das Hüftbein kann in drei Bereiche unterteilt werden, das Schambein (OS Pubis), das Darmbein (Os Ilium) und das Sitzbein (Os Ischii). Die Hüftbeine sind jeweils über das Kreuzbein-Darmbein-Gelenk (Articulatio Sacroiliac) mit dem Kreuzbein verbunden. Diese Verbindung ist eine sehr feste und ermöglicht kaum Bewegung, ist aber für die Federung der Wirbelsäule von Bedeutung. An der Vorderseite des Beckens haben die beiden Hüftbeine eine knorpelige Verbindung über die Schambeinfuge (Symphysis Pubica). Die Hüftgelenkspfanne (Acetabulum) wird von den drei genannten Hüftknochen gebildet. [24] Die beschriebenen knöchernen Strukturen sind in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellt.

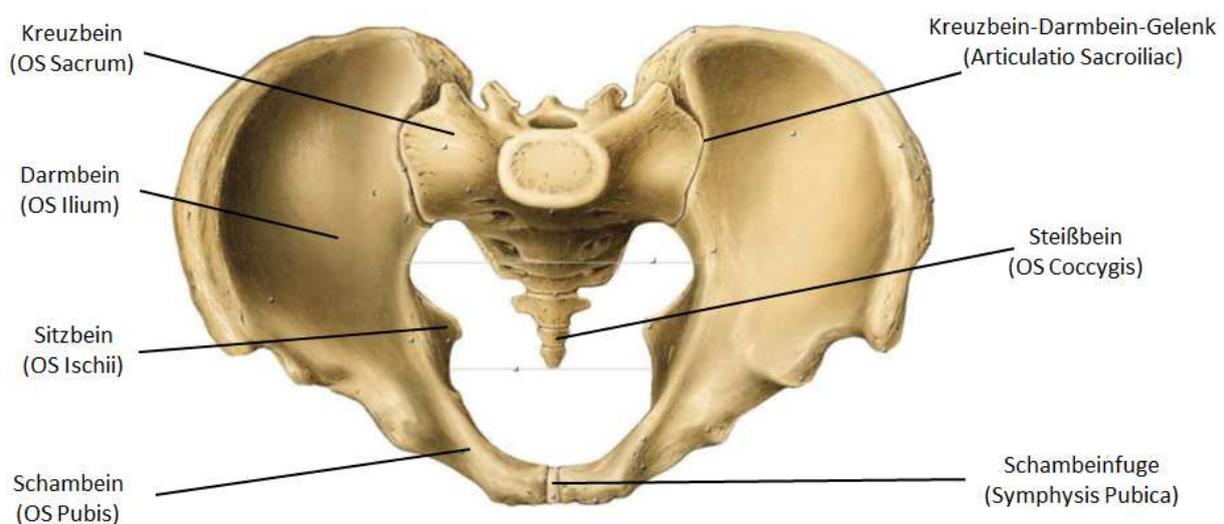


Abbildung 19: Männliches Becken, Draufsicht [25]

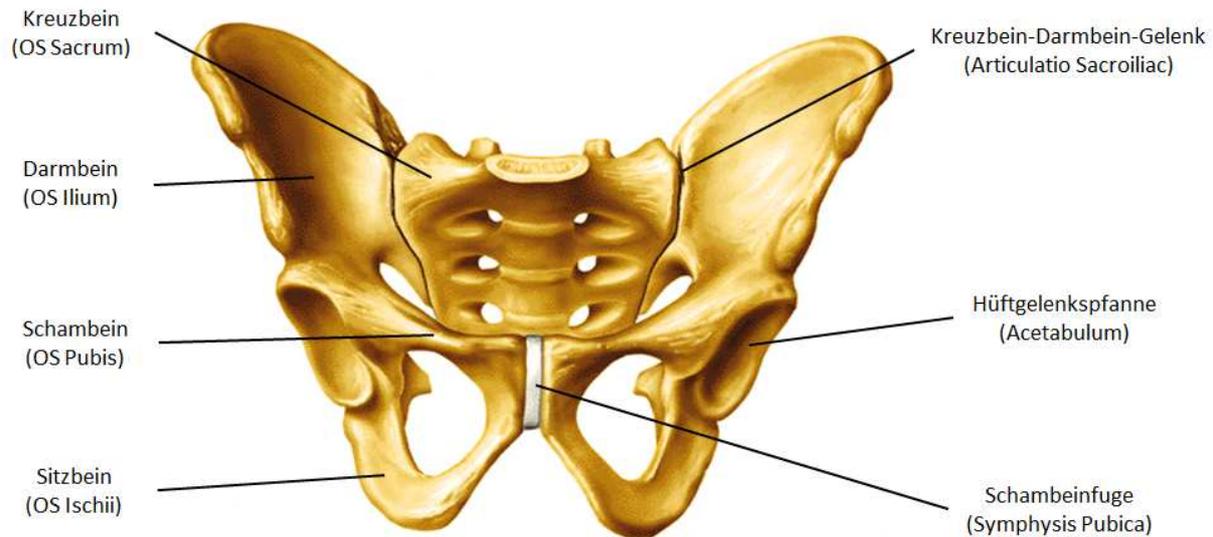


Abbildung 20: Männliches Becken, Vorderansicht [26]

AIS 98 ermöglicht keine Unterscheidung welche konkrete knöcherne Struktur des Beckens betroffen ist. So sind Frakturen von Acetabulum, OS Ilium, OS Ischii, OS Coccygis, OS Sacrum und Frakturen des OS Pubis mit der einheitlichen Nummer zur anatomischen Struktur versehen. Nachfolgend sind die relevanten Codierungen aufgelistet. [23]

- 852600.2 Pelvis Fraktur; Diese Codierung wird verwendet, wenn eine Pelvis Fraktur festgestellt werden konnte, aber keine weiteren Angaben des diagnostizierenden Arztes vorliegen.
- 852602.2 Pelvis Fraktur, welche geschlossen und unverschoben ist.
- 852604.3 Pelvis Fraktur, wobei es sich bei der Verletzung entweder um einen offenen-, verschobenen- oder um einen Splitterbruch handelt.
- 852606.4 Pelvis Fraktur mit einer erheblichen Deformation und Verschiebung verbunden mit einer Gefäßstörung oder mit einem großflächigen retroperitonealem Hämatom, wobei keine Angabe zum Blutverlust, entstanden durch diese Verletzung, vorliegt. Eine sogenannte „open book“ Fraktur würde dieser Codierung entsprechen.
- 852608.4 Diese Codierung ergänzt die oben angeführte um die Information des Blutverlustes. Ist dieser bekannt und beträgt nicht mehr als 20% des Gesamtblutvolumens, hat diese Codierung zu erfolgen.

852610.5 Beträgt der Blutverlust mehr als 20% des Gesamtblutvolumens, wird diese Codierung angewendet. Die Schwere der Verletzung ist nicht mehr mit „sehr schwer“ eingestuft sondern bereits mit „kritisch“, siehe Tabelle 2.

Frakturen bzw. Risse der Schambeinfuge und des Iliosakralgelenks (Articulatio Sacroiliaca) werden nach AIS 98 gesondert angeführt. Solche Verletzungen entstehen unter anderem, wenn beide Beckenhälften vertikal gegeneinander verschoben werden. Verletzungen dieser Art können separat, aber auch speziell bei Verkehrsunfällen mit sogenannten „Open-Book-Frakturen“ gemeinsam auftreten. Die Codierung erfolgt wie nachstehend angeführt.

852800.3 Fraktur des Iliosakralgelenks mit oder ohne Dislokation

853000.3 Sprengung der Schambeinfuge

2.4.2 Anatomische Beschreibung des Femur und Codierung möglicher Frakturen

Der Oberschenkelknochen (OS Femoris) ist der am kräftigsten ausgebildete und längste Röhrenknochen des menschlichen Skelets. Er wird grundsätzlich in drei Bereiche gegliedert, den Oberschenkelschaft (Corpus femoris), den körpernahen (proximalen) Teil und den körperfernen (distalen) Teil des Knochens. Für die Codierung nach AIS 98 sind proximal der Oberschenkelkopf (Caput femoris), der Oberschenkelhals (Collum femoris) und der große und kleine Rollhügel (Trochanter major und minor) relevant. Distal befinden sich die Gelenksknorren (Condylus medialis und lateralis) und stellen einen Teil des Kniegelenks dar (Abbildung 21). Eine detaillierte anatomische Beschreibung der knöchernen Oberschenkelstrukturen ist nachstehend, den einzelnen Codierungen nach AIS 98 zugeordnet, beschrieben. [27] [23]

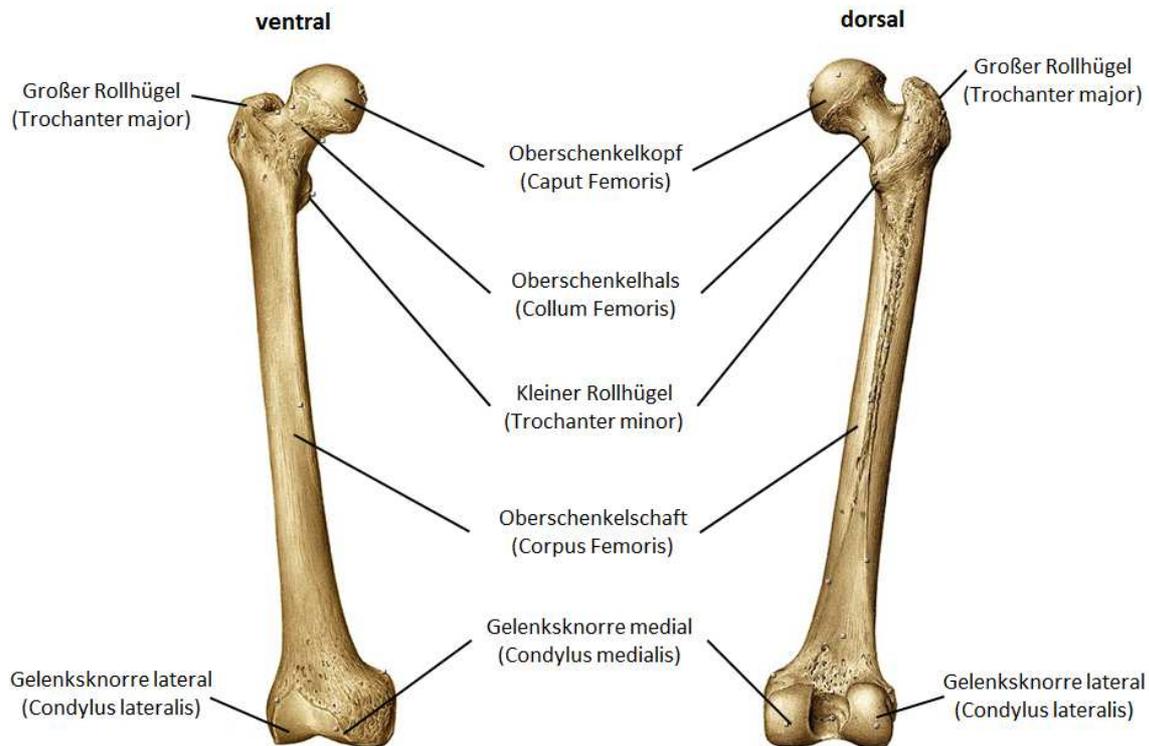


Abbildung 21: Femur, Vorder- und Hinteransicht

- 851800.3 Fraktur des Femur, ohne eine detaillierte Angabe zur genauen Stelle. Diese Codierung wird verwendet, wenn ein Bruch des Femur festgestellt werden konnte, aber keine weiteren Angaben vom diagnostizierenden Arzt gemacht wurden.
- 851801.3 Fraktur des Femur, ohne Angaben an welcher Stelle des Oberschenkelknochens sich diese Verletzung genau befindet. Diese Codierung sagt weiter aus, dass es sich bei der erlittenen Verletzung um einen offenen, verschobenen oder gesplitterten Bruch handelt.
- 851804.3 Fraktur des Femurkondylus; Als Femurkondylus werden die nach außen gekrümmten Gelenkknorren am distalen Ende des Oberschenkelknochens bezeichnet. Sie bilden mit dem Schienbeinplateau das Kniegelenk. Abgebildet ist eine Fraktur des Condylus medialis mit sagittalem Frakturverlauf.

Abbildung 22:
Fract.cond.med.fem. [54]

851808.3 Fraktur des Femurkopfes; Der Femurkopf befindet sich am oberen Ende des Oberschenkelknochens, dieser weist eine annähernd kugelförmige Gelenkfläche auf und bildet mit den Beckenknochen das Hüftgelenk. Abgebildet ist beispielhaft eine mögliche Fraktur des Femurkopfes.



Abbildung 23:
Fract.capit.fem. [54]

851810.3 Intertrochantäre Femurfraktur; Als Trochanter bezeichnet man die körpernahen Rollhügel. Diese Rollhügel dienen als Ansatz für die Muskulatur. Die Abbildung zeigt einen Bruchverlauf durch den Trochanter (Intertrochantär).



Abbildung 24:
Fract.troch.fem. [55]

851812.3 Oberschenkelhalsfraktur; Als Oberschenkelhals bezeichnet man den leicht abgewinkelten Fortsatz der aus dem Femurschaft hüftnah herausragt und trägt am Ende den Femurkopf oder auch Hüftkopf genannt. Die Abbildung zeigt beispielhaft eine Fraktur des Oberschenkelhalses, mit einer typisch verlaufenden Bruchlinie.



Abbildung 25: Fract.colli.fem.
[54]

851814.3 Fraktur des Femurschaftes; Der Schaft des Oberschenkelknochens ist nahezu zylindrisch geformt, aber merklich gebogen. Er wird körpernah vom Trochanter und körperfern von den Kondylen begrenzt. Die Abbildung zeigt mögliche Arten einer Femurschaftfraktur.



Abbildung 26: Fract. fem. [56]

851818.3 Subtrochantäre Femurfraktur; Subtrochantär bedeutet unterhalb des Trochanters. Diese Verletzung betrifft zwar rein anatomisch gesehen den Femurschaft wird aber grundsätzlich den hüftgelenksnahen Femurfrakturen zugeordnet. Die Abbildung zeigt einen geradlinigen Bruchverlauf des Femurschaftes direkt unterhalb des Trochanters.



Abbildung 27:
Fract.subtroch.fem. [57]

851822.3 Suprakondyläre Femurfraktur; Hierbei handelt es sich um eine distale Femurfraktur im Bereich des Femurschaftes und der Kondylen. Die Abbildung zeigt schematisch eine mögliche Bruchform die der angeführten Codierung entspricht.



Abbildung 28:
Fract.supracond.fem. [54]

2.5 Verletzungsmechanismen

In einer Studie von Eastridge [28] wurden 1014 Fußgänger-Pelvis Verletzungen untersucht. Dabei zeigte sich, dass 71% dieser durch laterale Krafteinwirkung, 21% durch Krafteinwirkung anterior oder posterior und 5% durch vertikale Scherkräfte entstanden. Den restlichen 3% der Pelvisverletzungen lagen kombinierte Krafteinwirkungen zu Grunde, oder die Richtung des einwirkenden Kraftvektors war unbekannt.

2.5.1 Fraktur der Schambeinäste [29] [30]

Das Darmbein ist posterior mit dem Kreuzbein und anterior mit den vier Schambeinästen verbunden (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20). Diese Schambeinäste sind knorpelig durch die Schambeinfuge verbunden. Aufgrund der vorderen Krümmung des Beckens und der relativ schmalen Knochenstruktur der Schambeinäste, sind diese vermehrt anfällig für Frakturen bei lateraler Krafteinwirkung.

Die meisten lateralen Kräfte auf die Hüfte werden in einem Punkt posterior zu den Schambeinästen transferiert. Bei Beckendehformationen führt dies zu einer Biegung der anterioren Bögen der Schambeinäste. Aufgrund der durch die Biegung hervorgerufenen Zugspannung kommt es somit vermehrt zu Frakturen der vorderen Schambeinäste.

2.5.2 Fraktur der Hüftgelenkspfanne

Ein weiterer häufig auftretender Verletzungsmechanismus betrifft die Hüftgelenkspfanne (Acetabulum) in Form einer sogenannten „push-throug-injury“. Bei dieser Verletzungsart durchstößt der Oberschenkelkopf die Hüftgelenkspfanne. Diese Art der knöchernen Verletzung kann auch in Verbindung mit einer Fraktur des Oberschenkelhalsknochens auftreten. Solche Frakturen der Hüftgelenkspfanne sind generell Folge einer konzentrierten Krafteinwirkung direkt auf den Oberschenkelkopf oder knapp unterhalb von diesem. [30]

2.5.3 Fraktur des Oberschenkelknochens

Femur Frakturen treten unabhängig von Pelvis Frakturen, oder kombiniert auf. Bei Kontakt des Schenkels mit der Fronthaubenvorderkante des Unfallfahrzeugs kommt es häufig zu einer Biegung des Oberschenkelknochens. Diese Biegung ist verbunden mit hohen Reaktionskräften bzw. Momenten welche sich auf Knie und Hüftgelenke abstützen. Dadurch können hohe Zugspannungen auftreten und folglich eine Fraktur des Oberschenkelknochens im Bereich des Schaftes. [31] [30]

2.5.4 Frakturen durch direkte und indirekte Krafteinwirkung [32]

Watson-Jones und Meyers [33] [34] untersuchten knöcherne Beckenverletzungen mit Hauptaugenmerk darauf, ob die gefundenen Frakturen durch direkte oder indirekte Krafteinwirkungen entstanden.

Eine Fraktur durch direkte Krafteinwirkung bedeutet, dass die knöcherne Verletzung an jener Seite aufzufinden war, an der auch die verursachende Kraft einwirkte. Eine Fraktur durch indirekte Krafteinwirkung bedeutet, dass die knöcherne Verletzung an der zur einwirkenden Kraft gegenüberliegenden Seite gefunden wurde. Verletzungen dieser Art entstehen speziell durch auftretende Spannungen, welche durch eine Deformation des Beckens induziert werden. Bei Frakturen, hervorgerufen durch direkte Krafteinwirkung sind häufig Frakturen der Darmbeinschaukel, zentrale Frakturen der Hüftgelenkspfanne, Frakturen des Kreuzbeins sowie des Steißbeins zu beobachten. Hingegen können Frakturen der Schambeinäste oder des Sitzbeins bei direkter oder indirekter Krafteinwirkung gleichermaßen auftreten.

Grzegorz Teresinski und Roman Madro [32] veröffentlichten 2001 eine Studie in der sie insgesamt 371 Hüftgelenke von Verkehrsunfallopfern postmortal öffneten. Allen untersuchten Unfallopfern lag zugrunde, dass sie in aufrechter Position befindlich von einem Fahrzeug frontal erfasst wurden. Bei 127 Unfallopfern konnten knöcherne Becken Verletzungen und/oder trochantäre Frakturen sowie Brüche des Oberschenkelhalsknochens diagnostiziert werden, in 47 Fällen davon, kam es zu einer Überrollung des Fußgängers.

In Tabelle 3 ist eine detaillierte Auflistung der dabei protokollierten Frakturen dargestellt. Es wurde eine Einteilung nach der Seite der Krafteinwirkung zum Zeitpunkt des Anpralls durchgeführt. Unterschieden wird hierbei zwischen lateraler, frontaler Krafteinwirkung und einer Krafteinwirkung auf die Körperrückseite des Fußgängers. Bei Frakturen durch laterale Krafteinwirkung wurde weiters unterschieden zwischen direkter (Ipsilateraler) und indirekter (Contralateraler) Krafteinwirkung.

Frakturen der vorderen Schambeinäste (pubic superior) und Frakturen der Iliosakralfuge traten bei diesen Untersuchungen am häufigsten auf. Von insgesamt 164 diagnostizierten Verletzungen, betrafen fast 70% eine der beiden genannten knöchernen Strukturen. Frakturen der Darmbeinschaukel und Frakturen des proximalen Oberschenkelknochens traten hingegen nur jeweils in 3% aller untersuchten Fälle auf.

Tabelle 3: Verletzte knöcherne Strukturen des Beckens nach Unterscheidung zur Art der Krafteinwirkung [32]

		Impact side					Total	
		From lateral		From rear	From Front	Not determined		
		Ipsilateral	Contralateral					
Number of cases examined			146		86	23	26	281
Number of cases with pelvic injuries			49		24	3	4	80
Damage	Pubis symphysis		10		5	2	2	19
	Upper ramus of pubic bone	28		14	23	1	3	69
	Lower ramus of pubic bone	11		5	2	0	3	21
	Iliac ala	3		1	1	0	0	5
	Sacroiliac joint	31		2	7	3	2	45
Trochanteric and collum fractures		3		2	0	0	0	5

3. MATERIAL

3.1 Allgemeine Informationen zur Datengrundlage

- GIDAS (German in-Depth Accident Study)

Die GIDAS ist ein Gemeinschaftsprojekt der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) und wurde im Jahr 1999 initiiert. Es werden Verkehrsunfälle mit Personenschaden stichprobenartig, nach einem genau definierten Erhebungsplan, aufgenommen, analysiert und rekonstruiert. Das Erhebungsgebiet umfasst die beiden Großstädte Hannover und Dresden, sowie deren näheres Umland. Pro Jahr werden etwa 2000 Verkehrsunfälle aufgenommen, welche wiederum bis zu 3000 Einzelinformationen je Unfall beinhalten. Technische, wie auch medizinische Unfalldaten werden auf diese Weise gesammelt. [35]

- ZEDATU (Zentrale Datenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen)

In der ZEDATU werden Verkehrsunfälle innerhalb Österreich seit 2003 analysiert. Die Datenaufnahme erfolgt ausschließlich retrospektiv auf Grund von gerichtlichen Unfallakten. Die darin befindliche Dokumentation (z.B. Verkehrsunfallanzeige, Lichtbilder, Fotogrammetrie, Verletzungsdaten, etc.) dient als Grundlage für die Rekonstruktion mittels PC-Crash. Im Moment verfügt die Datenbank über etwa 800 Eingabefelder, unter anderem zu beteiligten Fahrzeugen, beteiligten Personen, Infrastruktur, Kinematik des Unfalls oder zur Vermeidbarkeitsanalyse. Etwa 3000 Verkehrsunfälle sind in der ZEDATU mittlerweile detailliert erfasst festgehalten. [36]

- CEESAR (Centre Européen d'Etudes de Sécurité et d'Analyse des Risques)

Das Europäische Zentrum für Studien zur Sicherheit und Risikoanalyse ist eine französische Institution, welche als eine Non-Profit-Organisation geführt ist. Sie wurde 1992 gegründet und arbeitet auf dem Gebiet der Fahrzeug- und Straßensicherheit. Eine Datenbank, welche Tiefenanalysen von Verkehrsunfällen erlaubt wird von dieser Organisation ebenfalls geführt. Verkehrsunfälle werden analysiert und z.B. fahrzeugspezifische, personenspezifische oder kinematische Daten zum Unfall in die Datenbank eingepflegt. [37]

3.2 Datenmaterial zur Verletzungsanalyse

Für die Untersuchung von Becken- und Oberschenkelverletzungen wurde das Datenmaterial aus drei verschiedenen Ländern und Datenbanken analysiert (Deutschland GIDAS, Österreich ZEDATU, Frankreich CEESAR). Zur Erhöhung der Aussagekraft wurden die jeweiligen Datensätze zusammengefügt, um eine höhere Anzahl an Verletzungsdaten und Verletzungsumständen zu den betroffenen Fußgängern zu erhalten. Durch die Kombination der drei Datensätze lagen für diese Studie 2459 Verletzungen von Fußgängern des Schweregrads AIS 2+ und 1022 Verletzungen des Schweregrads AIS 3+ vor (Tabelle 4).

Tabelle 4: Anzahl an Verletzungsdaten nach Körperregion und Datenbank

Data source	Pelvis [n]		Femur [n]		All [n]	
	AIS 2+	AIS 3+	AIS 2+	AIS 3+	AIS 2+	AIS 3+
GIDAS	95	25	52	52	1648	571
ZEDATU	67	36	17	17	547	314
CEESAR	18	2	8	8	264	137
All	180	63	77	77	2459	1022

Die 1648 AIS2+ Verletzungen in den GIDAS Datensätzen haben 658 Fußgänger erlitten. Den 571 AIS3+ Verletzungen liegen 212 betroffene Fußgänger zu Grunde. Die 547 AIS2+ Verletzungen in der ZEDATU, bei welchen es sich ausschließlich um tödliche Unfälle handelt, stammen von 84 Fußgängerunfällen. Bei 81 Fußgängerunfällen wurden 314 AIS 3+ Verletzungen dokumentiert. Für die Daten aus Frankreich kann eine derartige Zuteilung nicht erfolgen, es ist nicht bekannt wie viele Fußgänger betroffen waren.

Eine Aufstellung, der in CEESAR, GIDAS und ZEDATU dokumentierten Fußgängerverletzungen je Fahrzeugklasse, ist in Abbildung 29 dargestellt. Aus dem CEESAR Datenbestand wurden lediglich Daten zu „Large & Small Family Cars“ übermittelt.

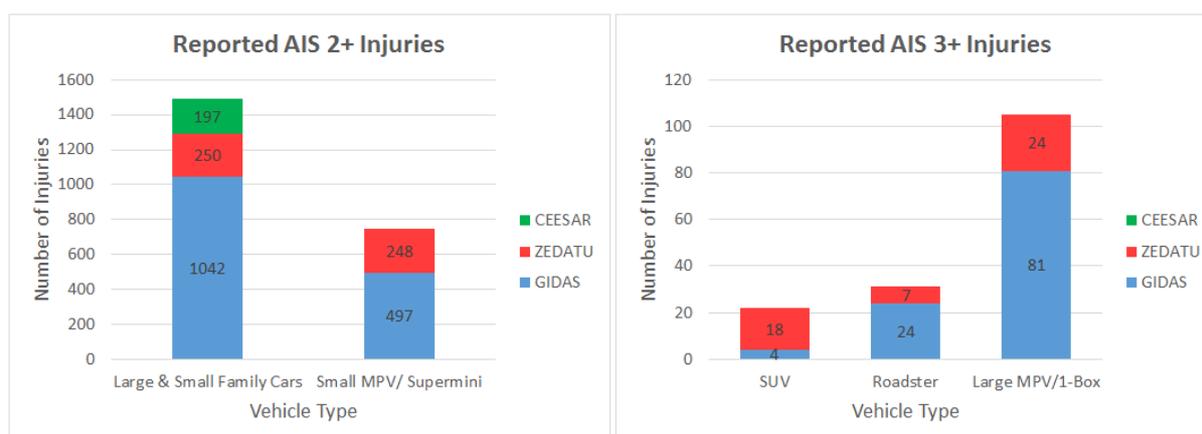


Abbildung 29: Anzahl der Verletzungen je Fahrzeugklasse

4. METHODIK ZUR REKONSTRUKTION VON REALUNFÄLLEN

Um den angesprochenen Datensatz von 84 Fußgängerunfällen zu erreichen, wurden noch 45 PKW-Fußgängerkollisionen, welche sich auf österreichischen Straßen ereigneten rekonstruiert. Die aus der Rekonstruktion berechneten Daten, wie beispielsweise Kollisionsgeschwindigkeit, Anprallposition am Fahrzeug, etc. wurden für die nachfolgende Analyse in der ZEDATU gespeichert. Für die Rekonstruktion wurde die Software PC-Crash verwendet. Nachfolgende Beschreibungen sollen einen kurzen Überblick zur Unfallrekonstruktion verschaffen.

4.1.1 Allgemeine Informationen zur Unfallrekonstruktion

Bei der Rekonstruktion von Unfällen stellt einerseits die Einsicht in Gerichtsakten, sowie die Vororterhebungen zum Unfallgeschehen eine wichtige Informationsquelle dar. Andererseits ergibt sich durch Verwendung von Rekonstruktionsprogrammen wie PC-Crash die Möglichkeit zur digitalen Nachstellung der jeweiligen Verkehrsunfälle mittels Simulation.

Unter optimaler Nutzung und Verwendung dieser Instrumente können präzise Aussagen über mögliche Ursachen und speziell über den Unfallhergang selbst getätigt werden. In den Gerichtsakten stellen vor allem Verkehrsunfallanzeige, Niederschrift von etwaigen Zeugen und der Beteiligten selbst, sowie fotodokumentarische Aufzeichnungen vom Unfallort und vom verunfallten Fahrzeug eine wichtige Informationsquelle dar. Im Idealfall werden dabei auch Fotogrammetriedaten oder Unfallskizzen gesammelt. Ein weiterer wichtiger Punkt sind Daten über Verletzungen der beteiligten Unfallopfer wie beispielsweise Verletzungsanzeigen und Obduktionsprotokolle, durch welche auf Anprallsituationen rückgeschlossen werden kann (beispielsweise Keilfraktur beim Fußgängerunfall).

In dieser Studie wird für die Unfallrekonstruktion die Simulationssoftware PC-Crash verwendet. Fußgänger können hier als Mehrkörper-Systeme angenähert und konfiguriert werden.

In PC Crash können Fahrzeuge aller Marken und Typen aus der integrierten Datenbank ausgelesen werden. Informationen wie beispielsweise Länge, Breite, Höhe, Masse, Spurweite sowie auch Informationen zur Position des Schwerpunktes oder zur Federung des Fahrzeugs sind vorliegend. Diese Parameter können gegebenenfalls individuell angeglichen werden, etwa bei Zuladung etc. Um realistische Darstellungen zu gewährleisten, ist es notwendig Straßenabschnitte sorgfältig und detailliert nachzustellen, sei es durch Fahrbahnneigungen, Verengungen, Böschungen oder natürlich durch Variation des Reibkoeffizienten zwischen Fahrbahn und Fahrzeug (trocken, nass, Ölsuren usw.). Wichtig und in dieser kurzen Übersicht noch zu erwähnen ist die Wahl und Verknüpfung der möglichen Fahrmanöver (in PC Crash als Sequenzen bezeichnet), sprich Brems- und Beschleunigungsvorgänge, Reaktionszeiten und ähnliche, welche gestützt auf den Gerichtsakt zu variieren und anzupassen sind.

4.1.2 Das Multibody Modell in PC-Crash

Für die Betrachtung von Fahrzeug-Fahrzeug Kollisionen oder bei Unfallsimulationen eines Fahrzeugs gegen ein starres Hindernis ist die Rekonstruktion mithilfe von Starrkörpermodellen ausreichend. Bei der Betrachtung von Fußgängerunfällen und deren komplexer Bewegungsdynamik ist dies unzureichend. Um realistische Ergebnisse und Bewegungsabläufe zu erhalten ist es erforderlich den Fußgänger als Mehrkörpersystem (MKS) zu modellieren. Durch diese Art der Modellierung besteht auch die Möglichkeit Verletzungen des Fußgängers den entstandenen Schadensbereichen am Fahrzeug zuzuordnen.

Die Modellierung des Fußgängers als MKS erfolgt durch 20 separate Körper, wie etwa den Kopf, den Oberschenkel, das Becken oder den Torso des menschlichen Körpers, die als Ellipsoid dargestellt werden. Diesen Formen sind jeweils spezifische Eigenschaften wie Form, Masse, Kontaktsteifigkeit oder Reibungskoeffizient zugeordnet. Die Ellipsoide sind mit insgesamt 19 Gelenken sehr realitätsgetreu in Form von z.B. Kugelgelenken für die Hüfte oder mit Scharniergelenken für das Knie miteinander verbunden (siehe Abbildung 30). [38]

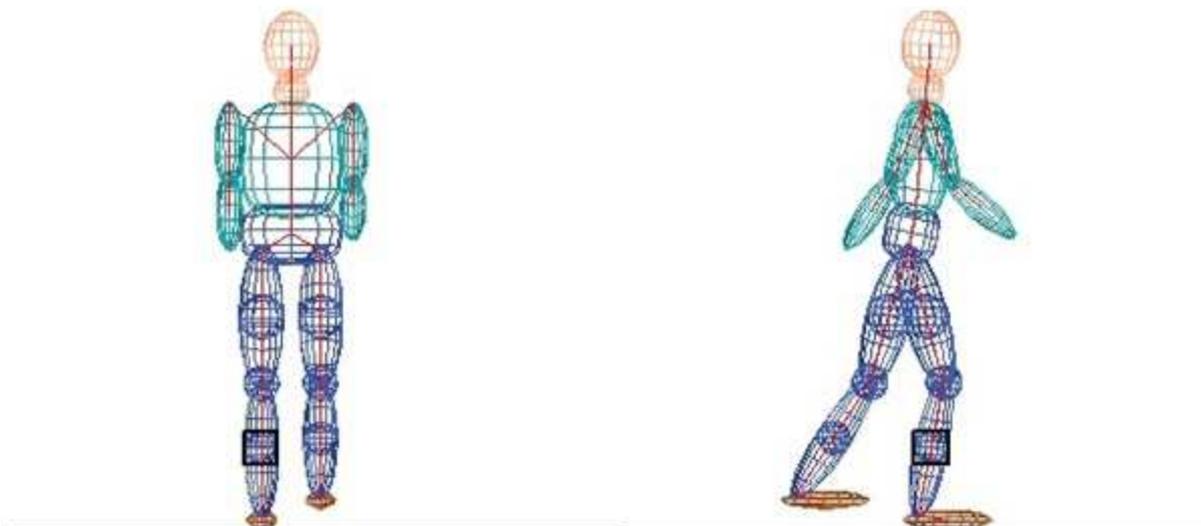


Abbildung 30: Multibody-Modell; ellipsoider Körperaufbau in PC-Crash

Durch Eingabe von Alter, Körpergröße und Gewicht des betroffenen Fußgängers können die jeweiligen anthropometrischen Daten des MKS angepasst werden. Die Angabe des Alters ist etwa notwendig um die eingegebenen Variablen Gewicht und Größe des Fußgängers realitätsgetreu auf die einzelnen modellierten Körper übertragen zu können. Ebenso kann damit das Trägheitsmoment der einzelnen Körper angepasst werden. Grundlage dieser Verteilung von Gewicht und Größe bildet eine Studie mit dem Titel „Internationaler Anthropometrischer Datenatlas“ [39]. Sofern allerdings genaue Daten aus der Unfalldokumentation vorliegen, können diese einfach in das Modell eingetragen werden.

4.1.3 Das Fahrzeugmodell zur Simulation mit Multibody-Modellen

Für die Mehrkörpersystem-Simulation eines Fußgängerunfalls mit Fahrzeugkontakt ist es wichtig, eine möglichst exakte Fahrzeugkontur zu verwenden damit eine realitätsnahe Kinematik zum Fußgängerunfall in der Rekonstruktion realisiert werden kann. In der PC-Crash Datenbank stehen speziell für Kontaktberechnungen bei Kollisionen mit Mehrkörpersystemen 3D-DXF-Modelle zur Verfügung, diese bestehen aus einem Netz das die Oberfläche des jeweiligen Fahrzeugs wiedergibt. Das Netz ist mit dreieckigen Polygonen aufgebaut. Bei der Fußgänger-Fahrzeug Kollision wird davon ausgegangen, dass sich der Kontaktpunkt am Fahrzeug auf der Oberfläche der Fahrzeugebene befindet. Die Fahrzeugdeformation ist bei Fußgängerunfällen im Vergleich zu Fahrzeug-Fahrzeug Unfällen gering und wird nicht berücksichtigt.

Für Fahrzeug-Fahrzeug Kollisionen besteht eine Möglichkeit darin, die beteiligten Fahrzeuge nach ihren Deformationen zu betrachten. Die bei der Kollision entstandene Schadenslinie kann in PC-Crash eingezeichnet werden und die Fahrzeuge werden in weiterer Folge im Rekonstruktionsprogramm den aufgenommenen Daten des Realunfalls und der Schadenslinie entsprechend ineinander geschoben. Der Angriffspunkt der resultierenden Stoßkraft kann so abgeschätzt werden. Eine detaillierte Darstellung der Fahrzeugoberfläche ist hier nicht notwendig.

4.1.4 Beispielhafte Darstellung eines Realunfalls

In folgendem Beispiel zur Realunfallrekonstruktion handelt es sich um eine Fußgänger-PKW Kollision, bei welcher eine 20-jährige Frau frontal von einem Kombi Kraftwagen des Typs Audi A6, Baujahr 2003 erfasst wurde. Die verunglückte Frau erlitt dabei unter anderem schwere Kopfverletzungen sowie Frakturen des Beckens und der unteren Extremitäten. Sie erlag ihren schweren Verletzungen einen Tag später im Krankenhaus. Aus der dokumentierten Unfallaufnahme können folgende Informationen zum Unfall entnommen werden:

Die Unfallstelle befand sich in einem gerade verlaufenden Straßenabschnitt, an welchem ein Tempolimit von 60 km/h galt. Zum Zeitpunkt der Kollision herrschte bereits Dunkelheit, die Straßenbeleuchtung war aktiviert, es herrschte aufgelockerter Kolonnenverkehr. Die Fahrbahn war trocken, am Unfallfahrzeug war das Abblendlicht eingeschaltet. Auf Höhe der Kollisionsstelle befand sich weiters eine Bushaltestelle, in welche ein Linienbus kurz vor dem Unfall eingefahren war. Die Bushaltestelle war nicht gesondert beleuchtet.

Die beschuldigte Fahrzeuglenkerin gab während der Einvernahme zu Protokoll, dass sie kurz vor der Kollision einen „Schatten“ von links nach rechts über die Fahrbahn laufen sah, sie leitete sofort eine Vollbremsung ein, konnte eine Kollision aber nicht mehr vermeiden. Die gefahrene Geschwindigkeit gab sie mit etwa 50 km/h an. Ein durchgeführter Alkomattest verlief negativ, weitere die Fahrtüchtigkeit beeinflussende Substanzen konnten ebenfalls nicht nachgewiesen werden. Der Buslenker, welcher kurz zuvor in die Bushaltestelle eingefahren war, konnte den Unfall nicht direkt beobachten und gab lediglich zu Protokoll ein lautes Anprallgeräusch vernommen zu haben, als er seinen Blick Richtung Fahrbahn lenkte, sah er

nur mehr den Körper der verunglückten Fußgängerin durch die Luft wirbeln. Weitere direkte Zeugen des Unfalls konnten nicht ausfindig gemacht werden.

Die Unfallstelle wurden von den anwesenden Beamten vermessen, Lichtbilder wurden angefertigt sowie eine photogrammetrische Skizze erstellt. Abbildung 31 zeigt Aufnahmen von der Unfallstelle, erstellt am darauffolgenden Tag. Links ist die Unfallstelle entgegen der Fahrtrichtung des beteiligten Fahrzeugs zu sehen, die Endlage der getöteten Fußgängerin befand sich etwa in Höhe der Beamten. Rechts zeigt das Bild das gegenüberliegende Bus-Wartehäuschen, von dort weg versuchte die junge Frau, die Straße im rechten Winkel zu überqueren. Bremsspuren oder ähnliche Spurenzeichnungen konnten von den erhebenden Beamten nicht festgestellt werden. Eine photogrammetrische Skizze wurde trotzdem erstellt, in dieser sind die Endlagen von Fußgänger und dem Unfallfahrzeug maßstabsgetreu eingezeichnet.



Abbildung 31: Bilder der Unfallstelle

Nach dem Laden des Unfallfahrzeugs aus der PC-Crash Fahrzeugdatenbank, wird mit der Modellierung des Fußgängers als Mehrkörpersystem begonnen. Größe, Gewicht, Gehgeschwindigkeit und Körperhaltung stellen dabei einen wichtigen Einflussfaktor dar. In diesem Beispiel handelt es sich um eine 20 Jährige Fußgängerin mit einer Körpergröße von etwa 179 cm und ca. 68 kg. Sie bewegte sich aus der Sicht des Fahrzeuglenkers von links nach rechts und wurde somit zuerst an ihrer rechten Körperseite erfasst. Aus detaillierten Erhebungen der Polizei geht hervor, dass sich die junge Frau zum Unfallzeitpunkt auf dem Nachhauseweg von der Arbeit befand. Dazu benützte sie immer jenen Bus, welcher sich bereits in der gegenüberliegenden Haltestelle befand. Um diesen noch zu erreichen lief die Frau vermutlich ohne ausreichend auf den Verkehr zu achten über die Straße und wurde von dem herannahenden Kombi erfasst.

Aus geschlechterabhängigen Untersuchungen der Bewegungsgeschwindigkeiten nicht motorisierter Verkehrsteilnehmer, durchgeführt von Eberhardt und Himbert [40] geht hervor dass sich Frauen im Alter zwischen 15 und 20 Jahren mit einer durchschnittlichen Gehgeschwindigkeit von 5,2 km/h fortbewegen (Tabelle 5). Schnell gehen wird mit einer Geschwindigkeit von 8,5 km/h in Verbindung gebracht. Unter dem Terminus Laufen versteht man normales Dauerlaufen (13,3 km/h) und unter dem Begriff Rennen versteht man die schnellstmögliche Bewegungsart (22,0 km/h). Geht man nun von der Annahme aus, dass die

junge Frau über die Straße gelaufen sei, um ihren Bus noch zu erreichen, kann als erste Abschätzung eine Fortbewegungsgeschwindigkeit von etwa 13 km/h für die Rekonstruktion angegeben werden.

Tabelle 5: Bewegungsgeschwindigkeit in km/h nach Eberhardt und Himbert [40]

Alter [Jahre]	Frauen				Männer			
	gehen	schnell gehen	laufen	rennen	gehen	schnell gehen	laufen	rennen
14-15	5,8	6,8	11,5	17,3	6,5	8,6	14,4	19,3
15-20	5,2	8,5	13,3	20,9	5,8	8,3	10,8	27,7
20-30	5,0	8,3	14,4	22,0	6,1	8,3	14,4	26,5
30-40	4,7	7,9	13,3	20,5	5,4	7,9	15,1	24,1
40-50	4,3	7,2	12,6	18,9	5,4	7,2	13,7	20,2

Bei tödlichen Verkehrsunfällen mit Fußgängern wird in der Regel eine Obduktion durchgeführt. Durch die daraus detailliert erfassten Verletzungen kann unter anderem erkannt werden, welches Bein zum Zeitpunkt des Erstkontakts belastet war. Häufig treten bei Fußgänger–Fahrzeugunfällen sogenannte „Messerer-Keilbrüche“ des Schien- oder Wadenbeins auf. Die Basis des keilförmigen Bruchstücks liegt immer auf der Seite des Knochens, aus der die Gewalt kam und betrifft das Standbein.

Ebenso können durch Abriebspuren an der Schuhsohle Rückschlüsse auf das belastete Bein gezogen werden. Am stärksten sind diese Abriebspuren an jener Schuhsohle zu erkennen welche zum Zeitpunkt des Erstkontakts den festesten Bodenkontakt hatte, also dem Standbein. Die Seite der Sohle, welche die Riefen und Abtragungen an der Sohlenkante aufweist, war zum Zeitpunkt der Kollision dem Fahrzeug abgewandt. Ursache für diese Spurenzeichnung ist, dass der Bereich des Beines, welcher sich unterhalb der Anstoßstelle befindet, durch die Reibungshaftung zwischen Schuhsohle und Fahrbahnbelag zunächst nicht beschleunigt wird. Er wird unter die Stoßstange gedrückt, während der Körperbereich zwischen Anstoßstelle und Körperschwerpunkt durch die Fahrzeugbewegung nach vorne in Fahrtrichtung beschleunigt wird. Kurz darauf wird auch der Fuß und der Unterschenkel beschleunigt, die Haftung reißt ab. Die Schuhsohle reibt über die Fahrbahnoberfläche. Dabei hebt sich der Schuh von der fahrzeugzugewandten Seite ab und klappt in Fahrtrichtung um. Der Schuh kann sich durch diesen Umstand auch vom Fuß lösen und weit von der Unfallstelle entfernt zum Liegen kommen. [17]

Auf eine Obduktion wurde im Zusammenhang mit diesem Unfall allerdings verzichtet, Informationen bezüglich des Schuhwerks finden sich im Gerichtsakt des Verkehrsunfalls ebenfalls nicht. Somit muss eine Annahme zum Standbein getroffen werden, welche gestützt auf die Verletzungsanzeige erfolgt. In der Verletzungsanzeige ist festgehalten, dass die verunglückte Person rechtsseitig einen Unterschenkelbruch erlitt, am linken Unterschenkel konnten lediglich Prellungen festgestellt werden. Unter Zuhilfenahme der oben angeführten kinematischen Detailbetrachtung, deutet dieser Umstand darauf hin, dass zum Zeitpunkt des

Erstkontakts das rechte Bein belastet war (Abbildung 32). Die Körperhaltung wurde gestützt auf einer Studie von Costing D. Untaroiu [41] gewählt und in weiterer Folge den Unfallgegebenheiten angepasst. Eine Darstellung der iterativ angenäherten Körperhaltung der Fußgängerin ist in Abbildung 30 dargestellt.



Abbildung 32: Fahrzeug-Fußgänger Erstkontakt, Standbein rechts

Mithilfe der am Unfallfahrzeug dokumentierten Schäden, können diese den verletzen Körperregionen des Fußgängers zugeteilt werden. Der Erstkontakt des Oberschenkels mit dem Fahrzeug fand mittig an der Fronthaubenkante statt (Abbildung 33). In weiterer Folge wickelte sich die Kontur des Fußgängers auf der Motorhaube bis zur Windschutzscheibe hin ab. Am Unfallbild der Polizei sind deutlich die Eindellungen, hervorgerufen durch das Auftreffen des Oberschenkels und der Hüfte an der Motorhaube sichtbar. In der Rekonstruktion wird nun darauf geachtet, dass eben dieser Kontakt, beispielsweise durch Variation der Anprallgeschwindigkeit, auch abgebildet wird (Abbildung 33). In der Verletzungsanzeige ist angeführt das die junge Frau rechtsseitig eine Fraktur der Schambeinäste superior und inferior erlitt, sowie eine Fraktur des Kreuzbeins lateral rechts. Die Frakturen der Schambeinäste sind zu erklären durch die Krafteinwirkung auf den proximalen Teil des Oberschenkels über die Hüftgelenkspfanne und die Transferierung auf die Schambeinäste. Die laterale Fraktur des Kreuzbeins kann dem Aufschlage der Hüfte auf die Motorhaube selbst zugeordnet werden. Über die sehr kräftig ausgebildete Struktur des Darmbeins erfolgte eine gerade Kraftleitung weiter über das Iliosakralgelenk auf das Kreuzbein, welches dadurch angeführte Fraktur erlitt.

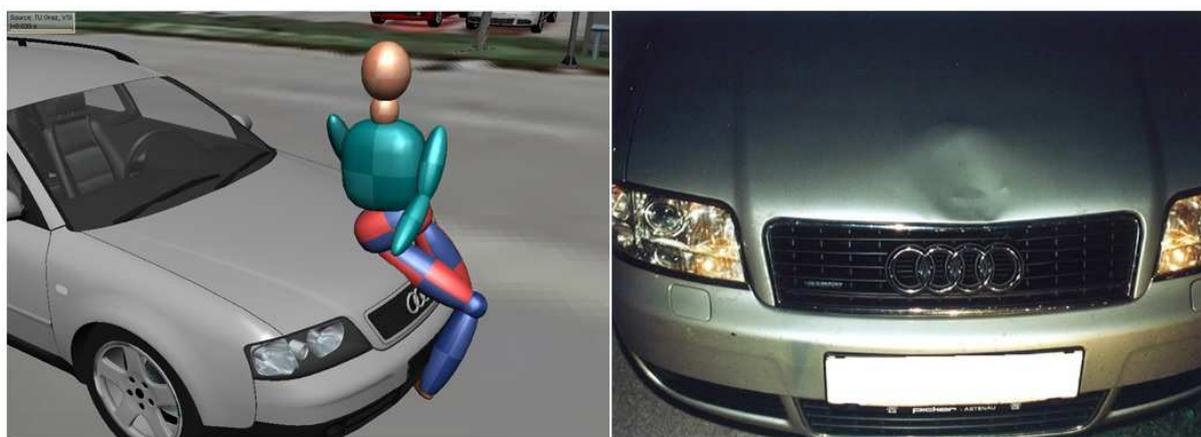


Abbildung 33: Hüftanprall rekonstruiert in PC-Crash und original Polizeifoto der Verformung am Fahrzeug

Nach dem Anprall der Hüfte auf die Motorhaube rotiert der Körper weiter um seinen Schwerpunkt, beeinflusst durch die Fronthaubenkante. Der Kopf schlägt dabei auf der Windschutzscheibe in Höhe der Scheibenwischer auf (Abbildung 34). Dem Kopfanprall an die Windschutzscheibe, sind ein offener Schädelbasisbruch und eine Subduralblutung, dokumentiert in der Verletzungsanzeige, zuzuordnen.

Um den auf den Lichtbildern von der Polizei festgehaltenen Beulenversatz zu realisieren und gleichzeitig die erforderliche Querwurfweite und Längswurfweite, welche in der Verkehrsunfallanzeige dokumentiert wurde, einzuhalten, wurde die Bewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers auf 11 km/h reduziert. Die Anprallgeschwindigkeit des Fahrzeugs konnte durch die Rekonstruktion auf etwa 59 km/h berechnet werden.



Abbildung 34: Kopfanprall rekonstruiert in PC-Crash und original Polizeifoto der Verformung am Fahrzeug

Die zulässige Geschwindigkeit auf dem befahrenen Straßenabschnitt betrug 60 km/h. Unter Berücksichtigung der noch erfolgten Teilbremsung mit ca. $5,0 \text{ m/s}^2$, kann dem Unfallfahrzeug eine Ausgangsgeschwindigkeit von etwa 64 km/h unterstellt werden. Die Unfalllenkerin gab zwar an, eine Vollbremsung eingeleitet zu haben, Bremsspuren am Asphalt konnten aber nicht festgestellt werden. Somit wurde der Fahrzeuglenkerin eine Teilbremsung des Fahrzeugs zugutegehalten werden. Den weiteren Angaben der Fahrzeuglenkerin zufolge konzentrierte diese sich zum Zeitpunkt des Unfalls auf den rechts in die Haltebucht einfahrenden Linienbus und wählte zudem einen größtmöglichen seitlichen Abstand zu diesem.

Unter Berücksichtigung dieser Tatsachen, kann neben der Reaktionszeit von 0,80 Sekunden auch eine Blickzuwendungszeit von 0,50 Sekunden berücksichtigt werden. Diese Blickzuwendungszeit entspricht jener Zeit die zwischen der peripheren Wahrnehmung und der Objektfixierung vergeht [42]. Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass es zum Unfallzeitpunkt bereits dunkel war (bei eingeschalteter Straßenbeleuchtung) und die Fußgängerin dunkel gekleidet war. Eine Reaktionsverspätung kann nicht nachgewiesen werden.

5. STATISTISCHE TESTMETHODIK

Dieses Kapitel beinhaltet die Beschreibung statistischer Methoden, welche zur Aufbereitung, Darstellung und Interpretation der gesammelten Daten verwendet wurden. Es werden Grundbegriffe der deskriptiven und induktiven Statistik erklärt, die angewendeten Verfahren, Verteilungen, Signifikanztests und die aufgestellten Hypothesen erläutert und beschrieben. Eine tabellarische Auflistung der verwendeten statistischen Methoden bezogen auf die jeweiligen Fragestellungen in Kapitel 7 „Ergebnisse und Diskussion“ ist dem Anhang angeheftet.

5.1 Grundbegriffe der Statistik [43]

Die Statistik als Wissenschaft hat wie jede andere Wissenschaft auch ihre eigene Terminologie. Um Rahmen, Ziel und Ergebnisse von statistischen Untersuchungen unmissverständlich zu beschreiben, sind klare und einheitliche Begriffe nötig. Die für diese Arbeit notwendigen Begriffsbestimmungen und Abgrenzungen sind nachstehend erklärt.

5.1.1 Grundgesamtheit und Stichprobe

In der Statistik wird als Grundgesamtheit die Anzahl der statistischen Einheiten, zu denen eine Aussage getroffen werden soll, bezeichnet. In dieser Arbeit wird als Grundgesamtheit die Anzahl von Verletzungen nach deren Art verstanden, die ein Fußgänger bei einem Verkehrsunfall (mit Bedacht auf die festgelegten Einschränkungen) in Deutschland, Frankreich oder Österreich erlitt.

Um von einer Vollerhebung sprechen zu können müssten alle Fahrzeug-Fußgängerunfälle untersucht werden und die dabei verursachten Verletzungen bezogen auf den definierten Erhebungsraum dokumentiert werden. Die in dieser Arbeit berücksichtigten Fälle stellen Stichproben bzw. Teilerhebungen dar. Als Stichprobe bezeichnet man somit eine Teilmenge einer Grundgesamtheit welche durch bestimmte Auswahlverfahren und Kriterien ausgewählt wurde.

5.1.2 Merkmale und Merkmalsausprägungen

Eigenschaften und Daten, also Merkmale eines Fußgänger-Fahrzeugunfalls können sich einerseits auf die dokumentierte Verletzung (Verletzungsschwere nach AIS, Position des Fußgängers zum Zeitpunkt des Unfalls, ...), oder andererseits auf das unfallbeteiligte Fahrzeug beziehen (Stoßstangenhöhe, Art des Fahrzeugs, Zeitpunkt der Markteinführung, ...).

Diese Merkmale lassen sich nach verschiedenen Kriterien klassifizieren. Ein Einteilungskriterium kann etwa die Anzahl der möglichen Ausprägungen darstellen, man unterscheidet hier zwischen diskreten und stetigen Merkmalen.

- Diskrete Merkmale

„Ein diskretes Merkmal ist ein Merkmal, das nur endlich viele Ausprägungen oder aber höchstens abzählbar viele Ausprägungen annehmen kann“ [43]. Die Art und somit Kategorie des Unfallfahrzeugs oder die Codierung der erlittenen Verletzungen des Fußgängers nach AIS stellen diskrete Merkmale dar.

- Stetige Merkmale

Ein stetiges Merkmal ist dadurch gekennzeichnet, dass die Ausprägung ein Intervall bildet. Es können somit mehr als abzählbare, unendlich viele mögliche Ausprägungen vorkommen, oder zumindest denkbar sein. Die Anprallgeschwindigkeit des Fahrzeugs an den Fußgänger, oder dessen Körpergröße und Körpergewicht sind grundsätzlich stetige Merkmale. [44]

Eine weitere Möglichkeit stellt die Merkmalsklassifizierung nach der Art der verwendeten Messskalen dar. Drei Skalenniveaus können hierbei unterschieden werden: die Nominalskala, die Ordinalskala sowie die metrische Skala.

- Nominalskala

Eine Nominalskala ist eine Messskala bei der die Ausprägungen eines Merkmals lediglich auf (Un-) Gleichheit überprüft werden können. Namen oder Kategorien (Fahrzeugtyp, Verletzte Körperregion) seien als Beispiele genannt. Für nominalskalierte Daten gibt es keine Rangordnung. Eine Bildung von Differenzen oder Quotienten ist bei Daten dieser Art somit nicht sinnvoll.

- Ordinalskala

Ordinalskalierte Daten unterliegen einer natürlichen Rangordnung, eine Bildung von Differenzen oder Quotienten ist aber ebenfalls nicht sinnvoll. Ein Beispiel dafür stellt die Einteilung der Verletzungsschwere nach AIS dar. Die Einteilung erfolgt von 1 (leichte Verletzung) bis 6 (tödliche Verletzung). Eine Rangordnung ist hier zwar gegeben, aber die Abstände zwischen den jeweiligen Stufen sind nicht direkt vergleichbar.

- Metrische Skala

Handelt es sich um metrische Skalen, können auch Abstände zwischen den Merkmalsausprägungen sinnvoll interpretiert werden. Existiert ein natürlicher Nullpunkt spricht man von einer Verhältnisskala (Geschwindigkeit in km/h), andernfalls von einer Intervallskala (Temperatur in °C). Als Spezialfall der Verhältnisskala ist die Absolutskala zu sehen, für diese gibt es nicht nur einen natürlichen Nullpunkt, sondern zusätzlich auch eine natürliche Einheit (Temperatur in K).

Die genannten Skalenniveaus stellen eine Hierarchie dar. Die Nominalskala repräsentiert das niedrigste Niveau dieser Reihung und die Verhältnisskala bzw. die Absolutskala als Sonderfall das höchste Niveau (Tabelle 6).

Tabelle 6: Sinnvoll interpretierbare Operationen bei verschiedenen Skalenarten [43]

Skala		sinnvolle Operationen			
		auszählen	ordnen	Differenzen bilden	Quotienten bilden
Nominalskala		ja	nein	nein	nein
Ordinalskala		ja	ja	nein	nein
Metrische Skala	Intervallskala	ja	ja	ja	nein
	Verhältnisskala	ja	ja	ja	ja
	Absolutskala	ja	ja	ja	ja

Möchte man den Typ der Merkmalsausprägung klassifizieren, ist eine Einteilung in qualitative Merkmale oder quantitative Merkmale zielführend. Qualitative Merkmale sind etwa Kategorien (Fahrzeugarten, Fahrzeugteile der Frontstruktur), quantitative Merkmale sind hingegen Zahlen wie die Anprallgeschwindigkeit des Fahrzeugs gegen den Fußgänger, oder die Höhe der Fronthaubenkante des Unfallfahrzeugs.

5.2 Deskriptive Statistik

Ziel der deskriptiven Statistik ist es, wesentliche Eigenheiten eines Untersuchungsgegenstandes zusammenzufassen und in wenigen Maßzahlen bzw. Diagrammen zu beschreiben. Entscheidend ist, dass ausschließlich Aussagen zum Datensatz selbst gemacht werden können. Eine Schlussfolgerung durch Stichproben auf die Grundgesamtheit ist nicht zulässig. [45] [46]

Unter deskriptiver Statistik versteht man laut Definition eine Gruppe statistischer Methoden zur Beschreibung von Daten anhand statistischer Kennwerte, Graphiken, Diagramme und/oder Tabellen. [47]

5.2.1 Häufigkeitsverteilung [43]

Mit Häufigkeitsverteilungen wird dargestellt, wie oft eine bestimmte Merkmalsausprägung in einer Stichprobe auftritt. Aus mathematischer Sicht ist somit eine Häufigkeitsverteilung eine Funktion, welche zu jedem Wert angibt, wie häufig dieser Wert vorgekommen ist. Häufigkeitsverteilungen werden grundsätzlich als Tabellen oder Grafiken dargestellt. Zu unterscheiden sind hierbei absolute Häufigkeitsverteilungen und relative Häufigkeitsverteilungen.

- Absolute Häufigkeit

Absolute Häufigkeiten sind das Ergebnis einfacher Zählungen von Merkmalen.

$h_i = h(a_i)$	Formel 1: absolute Häufigkeit
----------------	-------------------------------

h_i absolute Häufigkeit für die Ausprägung a_i

a_i Merkmalsausprägung

Ein Nachteil von absoluten Häufigkeiten ist, dass diese von der Größe bzw. Länge der Urliste abhängig sind.

- Relative Häufigkeit

Damit Häufigkeiten auch für Datensätze unterschiedlichen Umfangs direkt vergleichbar sind, kann man absolute Häufigkeiten durch den Umfang der Beobachtungsreihe teilen und erhält somit resultierend die relative Häufigkeit.

$f_i = f(a_i) = \frac{h(a_i)}{n}$	Formel 2: relative Häufigkeit
-----------------------------------	-------------------------------

f_i relative Häufigkeit

$h(a_i)$ absolute Häufigkeit für die Ausprägung a_i

a_i Merkmals Ausprägung

5.2.2 Quotenverhältnis oder Odds-Ratio

Das Quotenverhältnis (Odds Ratio: OR) stellt eine statistische Maßzahl dar, welche eine Aussage über die Stärke eines Zusammenhangs von zwei Merkmalen liefert. Häufige Anwendung findet es in medizinischen Studien in Form von Fall-Kontrollstudien, Querschnittsstudien oder Interventionsstudien. [48] In dieser Arbeit wird die Maßzahl verwendet um Verletzungen von bestimmten Körperregionen, erlitten von Fußgängern bei PKW-Kollisionen, mit bestimmten Merkmalen wie Markteinführungsjahr des Unfallfahrzeugs oder dem Typ des Unfallfahrzeugs zu vergleichen. Dadurch kann ein erhöhtes oder verringertes Risiko über die eingeteilten Fahrzeugklassen, oder über die untersuchten Zeitperioden ermittelt werden.

Zur Berechnung des Quotenverhältnisses werden die benötigten Daten, wie in Tabelle 7 dargestellt, in einer Kreuztabelle gesammelt. In weiterer Folge kann nach Formel 3 die Berechnung des Quotenverhältnisses erfolgen.

Tabelle 7: Quotenverhältnis

	Injured Body Region	All other injured Body Regions
Characteristic A	a	b
Characteristic B	c	d

$OR = \frac{a/b}{c/d}$	Formel 3: Odds-Ratio
------------------------	----------------------

Ein Odds-Ratio (OR) von:

- 1 bedeutet gleiches Risiko für Charakteristik A und B
- >1 bedeutet ein höheres Risiko für Charakteristik A
- <1 bedeutet ein geringeres Risiko für Charakteristik A

5.3 Induktive Statistik (Inferenzstatistik)

Die Methode, durch viele Einzelbeobachtungen zu einer allgemeinen Gesetzmäßigkeit zu gelangen, bezeichnet man als Induktion. [45] Somit werden in der induktiven Statistik (schließende Statistik) aus den Daten einer Stichprobe, Eigenschaften einer Grundgesamtheit abgeleitet. Aufgaben der induktiven Statistik sind das Schätzen von Modellparametern und das Testen von Hypothesen. Folgerungen die aus den vorhandenen Daten abgeleitet werden sind dabei mit Unsicherheiten verknüpft (z.B Fehlentscheidungen bei Hypothesentests oder Schätzfehler beim Schätzen von Vergleichsparametern)

5.3.1 Grundbegriffe der induktiven Statistik [43]

- Hypothese

Als Hypothese wird allgemein eine Annahme bezeichnet, die in weiterer Folge mit mathematischen Methoden (Hypothesentests) geprüft wird. In dieser Arbeit wird die Nullhypothese verwendet um auszusagen, dass kein Effekt bzw. Unterschied der verglichenen Werte vorliegt, oder ein bestimmter Zusammenhang nicht besteht. Kann diese Hypothese verworfen werden, tritt die Alternativhypothese in Kraft. Kann die Nullhypothese allerdings nicht verworfen werden und die Alternativhypothese somit nicht in Kraft treten, bedeutet das

nicht, dass die Nullhypothese als erwiesen gilt (vgl. Kapitel 5.3.4 Hypothesen zum Mittelwertvergleich).

- Fehler 1. Art und Fehler 2. Art

Das Testen von Hypothesen beinhaltet immer eine gewisse Irrtumswahrscheinlichkeit. Neben korrekten Entscheidungen gibt es auch zwei unterschiedliche Arten von möglichen Fehlern: [49] [50]

Als Fehler 1. Art, auch α -Fehler genannt, wird jener Sachverhalt bezeichnet, wenn die statistische Nullhypothese fälschlicherweise abgelehnt wird.

Als Fehler 2. Art, auch β -Fehler genannt, wird hingegen jener Umstand bezeichnet, wenn die statistische Nullhypothese fälschlicherweise angenommen wird.

Tabelle 8: Entscheidungstabelle zum Hypothesentest

	H0 wahr	H0 falsch
H0 annehmen	korrekt entschieden ($1-\alpha$)	Fehler 2. Art (β -Fehler)
H0 verwerfen	Fehler 1. Art (α -Fehler)	korrekt entschieden ($1-\beta$)

- Statistische Signifikanz

In der induktiven Statistik wird von Signifikanz gesprochen wenn Unterschiede zwischen Messgrößen oder Variablen beurteilt werden sollen. Ein signifikanter Unterschied bedeutet somit, dass die Wahrscheinlichkeit, dass der festgestellte Unterschied durch Zufall zustande gekommen ist, nicht über einer gewissen Schwelle liegt (Signifikanzniveau). Das Signifikanzniveau gibt somit an, wie hoch das Risiko ist eine Falsche Entscheidung oder Aussage zu treffen. [51] In dieser Arbeit wird ein Signifikanzniveau von 5% gewählt, oder anders formuliert, mit einem Vertrauensniveau von 95% gearbeitet. Das heißt ein Fehler erster Art wird bei 5 aus 100 Fällen toleriert.

- Kennwerte

Nachfolgend aufgelistete Kennwerte sind für die in weiterer Folge beschriebenen Verteilungsfunktionen und die verwendeten Berechnungsmethoden notwendig.

- Mittelwert (\bar{X}):

Der Mittelwert einer Variable x ist ein Kennwert, der die Lage der Verteilung von Messwerten auf ihrer Skala beschreibt.

$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$	Formel 4: Mittelwert
--	----------------------

X_i Wert des i -ten Merkmalsträgers in der Datenreihe

n Größe der Stichprobe bzw. Anzahl der Merkmalsträger

- Erwartungswert:

Wiederholt man einen Versuch unendlich oft, ist der Durchschnittswert einer diskreten Zufallsvariable der Mittelwert der Ergebnisse des Versuchs. Diesen Mittelwert bezeichnet man als den zu erwartenden Wert (Erwartungswert).

- Varianz (S^2):

Die Varianz ist ein Kennwert, der die Breite der Verteilung von Daten auf ihrer Skala beschreibt

$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$	Formel 5: Varianz
--	-------------------

X_i Wert des i -ten Merkmalsträgers in der Datenreihe

\bar{X} Mittelwert aller Merkmalsträger

n Größe der Stichprobe bzw. Anzahl der Merkmalsträger

- Standardabweichung (σ)

Die Standardabweichung ist die Wurzel der Varianz und beschreibt die Breite der Datenverteilung

$\sigma = \sqrt{S^2}$	Formel 6: Standardabweichung
-----------------------	------------------------------

S^2 Varianz

5.3.2 Stetige Verteilungsfunktionen [43]

Der Begriff Verteilung wird in der Statistik grundsätzlich als Kurzform für die Wahrscheinlichkeitsverteilung verwendet und bildet sozusagen das Pendant zur Häufigkeitsverteilung in der deskriptiven Statistik. Man unterscheidet zwischen diskreter Verteilung (Binomialverteilung, Geometrische Verteilung, Poisson-Verteilung etc.) und stetiger Verteilung (Normalverteilung, Exponentialverteilung, Studentische t-Verteilung etc.). Die in dieser Arbeit verwendeten Verteilungsfunktionen werden nachstehend beschrieben.

- Normalverteilung

Die Normalverteilung, oder auch Gauß-Verteilung genannt, wird häufig zur Modellierung von Zufallsvorgängen eingesetzt, bei welchen mehrere zufällige Einflussgrößen zusammenwirken, etwa bei der industriellen Überwachung von Serienfertigungen. Einkommen, Körpergröße oder Gewicht sind ebenfalls Parameter, welchen eine Normalverteilung zugrunde liegt. [52]

- Dichtefunktion der Normalverteilung

Die Dichtefunktion der Normalverteilung bezeichnet man als Gauß'sche Glockenkurve und ist nachstehend charakterisiert.

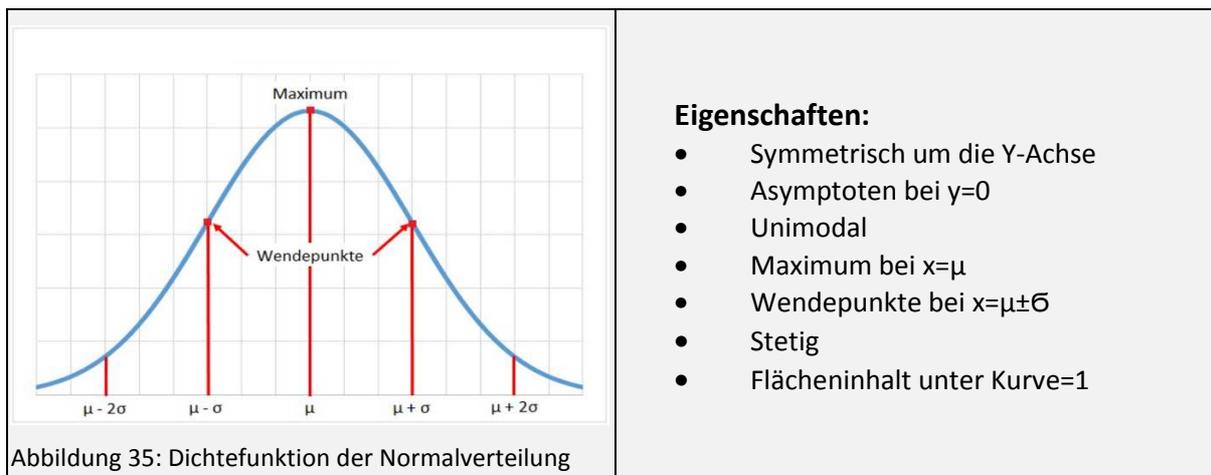


Abbildung 35: Dichtefunktion der Normalverteilung

$$f(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Formel 7: Dichtefunktion der Normalverteilung

Das Aussehen und die Eigenschaften der Normalverteilung werden durch zwei Parameter bestimmt:

1. Dem Erwartungswert μ , dieser legt fest, an welcher Stelle die Normalverteilung ihr Maximum hat.
2. Der Standardabweichung σ , sie bestimmt die Form der Normalverteilungskurve.

Als Sonderform der Normalverteilung sei an dieser Stelle noch die standardisierte Normalverteilung, kurz Standardnormalverteilung oder u-Verteilung genannt, erwähnt. Sie stellt eine Normalverteilung mit den Parametern $\mu=0$ und $\sigma=1$ dar. Jede Normalverteilung kann durch Transformation in eine Standardnormalverteilung übergeführt werden. [53]

$$G(x; \mu, \sigma) = G(u) \text{ mit } u = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Formel 8: Standardisierungsformel

Durch diese Standardisierung braucht nur eine Berechnungsmöglichkeit für $G(u)$, beispielsweise in Form einer u-Tabelle geschaffen werden und stellt somit eine Erleichterung des Rechengangs dar.

- Verteilungsfunktion der Normalverteilung

Die Verteilungsfunktion der Normalverteilung beschreibt die eingeschlossene Fläche unter der Normalverteilungsfunktion.

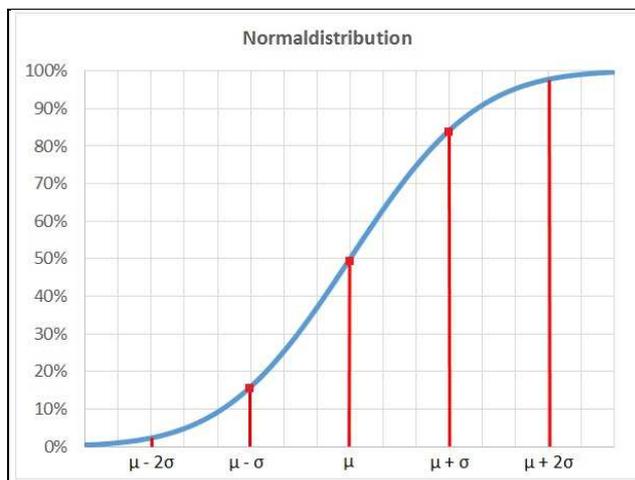


Abbildung 36: Verteilungsfunktion der Normalverteilung

Eigenschaften:

- Monoton wachsender S-förmiger Verlauf
- Asymptoten bei x geht gegen $-\infty$ bei x geht gegen $+\infty$

$$F(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt$$

Formel 9: Verteilungsfunktion

μ ... Erwartungswert

σ^2 ...Varianz

Die Normalverteilung kann verwendet werden, wenn die eigentliche, den Daten zugrunde liegende Verteilungsfunktion unbekannt ist, was aus dem zentralen Grenzwertsatz ableitbar ist.

- Der zentrale Grenzwertsatz

Der zentrale Grenzwertsatz besagt, dass der Durchschnitt einer großen Anzahl an beobachteten Zufallsvariablen, die aus derselben Verteilung gezogen wurden, annähernd normalverteilt sein werden, unabhängig von der Verteilungsfunktion aus der sie herausgenommen wurden. Zieht man eine ausreichend große Stichprobe aus einer Grundgesamtheit, so wird der Mittelwert der Stichprobe näherungsweise dem Mittelwert der Grundgesamtheit entsprechen. Zusätzlich werden alle Stichproben annähernd normalverteilt sein. [43]

Damit der zentrale Grenzwertsatz zur Anwendung kommen kann, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein: [54]

- n sollte mindestens 30 sein, damit die Summenformel als so gut wie normalverteilt angesehen werden kann.
- Der Verteilungstyp muss nicht bekannt sein, die Zufallsvariablen müssen nicht symmetrisch verteilt sein, allerdings muss eine Varianz existieren und die Verteilung darf nicht absurd sein, etwa einer Arcustangensverteilung folgen.
- Die Stichprobenvariablen müssen voneinander nicht stochastisch unabhängig sein.
- Ein Spezialfall tritt ein, wenn die Grundgesamtheit aus der gezogen wird, normalverteilt ist. Das heißt es liegt keine approximative, sondern eine genaue Normalverteilung vor. Die Stichprobe kann in diesem Fall auch von kleinerem Umfang sein.

- Studentsche t-Verteilung

Die t-Verteilung ist von der Normalverteilung abgeleitet und wird angewendet für Konfidenzschätzungen zum Erwartungswert μ , wenn die Standardabweichung σ der Grundgesamtheit unbekannt ist. Die Stichproben müssen zufällig entnommen worden sein und die Grundgesamtheit der Daten, aus der die Stichprobe entnommen wurde, muss normalverteilt oder annähernd normalverteilt sein oder die Stichprobe muss mindestens 30 Messdaten umfassen (zentraler Grenzwertsatz). [55]

Die Funktion der t-Verteilung ist lediglich vom Student-t-Wert selbst und der Anzahl der Freiheitsgrade abhängig (Formel 10). Der t-Wert ist je nach Testmethodik unterschiedlich zu berechnen und ist nachstehend für den Zweistichproben-t-Test für unabhängige Stichproben angeführt. Die Anzahl der Freiheitsgrade (df) hängt von der Anzahl an unabhängigen Beobachtungen ab. Der Wert df ist somit die Zahl der Beobachtungen n minus der Zahl der berücksichtigten Parameter.

$f(t, df) = \frac{\int_{x=0}^{\infty} x^{\frac{df+1}{2}-1} e^{-x} dx}{\sqrt{df\pi} \int_{x=0}^{\infty} x^{\frac{df}{2}-1} e^{-x} dx} \left(1 + \frac{x^2}{df}\right)^{\frac{df+1}{2}}$	Formel 10: t-Verteilungsfunktion
--	----------------------------------

df Anzahl der Freiheitsgrade
t Wert der Prüfgröße

$df = n - a$	Formel 11: Anzahl der Freiheitsgrade
--------------	--------------------------------------

- n Anzahl der Beobachtungen
a Anzahl der berücksichtigten Parameter

In ihrem Aussehen ähnelt die t-Verteilung jenem der Standardnormalverteilung. Sie weist ein glockenförmiges Aussehen auf und ist symmetrisch um die Y-Achse. Ebenfalls konvergiert diese Funktion gegen 0, die eingeschlossene Fläche unter der Kurve ist immer 1. Für eine steigende Anzahl von Freiheitsgraden nähert sich die Student-t-Verteilung der Standardnormalverteilung immer näher an. Ab ca. $df = 30$ kann die Student-t-Verteilung bei Bedarf durch die Normalverteilung bzw. Standardnormalverteilung approximiert werden.

Abbildung 37 zeigt eine t-Verteilung mit einmal 5 und einmal 30 Freiheitsgraden im Vergleich zur Kurve der Standardnormalverteilung. Ab einer Anzahl von 30 Freiheitsgraden sind in dieser Grafik keine Unterschiede zwischen t-Verteilung und Standardnormalverteilung mehr zu erkennen. Grundsätzlich kann aber behauptet werden, egal wie groß die Anzahl der Freiheitsgrade ist, die Normalverteilung wird verglichen mit der t-Verteilung um ihren Erwartungswert herum immer einen etwas höheren Funktionswert einnehmen. In den Randregionen der Verteilungen ist das Gegenteil der Fall. Dies bedeutet für Signifikanzprüfungen, dass ein Vertrauensniveau von etwa 5% bei der t-Verteilung erst später erfolgt als bei der Normalverteilung. Diese Unterschiede werden zwar mit steigendem Freiheitsgrad geringer, sind aber dennoch in geringem Ausmaß immer vorhanden. [55]

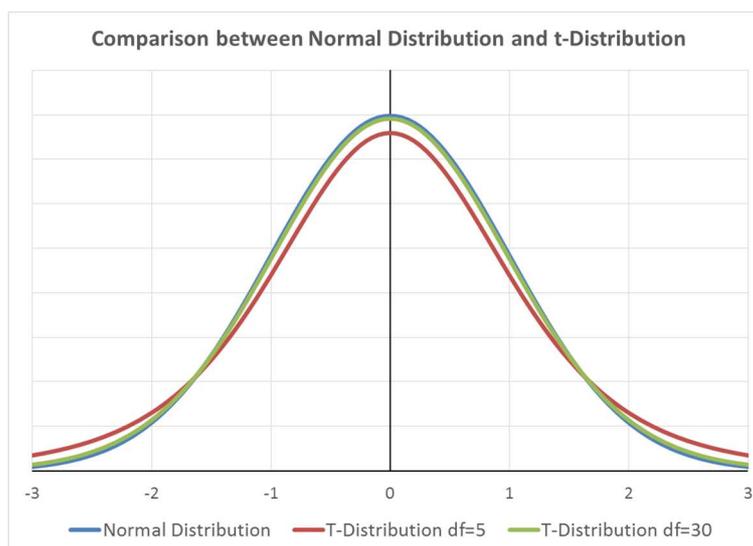


Abbildung 37: Vergleich zwischen standardisierter Normalverteilung und t-Verteilung

5.3.3 Signifikanztests

Hypothesentests gibt es zahlreiche, etwa Tests auf Streuung von Messdaten (F-Test) oder Tests auf Zusammenhangs- und Assoziationsparameter (Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest) oder Tests auf Lageparameter wie Mittelwerte (Zweistichproben-t-Test). Nachstehend sind die gewählten Testmethodiken kurz erläutert.

- Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest

Mithilfe des Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests können Häufigkeiten verglichen werden. Während etwa der t-Test mindestens eine Intervallskala voraussetzt, kann der Chi-Quadrat-Test für nominalskalierte Variablen verwendet werden. Mithilfe dieses Tests kann dann eine Aussage getroffen werden, ob die beobachtete Häufigkeit sich signifikant von den erwarteten unterscheidet.

$X^2 = \sum \frac{(\text{beobachtete Häufigkeit} - \text{erwarteter Häufigkeit})^2}{\text{erwartete Häufigkeit}}$	Formel 12: Chi-Quadrat
---	------------------------

Als Voraussetzung zur Anwendung dieses Tests muss gelten, dass die erwarteten Häufigkeiten jeder Zelle größer als 5 sind. Der nach Formel 12 berechnete Wert wird verglichen mit einem tabellarisch erfassten Wert für X^2 , welcher vom verlangten Signifikanzniveau und der Anzahl der Freiheitsgrade abhängt. [56]

- Fisher-Test

Der Fisher-Test (Exakter Test nach Fisher) wird angewendet, um Häufigkeiten in 2 Gruppen hinsichtlich ihrer Unabhängigkeit voneinander zu testen. Durch diesen Signifikanztest wird nun auch die Überprüfung von 2x2 Kreuztabellen (Kontingenztafel) möglich, bei denen die Stichprobengröße kleiner 5 ist, bzw. wenn es sich um Verteilungen mit hoch ausgeprägter Asymmetrie handelt. Die genannten Eigenschaften unterscheiden den Fisher-Test vom Chi-Quadrat Test. [57] [58]

Tabelle 9: Beispielhafte Kontingenztafel zum Fisher-Test

	Stichprobe 1	Stichprobe 2
Eigenschaft 1	A	B
Eigenschaft 2	C	D

- Student t-Test

Der Student t-Test stellt einen Hypothesentest dar, welcher in seinen drei möglichen Ausprägungen beantwortet, ob sich Stichproben statistisch signifikant von einer bekannten Grundgesamtheit unterscheiden bzw. ob sich zwei Stichproben statistisch signifikant voneinander unterscheiden. Die möglichen Ausprägungen dieses Tests sind der Zweistichproben-t-Test einmal für verbundene Stichproben und einmal für unverbundene Stichproben, sowie der Einstichproben-t-Test. Angewendet werden t-Tests in der Regel um Mittelwerte zweier Gruppen zu vergleichen.

- Einstichproben-t-Test

Der Einstichproben-t-Test wird dort angewendet, wo der Mittelwert einer Stichprobe aus n Messwerten verglichen werden soll mit dem Erwartungswert der Grundgesamtheit aus der gezogen wurde. Diesen Mittelwerten muss als eine Einschränkung eine Intervallskalierung zu Grunde liegen. Der Erwartungswert, der Grundgesamtheit ist allerdings in der Regel nicht bekannt und würde theoretisch eine unendliche Anzahl von Messwerten beinhalten müssen. [55]

- Zweistichproben-t-Test für verbundene Stichproben

Der Zweistichproben-t-Test überprüft die Verschiedenheit der Mittelwerte zweier voneinander abhängiger Stichproben. Dies bedeutet dass die Messwerte x_n und y_n jeweils paarweise verbunden sind, sie werden aus den Messungen an denselben Untersuchungseinheiten gewonnen. Angewendete wird dieses Testverfahren häufig für Vorher–nachher–Vergleiche bei Medikamententests. In dieser Arbeit findet diese Testkonfiguration keine Anwendung und ist daher hier nur vollständigkeitshalber angeführt. [55]

- Zweistichproben t-Test für unverbundene Stichproben

Der Zweistichproben t-Test für unverbundene Stichproben ist ein Signifikanztest und wird verwendet, um zu bestimmen, ob sich Werte zweier Stichproben statistisch signifikant voneinander unterscheiden. In dieser Arbeit wird der t-Test verwendet um den Mittelwert zweier Gruppen zu vergleichen. Durch diesen Test kann geprüft werden, ob die beiden verglichenen Gruppen aus derselben Population stammen, oder aus zwei unterschiedlichen.

Der Vergleichswert für das student's t und die Anzahl der Freiheitsgrade errechnen sich beim Zweistichproben t-test für unverbundene Stichproben und gepoolter Standardabweichung wie folgt:

$t = \sqrt{\frac{n * m}{n + m}} * \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{Sp}$	Formel 13: Student's t
---	------------------------

- n Größe der Stichprobe 1
- m Größe der Stichprobe 2
- \bar{X} Mittelwert der ersten Stichprobe
- \bar{Y} Mittelwert der zweiten Stichprobe
- S_p gepoolte Standardabweichung

- Gepoolte Standardabweichung S_p

Gepoolt bedeutet, dass der Standardfehler der Stichproben zusammen berechnet wird. Spricht man von ungepoolter Standardabweichung, werden die Standardfehler bezüglich der einzelnen Stichproben getrennt berechnet und erst später kombiniert. Diese Variante ist für die Berechnung des Welch-Tests zu wählen (siehe Formel 17).

$S_p = \sqrt{\frac{(n - 1)Sx^2 + (m - 1)Sy^2}{df}}$	Formel 14: gepoolte Standardabweichung
---	--

- n Größe der Stichprobe 1
- m Größe der Stichprobe 2
- Sx^2 Geschätzte Varianz der Stichprobe 1
- Sy^2 Geschätzte Varianz der Stichprobe 2
- df Anzahl der Freiheitsgrade

- Anzahl der Freiheitsgrade df

Beim Zweistichproben t-Test für unverbundene Stichproben und gepoolter Standardabweichung berechnet sich die Anzahl der Freiheitsgrade durch Aufsummierung der Stichprobengröße 1 und der Stichprobengröße 2 verringert um die Anzahl der bekannten Parameter, welche in diesem Testverfahren zwei sind (\bar{X} und \bar{Y}).

$df = n + m - 2$	Formel 15: Freiheitsgrade
------------------	---------------------------

- n Größe der Stichprobe 1
- m Größe der Stichprobe 2

- Welch-Test

Der Welch-Test wird verwendet wenn davon ausgegangen werden muss, dass die beiden verglichenen Stichproben aus unterschiedlichen Populationen stammen ($\sigma_1 \text{ ungleich } \sigma_2$). Diese Situation wird auch als Behrens-Fisher-Problem bezeichnet. Ist dies der Fall, kann der Welch-Test angewendet werden. Ist die geschätzte Varianz einer Stichprobe mindestens doppelt so hoch wie die Varianz der zu vergleichenden Stichprobe, muss der Welch-Test angewendet werden. [59] Die Prüfgröße t folgt beim Welch-Test keiner exakten Verteilung, sie ist approximativ der t -Verteilung angenähert und kann somit im weitesten Sinne dem Kapitel t -Test zugeordnet werden. [60]

- Vergleichswert

Der Vergleichswert für das student's t und die Anzahl der Freiheitsgrade errechnen sich beim Welch-Test für unverbundene Stichproben und ungepoolter Standardabweichung wie folgt:

$t = \frac{\sqrt{\frac{n * m}{n + m}} * (\bar{X} - \bar{Y})}{S_u}$	Formel 16: Student's t nach Welch
--	-----------------------------------

\bar{X} Mittelwert der ersten Stichprobe
 \bar{Y} Mittelwert der zweiten Stichprobe
 S_u ungepoolte Standardabweichung
 n Größe der Stichprobe 1
 m Größe der Stichprobe 2

- Ungepoolte Standardabweichung S_u

$S_u = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$	Formel 17: ungepoolte Standardabweichung
------------------------------	--

S_x^2 Geschätzte Varianz der Stichprobe 1
 S_y^2 Geschätzte Varianz der Stichprobe 2

- Anzahl der Freiheitsgrade

Die Berechnung der Freiheitsgrade stellt sich beim Welch-Test wie folgt dar:

$df = \frac{\left(\frac{Sx^2}{n} + \frac{Sy^2}{m}\right)^2}{\frac{\left(\frac{Sx^2}{n}\right)^2}{n-1} + \frac{\left(\frac{Sy^2}{m}\right)^2}{m-1}}$	Formel 18: Anzahl der Freiheitsgrade
---	--------------------------------------

Sx^2 Geschätzte Varianz der Stichprobe 1

Sy^2 Geschätzte Varianz der Stichprobe 2

n Größe der Stichprobe 1

m Größe der Stichprobe 2

5.3.4 Hypothesen zum Mittelwertvergleich

Die gewählte H_0 Hypothese geht immer davon aus, dass der Unterschied zwischen beiden verglichenen Gruppen so gering ist, dass man davon ausgehen kann, dass beide Gruppen aus derselben Grundgesamtheit stammen (Abbildung 38, $\mu_1 = \mu_2$, Bild A). Die H_1 Hypothese bildet immer das Komplementär zur H_0 Hypothese und sagt aus, dass beide Mittelwerte so verschieden sind, dass sie höchstwahrscheinlich aus unterschiedlichen Populationen stammen (Abbildung 38, $\mu_1 \neq \mu_2$, Bild B). \bar{X} und \bar{Y} stellen die zu vergleichenden Mittelwerte dar.

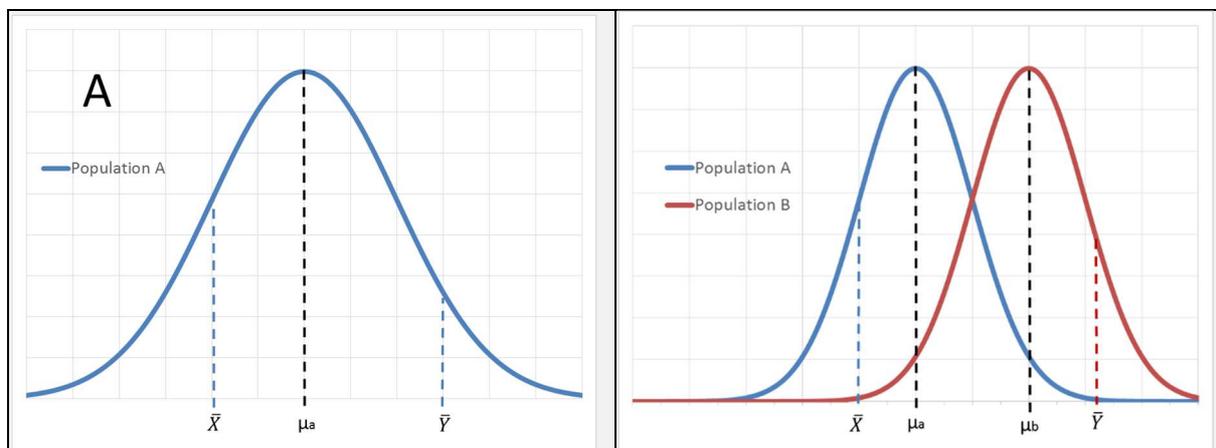


Abbildung 38: Hypothesentest [59]

Die Durchführung der Hypothesentests erfolgt, unabhängig ob für Vergleiche der Mittelwerte nach dem Student t-Test oder des Welch-Tests nach folgendem Schema:

Zur Durchführung des Signifikanztests muss der t-Wert nach Formel 13 oder Formel 16 berechnet werden. Als nächster Schritt folgt die Ermittlung des kritischen t-Werts. Der kritische t-Wert stellt dabei die Grenze dar, nach der entschieden wird, ob die Nullhypothese verworfen werden kann oder nicht. Um diesen zu bestimmen werden die Freiheitsgrade (df) und das Signifikanzniveau α benötigt. α gibt dabei die Sicherheit an (meist in Prozent), mit der

die Vergleichsprüfung stattfinden soll. Der t-Wert ist somit durch das Signifikanzniveau α festgelegt. Wenn der berechnete t-Wert weiter von Null entfernt ist als der kritische t-Wert, wird die Nullhypothese abgelehnt und die Alternativhypothese H_1 tritt in Kraft. Wird H_0 beispielsweise mit einem Signifikanzniveau α von 5% getestet und angenommen bedeutet dies, dass die Hypothese H_0 beibehalten werden muss, stellt aber keinen Beweis dafür dar, dass die Nullhypothese auch tatsächlich stimmt.

Das Schema zur Signifikanzprüfung ist in Abbildung 39 dargestellt. Der erste Hypothesentest beschreibt einen zweiseitigen Test. Hier wird mit einem Signifikanzniveau von 10% oder anders formuliert mit einem Vertrauensbereich von 90% getestet, ob die zu vergleichenden Mittelwerte statistisch unterschiedlich sind. Bekommt man einen Wert für das berechnete t, dessen Betrag größer als der kritische t-Wert ist, muss die H_0 Hypothese verworfen werden und die H_1 Hypothese tritt in Kraft. Diese sagt somit aus, dass die Mittelwerte der verglichenen Stichprobe aus unterschiedlichen Populationen stammen und somit statistisch nicht gleich sind.

Um in weiterer Folge zu prüfen ob der Mittelwert der ersten Stichprobe signifikant größer ist als der Mittelwert der zweiten Stichprobe, müssen die Hypothesen neu formuliert werden. Verwendet wird hierfür ein einseitiger Hypothesentest mit einem Signifikanzniveau von 5%. H_0 lautet nun: der Mittelwert der ersten Stichprobe ist statistisch kleiner oder zumindest gleich dem Mittelwert der zweiten Stichprobe. Diese Hypothese kann verworfen werden, wenn der berechnete t-Wert größer ist als der tabellierte kritische t-Wert. Wird H_0 verworfen, tritt wiederum H_1 in Kraft und der berechnete t-Wert befindet sich hellblau markierten Bereich der Abbildung 39.

Kann H_0 nicht verworfen werden, wird eine neue Nullhypothese gestellt welche lautet: der Mittelwert der ersten Stichprobe ist statistisch größer oder zumindest gleich dem Mittelwert der zweiten Stichprobe. Kann diese nun verworfen werden, tritt H_1 in Kraft und es kann mit einem Vertrauensniveau von 95% behauptet werden, dass μ_1 signifikant kleiner ist als μ_2 .

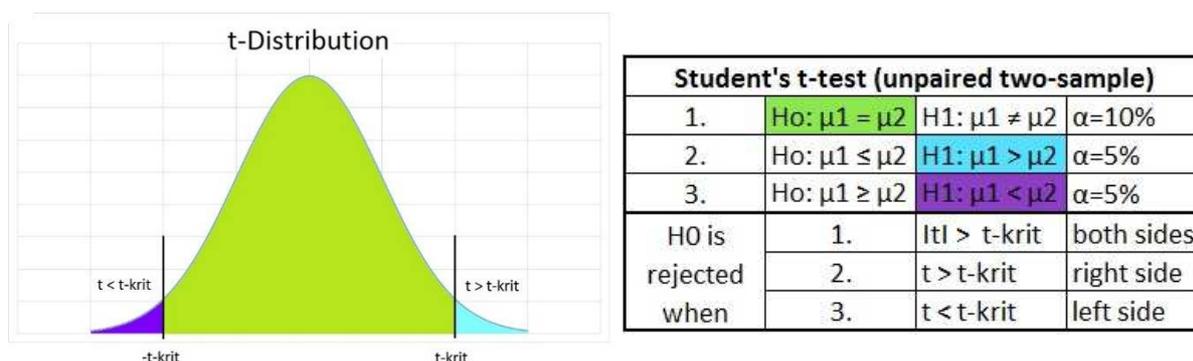


Abbildung 39: Schema zum Hypothesentest

6. EINSCHRÄNKUNGEN

Zur Auswertung herangezogen wurden Fußgänger-Fahrzeugunfälle, bei welchen eine Person von der Fahrzeugfront eines Personenkraftwagens oder Nutzfahrzeuges der Klasse M1 oder N1 erfasst wurde. Im gesammelten Datenmaterial sind Unfälle enthalten, bei denen ausschließlich eine Person von einem Fahrzeug erfasst wurde.

Die dokumentierten Verletzungen die dabei vom Fußgänger erlitten wurden, müssen von einem Arzt diagnostiziert worden sein und in Form einer Verletzungsanzeige, eines Verletzungsberichts oder eines detaillierten Obduktionsprotokolls vorliegen. Informationen zum Unfallfahrzeug (Marke, Typ, Leistung, ...) müssen ebenfalls vorhanden sein. Ausgewertete Parameter beziehen sich ausschließlich auf die vom Fußgänger erlittenen Verletzungen. Eine etwaige Gewichtung, wie viele AIS relevante Verletzungen von einer Person bei einem Verkehrsunfall erlitten wurden erfolgte nicht.

Ebenfalls sind alle in der Datenbank enthaltenen Verletzungen Fußgängern zuzuordnen, welche sich im Kollisionszeitpunkt in aufrechter Position befanden. Es wurden Verletzungen männlicher und weiblicher Unfallopfer jeder Größe und aller Altersgruppen erfasst. Korridore, in welchen die Kollisionsgeschwindigkeiten liegen müssen, wurden nicht definiert. Jede Anprallgeschwindigkeit welche zu einer oder mehreren AIS relevanten Verletzungen führte wurde berücksichtigt.

Das vorhandene Datenmaterial aus Deutschland (GIDAS), Frankreich (CEESAR) und Österreich (ZEDATU) enthält quantitativ und qualitativ verwertbare Unfalldaten für Fußgänger-Fahrzeugunfälle bis zum Jahr 2009. Statistisch gesicherte Aussagen können aber aufgrund des vorhandenen Datensatzes, der auch in gewisser Weise die Flottenzusammensetzung auf Deutschlands, Frankreichs und Österreichs Straßen repräsentiert, lediglich für Fahrzeuge der Kategorie „Large & Small Family Cars“ und für die Kategorie „Small MPV/Supermini“ gemacht werden. Für Fahrzeuge der Klassen „SUV“, „Roadster“ und „Large MPV/1-Box“ ist Datenmaterial in einem zu geringen Umfang vorhanden, als dass man gesicherte statistische Aussagen treffen könnte.

Weiters ist zu bemerken, dass das gesammelte Datenmaterial aus Deutschland und Frankreich Fußgängerunfälle enthält, bei denen Personenschäden ab einem Schweregrad AIS 2 auftraten. Bei den gesammelten Daten aus Österreich handelt es sich ausschließlich um Verkehrsunfälle mit für den Fußgänger tödlichen Ausgang. Dokumentiert wurden wiederum Verletzungen ab einem Schweregrad von AIS 2.

7. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Im erhaltenen bzw. aufgenommenen Datensatz zu Fußgängerunfällen liegt für AIS 2+ Verletzungen der Anteil an erlittenen Pelvis- und Femurverletzungen bei etwa 10,4% (Pelvis 7,3%, Femur 3,1%). Bei AIS 3+ Verletzungen betreffen bereits 13,8% das Pelvis (6,3%) oder das Femur (7,5%). Im aktuellen Kapitel werden auf diese Zahlen aufbauend Pelvis- und Femurverletzungen detailliert betrachtet. Es werden die Verletzungshäufigkeiten sowie Anprallgeschwindigkeiten nach Markteinführungszeitraum des betroffenen Unfallfahrzeugs untersucht und vom Fußgänger erlittene Verletzungen den unterschiedlich kategorisierten Fahrzeugtypen gegenübergestellt. Ebenfalls wird allgemein auf Frontgeometrien und detailliert auf Frontelemente der Unfallfahrzeuge eingegangen, durch welche die jeweiligen Verletzungen der Fußgänger verursacht wurden. Aussagen zur Bewegungsgeschwindigkeit (laufen, gehen, stehen) und der relativen Position des Fußgängers zum Fahrzeug im Zeitpunkt des Unfallgeschehens werden getätigt. Abschließend wird eine Abschätzung bezüglich möglicher Risikogruppen in Bezug auf Körpergröße, Körpergewicht und Alter der verunfallten Fußgänger vorgenommen.

7.1 Verletzungen nach Markteinführungszeitraum

Die hohe Frequenz an Pelvis und Femur Verletzungen (10,4% bei AIS 2+ und 13,8% bei AIS 3+) wird nachstehend in einer Detailbetrachtung der Verletzungshäufigkeit von Fußgängern, bezogen auf das Markteinführungsjahr des beteiligten Unfallfahrzeugs, genauer untersucht. Hierbei wird keine Unterscheidung bezüglich Fahrzeugfrontkategorisierung vorgenommen.

7.1.1 Verletzungshäufigkeit nach Markteinführungszeitraum

Die relative Verletzungshäufigkeit von AIS 2+ und AIS 3+ Verletzungen nach Modelleinführungsjahr, unabhängig von der Flottenzusammensetzung ist in Abbildung 40 dargestellt. Aufgetragen sind prozentuell jeweils die Anzahl der Pelvis und Femur Verletzungen sowie die Kategorie Pelvis Combined. Die Zahlen über den einzelnen Balken stellen den Absolutwert an Pelvis- und Femurverletzungen dar. Im gesammelten Datenbestand sind für Fahrzeuge des Markteinführungsjahres nach 2004 lediglich 72 AIS 2+ Verletzungen und 25 AIS 3+ Verletzungen enthalten. Im Vergleich dazu kann im Zeitraum von 2000-2004 auf 465 AIS 2+ und 226 AIS 3+ Verletzungsdaten zurückgegriffen werden.

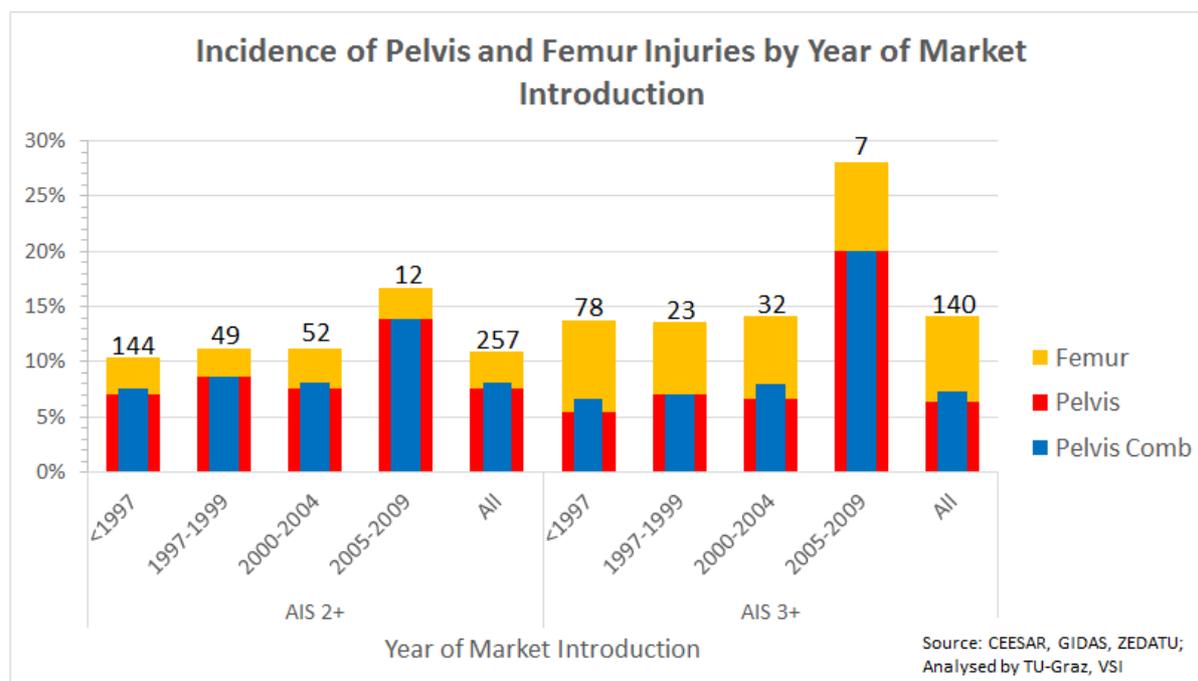


Abbildung 40: Relative Verletzungshäufigkeit nach Markteinführungsjahr des Unfallfahrzeugs

Aktuelle Zahlen von 2014 zeigen, dass das durchschnittliche Alter der deutschen Fahrzeugflotte 8,8 Jahre beträgt [61]. Somit ist diese geringe Zahl an bis jetzt detailliert dokumentierten Fußgängerunfällen bzw. Fußgängerletzungen, welche durch Kollisionen mit Fahrzeugen der Markteinführungsperiode 2005 – 2009 entstanden, nicht zwingend als Erfolg der Fahrzeugentwicklung zu sehen. Vielmehr ist der Grund ein statistischer. Während der relative Anteil von Pelvis- und Femur Fußgängerletzungen, hervorgerufen durch Kollisionen mit Fahrzeugen der Modelljahre vor 1997 bis einschließlich 2004, einen etwa konstanten Wert von 10-11% bei AIS 2+ Verletzungen und 13-14% bei AIS 3+ Verletzungen einnimmt, kann bei Fahrzeugen mit Markteinführungsjahr nach 2004 ein deutlich erhöhter Anteil festgestellt werden. AIS 2+ Verletzungen schlagen hier mit über 16% zu Buche und bei AIS 3+ Verletzungen beträgt der Anteil bereits über 27%, wenngleich der dafür zugrundeliegende Verletzungsdatensatz ein deutlich geringerer ist.

In Tabelle 10 sind die jeweiligen Risiken eine Verletzung von Pelvis oder Femur bzw. eine Verletzung der Kategorie Pelvis Combined zu erleiden dargestellt. Der Risikofaktor bezieht sich dabei immer auf den Markteinführungs-Vergleichszeitraum vor 1997.

Zufolge der gesammelten Daten kann hier jeweils ein erhöhtes Risiko der Verletzungskategorie Pelvis und Pelvis Combined festgestellt werden. Bei Pelvisverletzungen etwa ist das Risiko für Fußgänger, bei einer Kollision mit einem PKW, welcher zwischen 1997 und 1999 erstmals auf den Markt kam um 25% höher, als bei einer Kollision mit einem PKW, bei welchem das Markteinführungsjahr vor 1997 liegt ($p=0,26$). Bei Fahrzeugen mit Markteinführung nach 2004 ist dieses Risiko verglichen mit Fahrzeugen welche vor 1997 auf den Markt kamen sogar um mehr als das doppelte erhöht ($p=0,03$).

Grundsätzlich wird neueren Fahrzeugen eine höhere Sicherheit bezüglich Fußgängerschutz bescheinigt, dies kann anhand der gesammelten Daten und der gewählten Vergleichsmethode bezogen auf Beckenfrakturen nicht bestätigt werden. Im Gegenteil, ein tendenziell negatives Verhalten ist festzustellen.

Für Vergleiche bezüglich der Verletzungshäufigkeit von Fußgängern zwischen Fahrzeugen welche vor 1997 auf den Markt kamen und Fahrzeugen welche nach 2004 auf den Markt kamen, können die dargestellten Ergebnisse für Pelvis und Pelvis Combined, durch Anwendung des Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests, mit einem Vertrauensniveau für jeweils über 95% angegeben werden.

Tabelle 10: Quotenverhältnis bezogen auf den Markteinführungszeitraum vor 1997

Severity	Body Region	Odds-Ratio							
		<1997	1997-1999		2000-2004		2005-2009		
AIS 2+	Pelvis	1	1,25	p=0,26	1,08	p=0,71	2,14	p=0,03	
	Femur	1	0,73	p=0,36	1,08	p=0,80	0,81	p=0,81	
	Pelvis Comb.	1	1,16	p=0,45	1,10	p=0,65	1,99	p=0,05	
AIS 3+	Pelvis	1	1,33	p=0,42	1,24	p=0,52	4,35	p<0,01	
	Femur	1	0,78	p=0,47	0,91	p=0,74	0,97	p=0,97	
	Pelvis Comb.	1	1,07	p=0,85	1,21	p=0,52	3,50	p=0,02	

7.1.2 Anprallgeschwindigkeiten bei Fußgängerunfällen

Für Stichproben eines Umfangs ab etwa 30 Messdaten, können nach dem zentralen Grenzwertsatz die Dateninhalte einer Stichprobe als approximativ normalverteilt betrachtet werden, unabhängig von der Verteilungsfunktion aus der die Stichprobe gezogen wurde. Um dem zentralen Grenzwertsatz und dessen Einschränkungen Rechnung zu tragen, werden nachfolgend Pelvis- und Femurverletzungen zusammengefasst betrachtet. Dies ermöglicht es, die den jeweiligen Verletzungen zugeordneten Anprallgeschwindigkeiten als approximativ normalverteilt zu betrachten. Ein Vergleich der Anprallgeschwindigkeiten für den Markteinführungszeitraum vor 1997 und dem Markteinführungszeitraum von 2000-2004 wird damit möglich. Gegenübergestellt werden diese Verteilungsfunktionen im beschriebenen Vergleichszeitraum den Anprallgeschwindigkeiten aller in der Datenbank dokumentierten Verletzungen.

- Anprallgeschwindigkeiten bei Verletzungen der Schwere AIS 2+

Unter Einbezug der durchschnittlichen Anprallgeschwindigkeiten und der jeweiligen Standardabweichungen sind in Abbildung 41 die Wahrscheinlichkeiten für Verletzungen der Schwere AIS 2+ dargestellt. Eingezeichnet ist in dieser Abbildung beispielhaft die 50 Prozent

Wahrscheinlichkeitsmarke (Median). Diese beschreibt hier auch gleichzeitig das arithmetische Mittel (Erwartungswert) der Anprallgeschwindigkeiten von den aufgetragenen Verletzungskategorien.

Für Fahrzeuge mit Markteinführung vor 1997 beträgt die durchschnittliche Anprallgeschwindigkeit bei Pelvis- und Femurverletzungen ca. 48 km/h. In der Kategorie „Alle Verletzungen“, ist für dieselbe Markteinführungsperiode eine ähnlich hohe Durchschnittsgeschwindigkeit von 49 km/h ($p=0,33$) abzulesen. In der Periode 2000-2004 ist die durchschnittliche Anprallgeschwindigkeit, ab welcher eine Pelvis- oder Femurverletzung der Schwere AIS 2+ auftrat geringer und beträgt 47 km/h. Bezogen wiederum auf „Alle Verletzungen“ ist die mittlere Anprallgeschwindigkeit etwa 51 km/h ($p=0,13$).

Ab einer Geschwindigkeit von etwa 50 km/h werden die Unterschiede der jeweiligen Verteilungsfunktionen markanter. Insbesondere ist zu beobachten, dass im Vergleich mit Fahrzeugen der Markteinführung vor 1997 und Fahrzeugen mit Markteinführung zwischen 2000 und 2004, sich die Wahrscheinlichkeitskurven der verglichenen Verletzungsgruppen in unterschiedliche Richtungen entwickeln. So entstehen bei neueren Fahrzeugmodellen 80% „Alle Verletzungen“ bei einer Anprallgeschwindigkeit kleiner als 72 km/h. Pelvis- oder Femurverletzungen traten hingegen mit einer Wahrscheinlichkeit von 80% bereits bei Kollisionsgeschwindigkeiten unter 63 km/h auf.

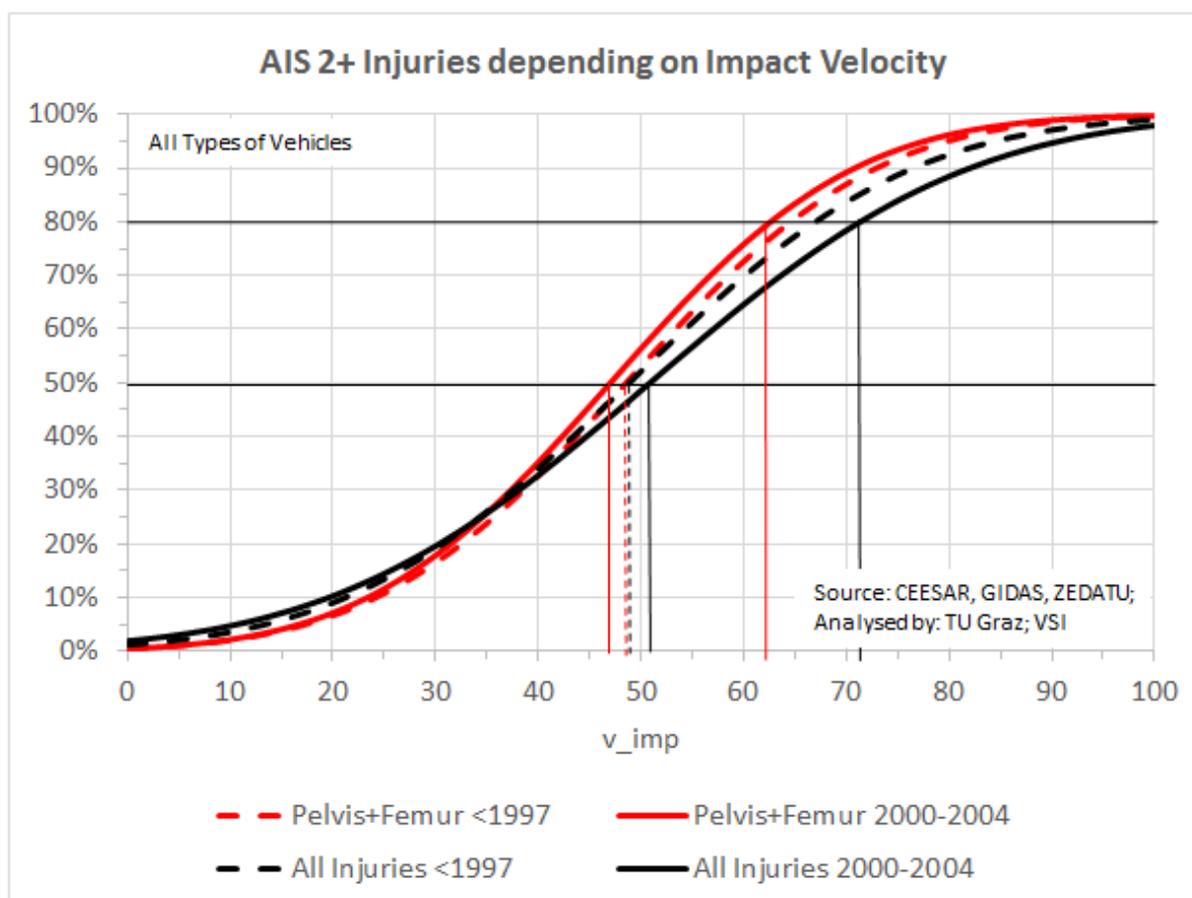


Abbildung 41: Wahrscheinlichkeit einer AIS 2+ Pelvis- oder Femurverletzung abhängig von der Anprallgeschwindigkeit

- Anprallgeschwindigkeiten bei Verletzungen der Schwere AIS 3+

Bei Verletzungen der Schwere AIS 3+ ist der Unterschied zwischen den Kategorien „Pelvis+Femur“ und „Allen Verletzungen“ in der Höhe der Anprallgeschwindigkeit deutlicher.

50% aller Frakturen von Pelvis und Femur treten bei Kollisionen mit älteren Fahrzeugmodellen (Markteinführung < 1997), bei Geschwindigkeiten unter 52 km/h auf. Bei neueren Fahrzeugen bereits bei 47 km/h ($p=0,14$). Betrachtet man alle Verletzungen und die dazugehörigen Kollisionsgeschwindigkeiten, traten bei älteren Fahrzeugmodellen 50% aller Verletzungen bei Kollisionsgeschwindigkeiten unter 56 km/h auf. Bei Modelljahren von 2000-2004 wurden 50% aller Verletzungen bei Anprallgeschwindigkeiten unter 58 km/h ($p=0,24$) erlitten (vgl. Abbildung 42).

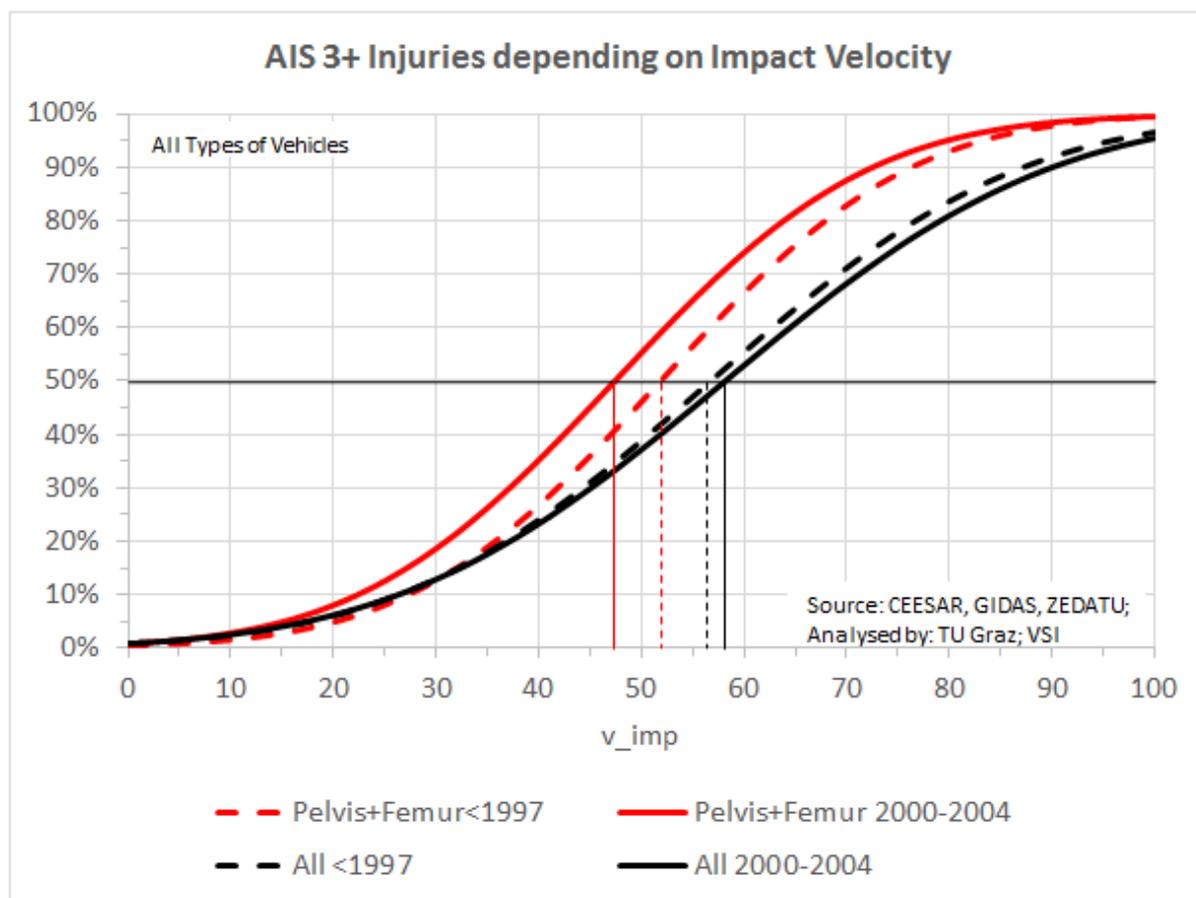


Abbildung 42: Wahrscheinlichkeit einer AIS 3+ Pelvis- oder Femurverletzung abhängig von der Anprallgeschwindigkeit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei neueren Fahrzeugmodellen Verletzungen der Schwere AIS 2+ allgemein erst mit höheren Geschwindigkeiten auftreten als bei älteren Fahrzeugmodellen mit Markteinführung vor 1997. Bei Pelvis- und Femurverletzungen im Detail ist ein gegenteiliger Trend zu beobachten. Verglichen mit dem Markteinführungszeitraum vor 1997 treten Frakturen dieser Kategorie bei neueren Modellen bereits bei geringeren Anprallgeschwindigkeiten auf.

Für Verletzungen der Schwere AIS 3+ verschärft sich dieser Trend. Verletzungen des knöchernen Beckens und des Oberschenkelknochens treten bei neueren Fahrzeugmodellen bereits bei deutlich geringeren Anprallgeschwindigkeiten auf, als bei älteren Modellen.

Bezüglich des Fußgängerschutzes, unter bedacht der Anprallgeschwindigkeit, können folgende Thesen aufgestellt werden:

- Je höher die durchschnittliche Anprallgeschwindigkeit ist, ab welcher eine Verletzung der jeweiligen Schwere erlitten wurde, desto positiver stellt sich die Fahrzeugfront in Bezug auf den Fußgängerschutz dar.
- Je geringer die durchschnittliche Anprallgeschwindigkeit ist, ab welcher eine Verletzung der jeweiligen Schwere erlitten wurde, desto negativer stellt sich die Fahrzeugfront in Bezug auf den Fußgängerschutz dar.

Dieser These folgend kann somit gesagt werden, dass sich vom Vergleichszeitraum vor 1997 bis zum Vergleichszeitraum 2000-2004 die Fahrzeugfront in Bezug auf alle Verletzungen und Körperregionen tendenziell hin zu mehr Sicherheit für den Fußgänger entwickelt hat. Für Frakturen des Beckens und des Oberschenkels hingegen ist dies nicht der Fall, eine negative Entwicklung ist hier zu beobachten.

7.2 Verletzungen nach Fahrzeugkategorien und Markteinführungszeitraum

Bisher konnte eine Tendenz festgestellt werden, dass Fußgänger bei Verkehrsunfällen mit neueren Fahrzeugmodellen häufiger eine Fraktur des knöchernen Beckens erleiden, bzw. konnte die These aufgestellt werden, dass die Wahrscheinlichkeit eine Becken- oder Oberschenkelfraktur zu erleiden bei Kollisionen mit Fahrzeugen des Markteinführungszeitraums 2000-2004 deutlich höher ist als bei Kollisionen mit Fahrzeugen des Markteinführungszeitraums vor 1997. Diese Betrachtung erfolgte ohne Rücksichtnahme auf die Fahrzeugfrontkategorisierung.

In diesem Kapitel werden nun Verletzungshäufigkeiten und Kollisionsgeschwindigkeiten von Fahrzeugen mit unterschiedlicher Fahrzeugfrontklassifizierung analysiert und bezogen auf ihr Markteinführungsjahr gegenübergestellt.

7.2.1 Verletzungen bezogen auf den Fahrzeugtyp

Verletzungen, welche durch Kollisionen mit Fahrzeugen des Markteinführungszeitraumes vor 1997 entstanden, sind in Abbildung 43 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass in dieser Betrachtungsperiode der überwiegende Anteil an Fahrzeugen von der Kategorie „Large & Small Family Cars“ (LSFC) gestellt wird. Als zweite große Gruppe können „Small MPVs/ Superminis“ (SMPS) identifiziert werden. Der Anteil an Verletzungen hingegen, der von den weiteren definierten Kategorien „SUV“ „Roadster“ und „Large MPV/ 1-Box“ verursacht wurde, ist sehr gering und erlaubt keinen relevanten Vergleich der vorhandenen

Daten. Es kann lediglich festgehalten werden, dass bei Fahrzeugen des Markteinführungszeitraums vor 1997 in durchschnittlich 70% aller Fälle die AIS relevante Verletzung durch ein Fahrzeug der Kategorie „Large & Small Family Car“ verursacht wurde.

Stellt man das Quotenverhältnis zwischen „Large & Small Family Cars“ und „Small MPV/ Superminis“ in Bezug auf die jeweilige verletzte Körperregion auf, kommt man zu dem Schluss, dass das Risiko einer Fraktur der Schwere AIS 2+ des knöchernen Beckens bei dem Fahrzeugtyp LSFC um etwa 63% ($p=0,06$) erhöht ist. Für AIS 3+ Verletzungen kann ebenfalls ein erhöhtes Risiko von 37% beobachtet werden, allerdings bei einem p-Wert von 0,49 und hat somit geringe Relevanz (vgl. Tabelle 11). Bei Femur Frakturen stellen sich die Unterschiede der beiden verglichenen Fahrzeugklassen als marginal dar. Ein signifikanter Unterschied zum Vertrauensniveau von 95% ist in keinem der verglichenen Fälle gegeben (Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest).

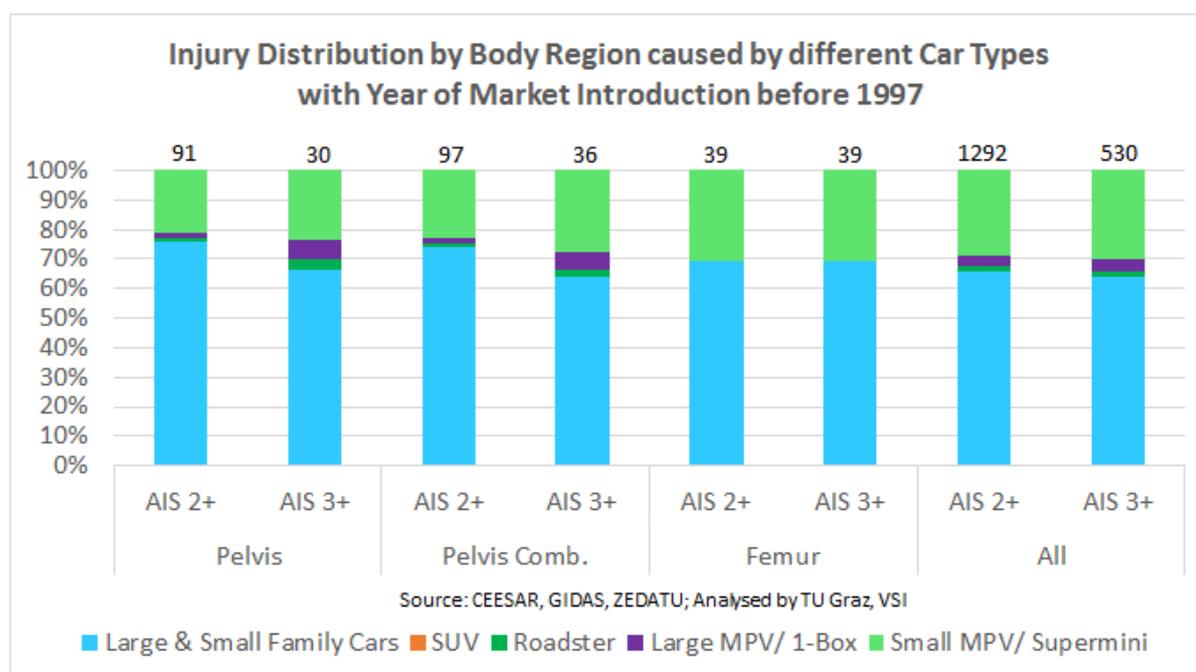


Abbildung 43: Verletzungshäufigkeiten nach Fahrzeugklassen mit Markteinführung vor 1997

Verletzungen von Fußgängern, welche durch Kollisionen mit Fahrzeugen des Markteinführungszeitraumes von 2000-2004 verursacht wurden sind in Abbildung 44 dargestellt. Bezogen auf alle verletzte Körperregionen können wiederum Fahrzeuge der Kategorie LSFC als Hauptverursacher eruiert werden, ihr Anteil beträgt knapp unter 60%. Fahrzeuge der Kategorien „SUV“, „Roadster“ und „Large MPV/ 1-Box“ verursachen weiterhin nur einen geringen Teil der in den Datenbanken erfassten Verletzungen. Zu beobachten ist hingegen deutlich, dass bei AIS 2+ Pelvisverletzungen der überwiegende Anteil (etwa 65%) von SMPS's verursacht wurde. LSFC Fahrzeuge scheinen hier nur mit etwa 30% auf.

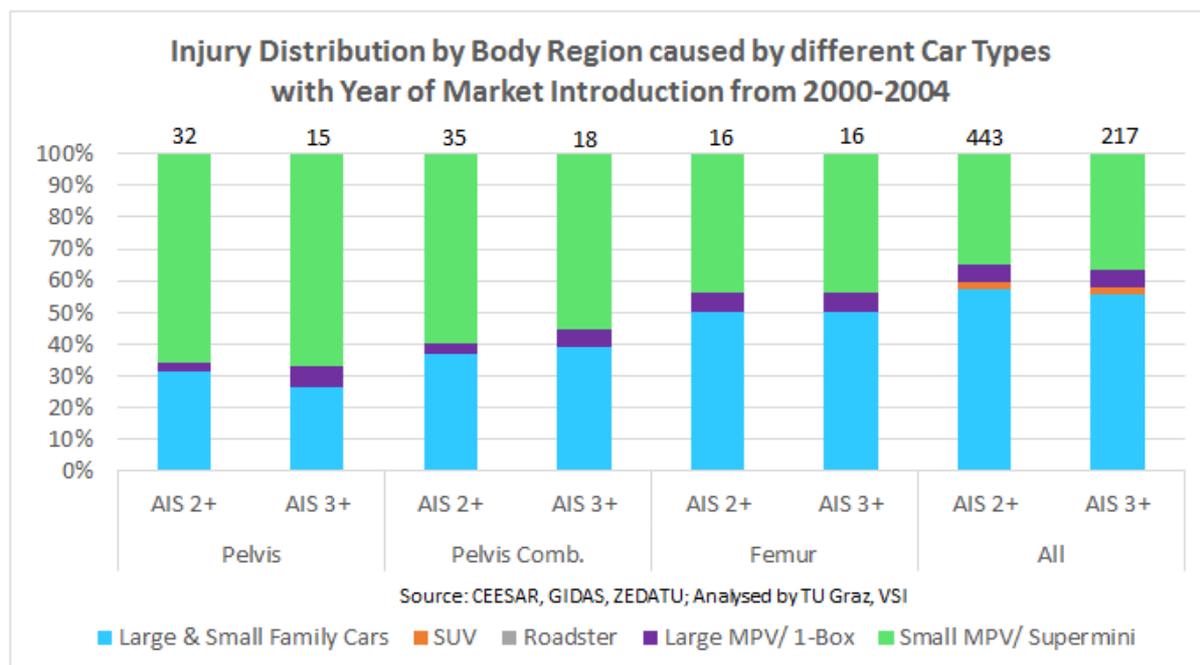


Abbildung 44: Verletzungshäufigkeiten nach Fahrzeugklassen mit Markteinführung von 2000-2004

Bildet man wiederum das Quotenverhältnis dieser beiden Fahrzeugklassen (LSFC und SMPS) bezogen auf die jeweilige Verletzung, kann mit einem Vertrauensniveau von über 95% den Fahrzeugen der Klasse „Large & Small Family Car“ eine erhöhte Sicherheit in Bezug auf AIS 3+ Pelvis Verletzungen unterstellt werden. Die detaillierten Werte zu den Quotenverhältnissen und Signifikanzen sind in Tabelle 11 dargestellt. Zu beachten ist allerdings, dass den Stichproben im Vergleich zur Betrachtungsperiode vor 1997, eine deutlich geringere Anzahl an Messdaten zu Grunde liegt.

Tabelle 11: Quotenverhältnis mit der Fahrzeugfrontkategorie „Small MPV/ Supermini“ als Vergleichsbasis, sowie p-Werte des Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests

Body Region			Pelvis		Pelvis Comb.		Femur	
Severity			AIS 2+	AIS 3+	AIS 2+	AIS 3+	AIS 2+	AIS 3+
YoM <1997	Large & Small Family Car	n	69	20	72	23	27	27
	Small MPV/ Supermini	n	19	7	22	10	12	12
YoM 2000-2004	Large & Small Family Car	n	10	4	13	7	8	8
	Small MPV/ Supermini	n	21	10	21	10	7	7

Body Region			Pelvis		Pelvis Comb.		Femur	
Severity			AIS 2+	AIS 3+	AIS 2+	AIS 3+	AIS 2+	AIS 3+
Large & Small Family Cars vs. Small MPVs/Superminis	YoM <1997	OR	1,63	1,37	1,48	1,09	0,96	1,07
		p	0,06	0,49	0,12	0,83	0,91	0,86
	YoM 2000-2004	OR	0,69	0,24	0,90	0,42	1,70	0,73
		p	0,34	0,02	0,78	0,09	0,31	0,56

7.2.2 Verletzungsverursachende mittlere Kollisionsgeschwindigkeiten nach Fahrzeugtyp

Die durchschnittlichen Anprallgeschwindigkeiten bei „Large & Small Family Cars“ und „Small MPV/ Supermini“, mit Markteinführung vor 1997, liegen bezogen auf alle verletzte Körperregionen der Schwere AIS 2+ bei LSFC Fahrzeugen bei etwa 46 km/h und bei Fahrzeugen der Kategorie SMPS bei etwa 50 km/h (Abbildung 45, Tabelle 12). Verletzungen, bezogen auf alle Körperregionen treten also bei SMPS Fahrzeugen bei durchschnittlich höherer Geschwindigkeit auf ($p \leq 0,01$). Selbiges ist signifikant für AIS 3+ Verletzungen zu beobachten ($p = 0,04$). Verletzungen entstanden hier durch LSFC Fahrzeuge bei durchschnittlich 54 km/h, bei SMPS Fahrzeugen mit einer mittleren Geschwindigkeit von 58 km/h.

Grundsätzlich ist bei den angeführten Verletzungskategorien eine höhere durchschnittliche Anprallgeschwindigkeit bei SMPS Fahrzeugen zu beobachten. Die Ausnahme sind Frakturen des Oberschenkelknochens. Hier erfolgt der Erstanprall des Fahrzeugs an den Fußgänger mit LSFC Fahrzeugen durchschnittlich mit höherer Geschwindigkeit.

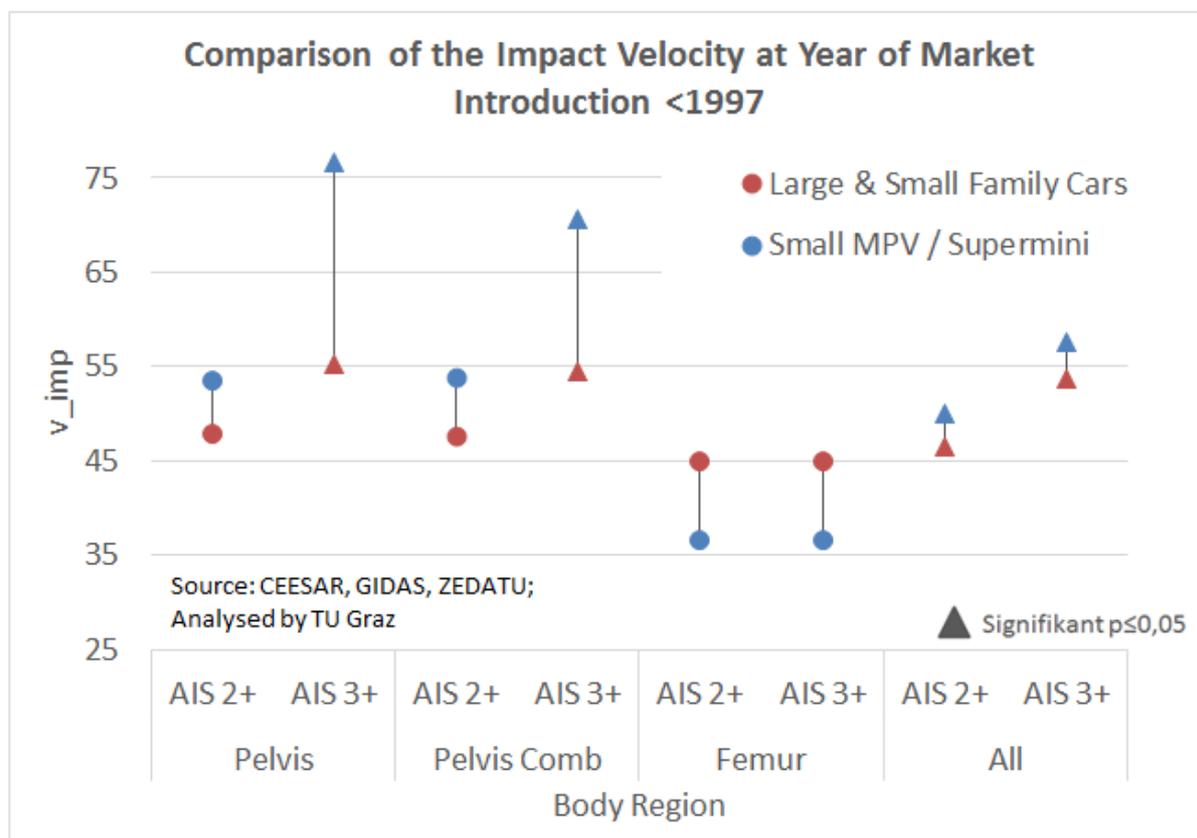


Abbildung 45: Vergleich der mittleren Kollisionsgeschwindigkeiten der unterschiedlichen Fahrzeugtypen. Signifikante Unterschiede der mittleren Anprallgeschwindigkeiten zum 5% Niveau sind mit Dreiecken markiert. Alle weiteren Mittelwertvergleiche können als Trend betrachtet werden.

Tabelle 12: Stichprobenumfang und Signifikanzniveaus zum Fahrzeugvergleich

Vehicle Typs	Pelvis		Pelvis Comb.		Femur		All	
	AIS 2+	AIS 3+	AIS 2+	AIS 3+	AIS 2+	AIS 3+	AIS 2+	AIS 3+
Large & Small Family Cars [n]	69	20	72	23	27	27	854	335
Small MPV / Supermini [n]	19	7	22	10	12	12	372	158
p-value	0,11	<0,01	0,08	<0,01	0,08	0,08	<0,01	0,04

Eine Signifikanz kann ebenfalls für Abweichungen der mittleren Geschwindigkeit zwischen den Schweregraden der Verletzungen festgestellt werden. Bei Verletzungen der Schwere AIS 3+ ist die mittlere Anprallgeschwindigkeit immer signifikant höher zu beobachten als bei Verletzungen der Schwere AIS 2+, bezogen auf die jeweilige Körperregion. Bei Frakturen des Oberschenkels sind die Geschwindigkeiten ident.

Geht man zur Interpretation dieser Daten wiederum von der These aus, dass sich die Fahrzeugfront mit höherer mittlerer Kollisionsgeschwindigkeit, ab welcher eine Verletzung der jeweiligen Schwere erlitten wurde, in Bezug auf den Fußgängerschutz positiver auswirkt, so kann im Falle eines Unfalls, Fahrzeugen der Klasse SMPS eine für den Fußgänger günstigere Fahrzeugfrontstruktur bzw. Fahrzeugfrontgeometrie, als Fahrzeugen der Klasse LSFC unterstellt werden.

Für einen Vergleich der mittleren Kollisionsgeschwindigkeiten der Fahrzeugklassen „Large & Small Family Cars“ und „Small MPV/ Supermini“, im Markteinführungszeitraum von 2000-2004 sind die zugrunde liegenden Messdaten von zu geringem Umfang bzw. die Streuung dieser zu groß, um eine Prognose zu Unterschieden abgeben zu können. Lediglich für Verletzungen aller Körperregion zusammen betrachtet kann gesagt werden, dass die durchschnittlichen Anprallgeschwindigkeiten für LSFC Fahrzeuge und SMPS Fahrzeuge fast ident sind. Dies gilt sowohl für den Schweregrad AIS 2+ als auch AIS 3+.

7.2.3 Detaillierte Verletzungsbetrachtung bezogen auf die Fahrzeugkategorien

Dokumentierte Frakturen des Oberschenkelhalsknochens (851812.3) und Schaftfrakturen des Oberschenkels (851814.3) traten bei Fahrzeugen der Klasse SMPS relativ betrachtet häufiger auf, als bei Fahrzeugen der Kategorie LSFC (Abbildung 46).

Bei Beckenverletzungen sind Frakturen des Iliosakralgelenks (852800.3) und Sprengungen der Schambeinfuge (853000.3) häufiger bei Unfällen mit Fahrzeugen der Kategorie SMPS aufgetreten. Offene-, verschobene- oder gesplitterte Brüche des knöchernen Beckengürtels (852604.3) sind ebenfalls häufiger bei Unfällen mit Fahrzeugen der Kategorie SMPS zu beobachten. Daraus kein direkter Schluss gezogen werden, da einfach dokumentierte Verletzungen des Beckens, ohne Information des genauen Umfangs und der Schwere der Verletzung (852600.2) häufiger bei Unfällen mit Fahrzeugen der Kategorie LSFC auftraten.

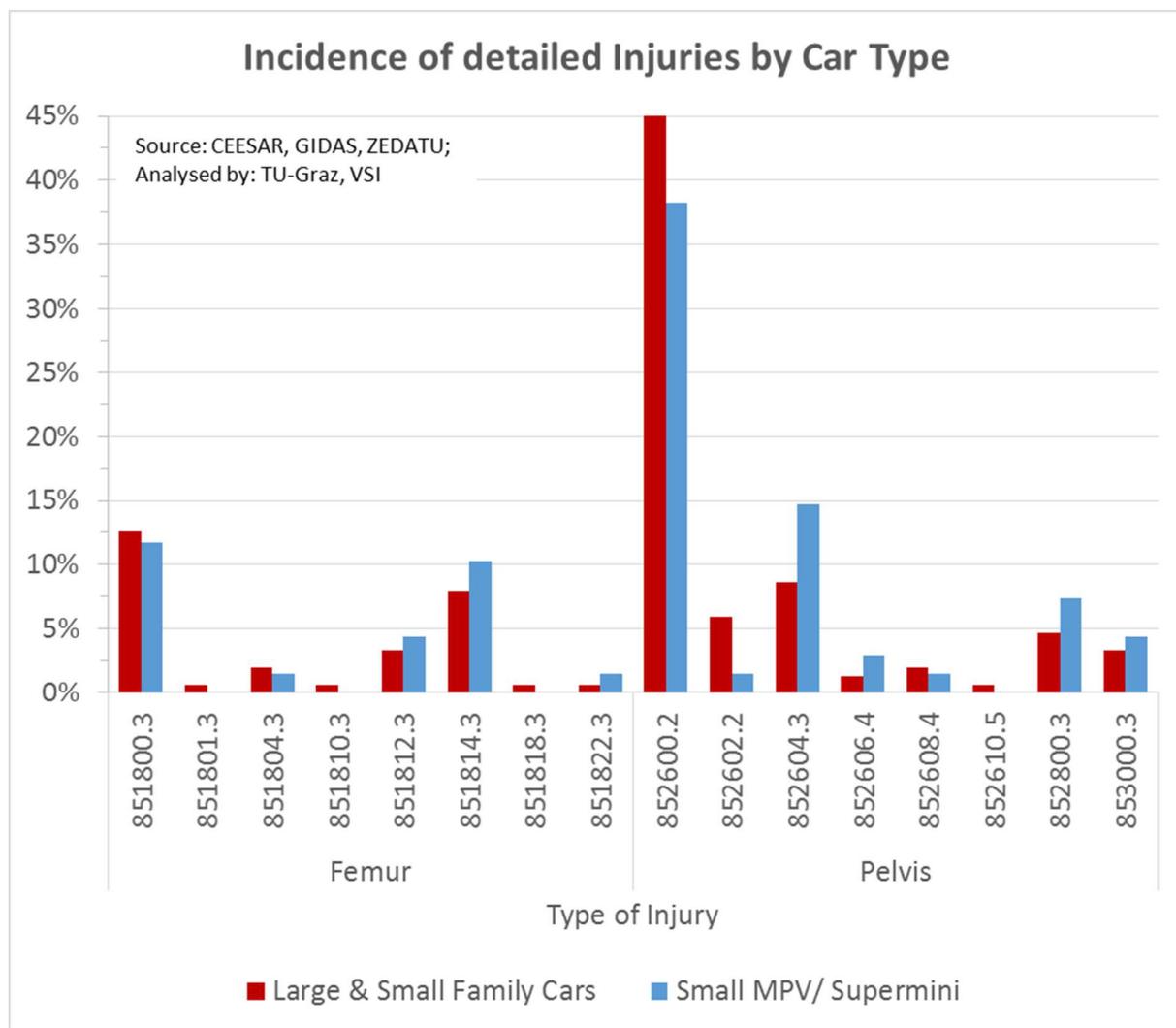


Abbildung 46: Relative Häufigkeit der detaillierten Verletzungen bezogen auf den Fahrzeugtyp, ohne Unterteilung der Fahrzeuge nach deren Markteinführungsjahr

7.2.4 Verletzungshäufigkeit nach Markteinführungszeitraum

Für Fahrzeuge des Typs LSFC sind die relativen Häufigkeiten bezogen auf die jeweiligen Markteinführungsperioden dargestellt (Abbildung 47). Für die Markteinführungsperiode 2005-2009 sind keine Pelvis- oder Femurverletzungen im Datenbestand enthalten. Deutlich zu erkennen ist der Rückgang an AIS 2+ Verletzungen im Markteinführungszeitraum 2000-2004. Aus der Berechnung des Quotenverhältnisses (Tabelle 15) ergibt sich ein um das doppelte verringertes Risiko für Pelvisverletzungen im Vergleich zu LSFC Fahrzeugen des Markteinführungszeitraums <1997 ($p=0,03$).

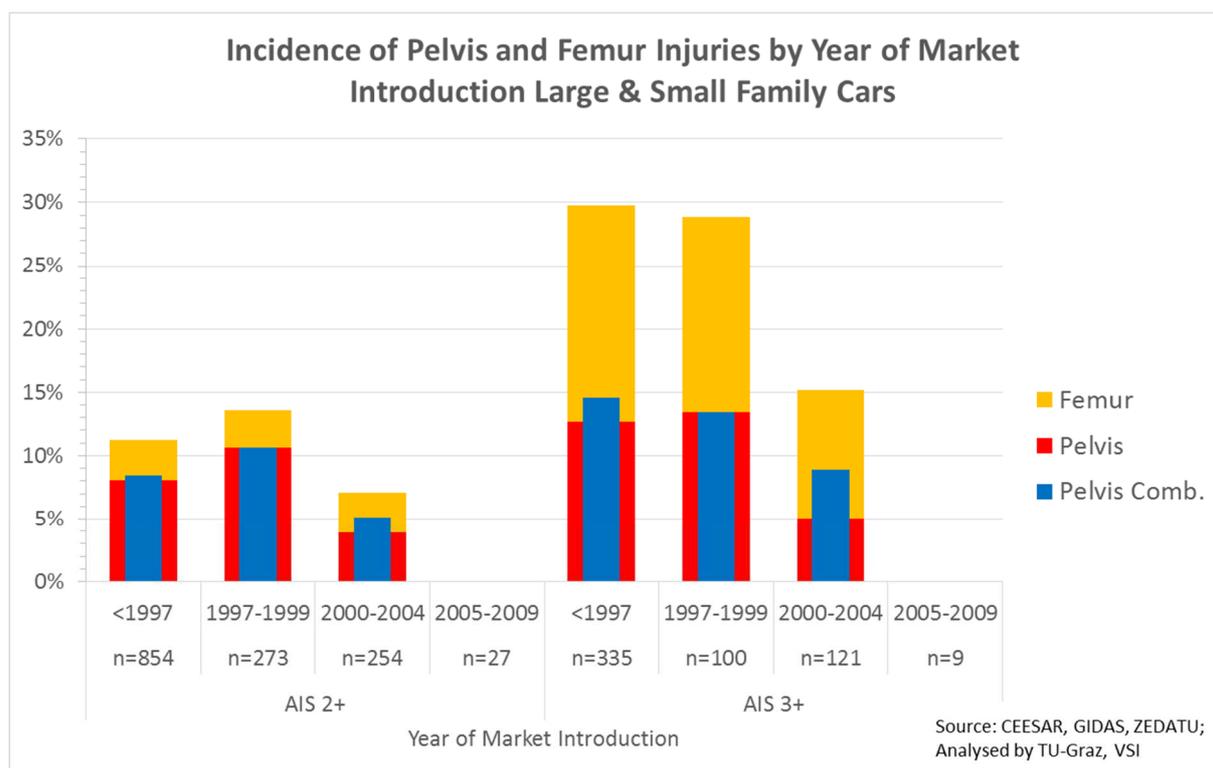


Abbildung 47: Large & Small Family Cars; Relative Verletzungshäufigkeit nach Markteinführungsjahr des Unfallfahrzeugs; Die Anzahl (n) bezieht sich auf die gesamt Stichprobengröße

Tabelle 13: Large & Small Family Cars; Quotenverhältnis bezogen auf den Markteinführungszeitraum vor 1997

Severity	Body Region	Odds-Ratio Large & Small Family Cars					
		<1997	1997-1999	2000-2004	2005-2009		
AIS 2+	Pelvis	1	1,35	p=0,20	0,47	p=0,03	-
	Femur	1	0,92	p=0,85	1,00	p=1,00	-
	Pelvis Comb.	1	1,29	p=0,27	0,58	p=0,09	-
AIS 3+	Pelvis	1	1,07	p=0,89	0,37	p=0,08	-
	Femur	1	0,88	p=0,78	0,54	p=0,13	-
	Pelvis Comb.	1	0,91	p=0,85	0,57	p=0,22	-

Betrachtet man unter denselben Voraussetzungen die Häufigkeitsverteilungen der Fahrzeugklasse Small MPV/Supermini bezogen auf die jeweilige Markteinführungsperiode kann für AIS 2+ Verletzungen ein stetiger Anstieg der Pelvis- und Pelvis Combined-Verletzungen festgestellt werden (Abbildung 48). Nach Berechnungen der jeweiligen Quotenverhältnisse (Tabelle 14) kann SMPS Fahrzeugen mit Markteinführung ab dem Jahr 2000 ein deutlich höheres Risiko bescheinigt werden, Pelvis- und Pelvis Combined-Verletzungen der Schwere AIS 2+ zu verursachen. (Verglichen mit SMPS Fahrzeugen des Markteinführungszeitraums <1997; p jeweils <0,01). Ebenso ist dieses erhöhte Risiko für AIS 3+ Pelvisverletzungen zu beobachten ($p \leq 0,03$).

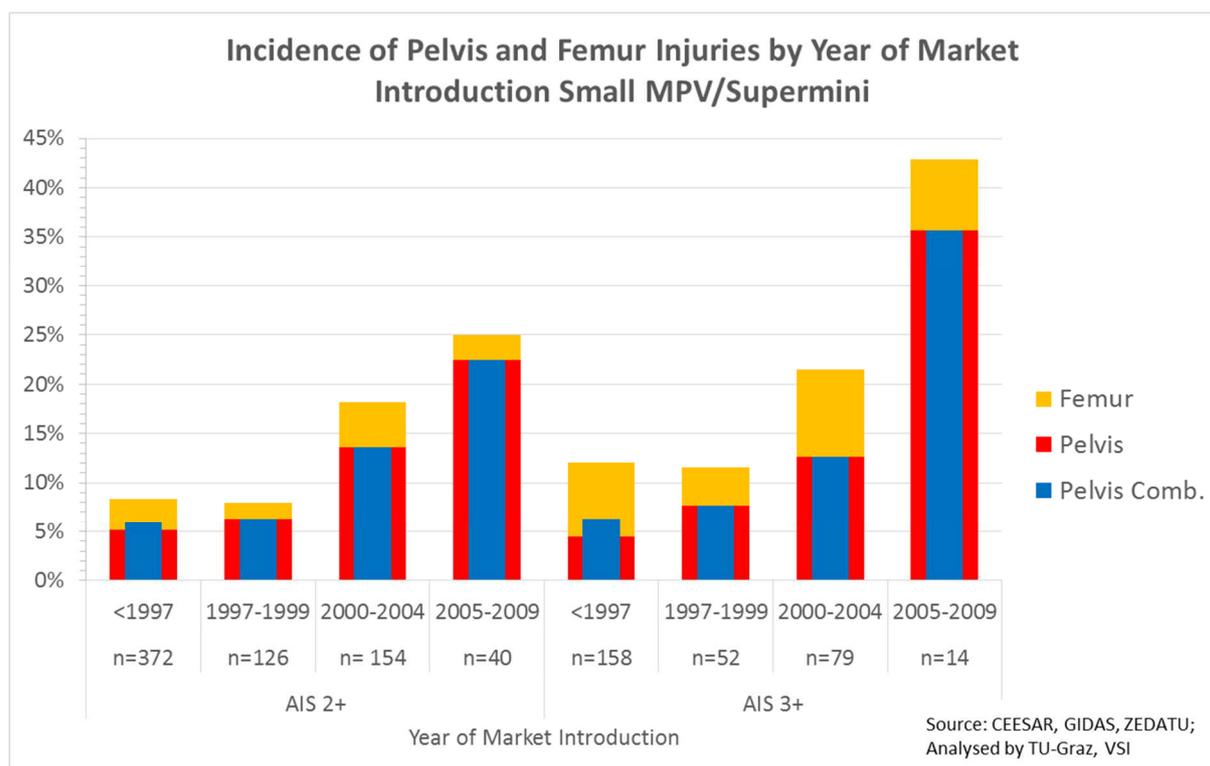


Abbildung 48: Small MPV/Supermini; Relative Verletzungshäufigkeit nach Markteinführungsjahr des Unfallfahrzeugs; Die Anzahl (n) bezieht sich auf die gesamte Stichprobengröße

Tabelle 14: Small MPV/Supermini; Quotenverhältnis bezogen auf den Markteinführungszeitraum vor 1997;

Severity	Body Region	Odds-Ratio Small MPV/Supermini							
		<1997		1997-1999		2000-2004		2005-2009	
AIS 2+	Pelvis	1	1,26	p=0,60	2,93	p<0,01	5,39	p<0,01	
	Femur	1	0,48	p=0,53	1,43	p=0,47	0,77	p=1	
	Pelvis Comb.	1	1,08	p=0,86	2,51	p<0,01	4,62	p<0,01	
AIS 3+	Pelvis	1	1,80	p=0,47	3,12	p=0,03	11,98	p<0,01	
	Femur	1	0,49	p=0,52	1,18	p=0,74	0,94	p=1	
	Pelvis Comb.	1	1,23	p=0,75	2,14	p=0,10	8,22	p<0,01	

7.2.5 Mittlere Anprallgeschwindigkeiten über die jeweiligen Markteinführungsperioden

In der Markteinführungsperiode vor 1997 ist eine mittlere Anprallgeschwindigkeit bei LSFC (alle Verletzungen der Schwere AIS 2+) von etwa 47 km/h gegeben (Abbildung 49, Tabelle 15). In der Periode 1997-1999 ist diese deutlich geringer und beträgt lediglich ca. 39 km/h. Bei Fußgänger-kollisionen mit LSFC Fahrzeugen des Markteinführungszeitraums von 2000-2004 liegt die mittlere Geschwindigkeit bei ca. 53 km/h (p-Werte jeweils <0,01).

Für Verletzungen der Schwere AIS 3+ zeigt sich ein ähnliches Bild der mittleren Anprallgeschwindigkeiten bezogen auf alle verletzten Körperregionen (Abbildung 49, Tabelle 15). Diese betragen in der Markteinführungsperiode vor 1997 54 km/h, in der Zeitspanne von 1997 – 1999 45 km/h und bei Fußgängerunfällen mit Fahrzeugen der Markteinführung von 2000-2004 betrug die mittlere Anprallgeschwindigkeit 61 km/h. Die Unterschiede der durchschnittlichen Kollisionsgeschwindigkeiten erfüllen jeweils das Vertrauensniveau von 95% und sind als signifikant anzusehen (p -Werte jeweils $<0,01$).

Ein ebenfalls, zum Vertrauensniveau von 95% signifikanter Unterschied der mittleren Anprallgeschwindigkeiten liegt in den jeweiligen Markteinführungsperioden zwischen Verletzungen der Schwere AIS 2+ und AIS 3+ vor.

Bezogen auf AIS 2+ Verletzungen des knöchernen Beckens ist ebenfalls ein Abfallen der mittleren Kollisionsgeschwindigkeit von der Periode vor 1997 (49 km/h) zur Markteinführungsperiode 1997 – 1999 (41 km/h) zu beobachten. Diese Veränderung der mittleren Geschwindigkeiten stellt sich wiederum als signifikant dar ($p=0,04$). In der Markteinführungsperiode 2000 – 2004 ist eine mittlere Anprallgeschwindigkeit von 48 km/h feststellbar. Die diesem Mittelwert zugrunde liegende Anzahl an Messdaten stellt sich allerdings als sehr gering, und die Standardabweichung als verhältnismäßig groß dar, was zu einem hohen Konfidenzintervall führt. Es kann lediglich die Tendenz geäußert werden, dass der Mittelwert der Kollisionsgeschwindigkeiten bei Fahrzeugen der Markteinführungsperiode 2000 – 2004 tendenziell höher ist als bei Fahrzeugen der Markteinführung 1997 – 1999 ($p=0,13$).

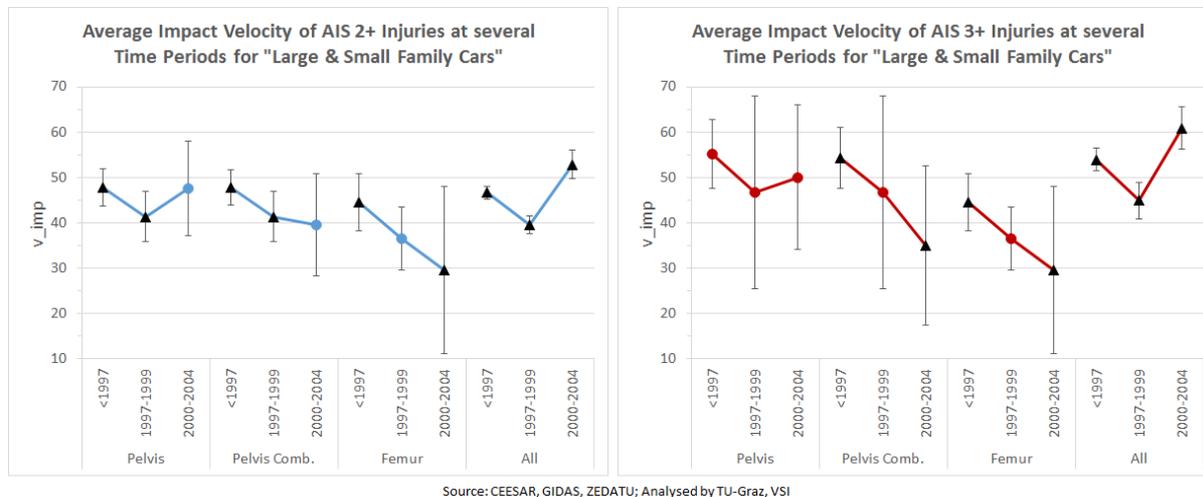


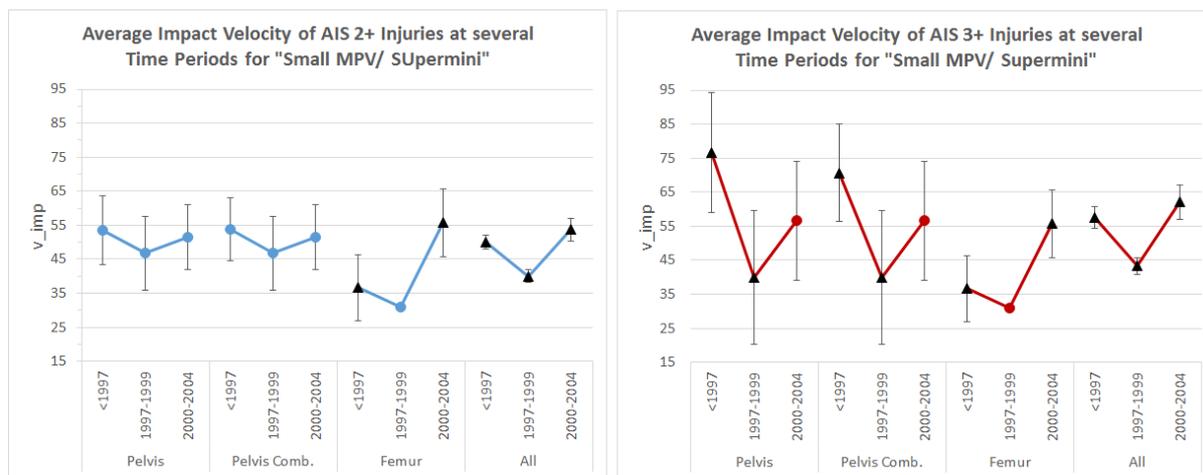
Abbildung 49: Mittlere Kollisionsgeschwindigkeiten für „Large & Small Family Cars“ über die Markteinführungsperioden betrachtet. Signifikante Unterschiede in der durchschnittlichen Kollisionsgeschwindigkeit zum Vertrauensniveau von 95% sind mit Dreiecken markiert.

Tabelle 15: „Large & Small Family Cars“ Stichprobenumfang und p-Werte

Severity	Body Region	Year of Market Introduction	Number of Injuries [n]	p-value			Severity	Body Region	Year of Market Introduction	Number of Injuries [n]	p-value		
				<1997	1997-1999	2000-2004					<1997	1997-1999	2000-2004
AIS 2+	Pelvis	<1997	69		0,04	0,49	AIS 3+	Pelvis	<1997	20		0,15	0,28
		1997-1999	29			0,13			1997-1999	7			0,4
		2000-2004	10						2000-2004	4			
	Pelvis Comb.	<1997	72		0,04	0,06		Pelvis Comb.	<1997	23		0,15	<0,01
		1997-1999	29			0,38			1997-1999	7			0,17
		2000-2004	13						2000-2004	7			
	Femur	<1997	27		0,1	0,03		Femur	<1997	27		0,1	0,03
		1997-1999	8			0,21			1997-1999	8			0,21
		2000-2004	8						2000-2004	8			
	All	<1997	854		<0,01	<0,01		All	<1997	335		<0,01	<0,01
		1997-1999	273			<0,01			1997-1999	100			<0,01
		2000-2004	254						2000-2004	121			

Bezogen auf alle AIS 2+ Verletzungen, unabhängig der Körperregion, kann bei SMPS Fahrzeugen mit Markteinführung vor 1997 eine Kollisionsgeschwindigkeit von etwa 50 km/h angegeben werden (Abbildung 50, Tabelle 16). Bei Fußgängerunfällen mit Fahrzeugen des Markteinführungszeitraums von 1997 – 1999 ist die durchschnittliche Anprallgeschwindigkeit mit 40 km/h gegeben. In der Periode 2000-2004 beträgt sie ca. 54 km/h. Die Unterschiede in der Höhe dieser Geschwindigkeiten ergeben sich als jeweils signifikant zum Vertrauensniveau von $\geq 95\%$ (p-Werte jeweils $\leq 0,03$). Die mittleren Kollisionsgeschwindigkeiten bei AIS 3+ Verletzungen entstehen erst bei signifikant höheren Anprallgeschwindigkeiten. Im Markteinführungszeitraum vor 1997 mit ca. 58 km/h. Bei Fußgängerunfällen in denen SMPS Fahrzeuge des Markteinführungszeitraumes von 1997 – 1999 verwickelt waren, ist eine deutlich geringere Anprallgeschwindigkeit mit etwa 43 km/h zu beobachten. In der Zeitperiode 2000-2004 betrug sie 62 km/h. Als signifikant erweisen sich hierbei die Vergleichswerte der Jahre <1997 mit der Markteinführungsperiode 1997-1999 ($p < 0,01$). Der Unterschied in den Anprallgeschwindigkeiten im Vergleichszeitraum 1997-1999 und 2000-2004 stellt sich ebenfalls mit einem p-Wert $< 0,01$ dar. Vergleicht man die Anprallgeschwindigkeiten der Jahre <1997 mit 2000-2007, kann der p-Wert mit 0,07 angegeben werden.

Diese Unterschiede in den Geschwindigkeitsniveaus, bezogen auf alle Verletzungen unabhängig der Körperregion, sind auch bei den Verletzungskategorien Pelvis, Pelvis Combined und Femur wieder zu finden. Wenngleich die Abweichungen in der Höhe der mittleren Kollisionsgeschwindigkeiten nicht immer als signifikant betrachtet werden können.



Source: CEESAR, GIDAS, ZEDATU; Analysed by: TU-Graz, VSI

Abbildung 50: mittlere Kollisionsgeschwindigkeiten für „Small MPV/ Supermini“ über die Markteinführungsperioden betrachtet. Signifikante Unterschiede in der durchschnittlichen Kollisionsgeschwindigkeit zum Vertrauensniveau von 95% sind mit Dreiecken markiert.

Tabelle 16: „Small MPV/ Supermini“ Stichprobenumfang und p-Werte; * zu geringer Datenumfang

Severity	Body Region	Year of Market Introduction	Number of Injuries [n]	p-value		
				<1997	1997-1999	2000-2004
AIS 2+	Pelvis	<1997	19		0,21	0,39
		1997-1999	8			0,29
		2000-2004	21			
	Pelvis Comb.	<1997	22		0,19	0,36
		1997-1999	8			0,29
		2000-2004	21			
	Femur	<1997	12		0,32	<0,01
		1997-1999	2			0,01*
		2000-2004	7			
	All	<1997	372		<0,01	0,03
		1997-1999	126			<0,01
		2000-2004	154			
AIS 3+	Pelvis	<1997	7		<0,01	0,06
		1997-1999	4			0,12
		2000-2004	10			
	Pelvis Comb.	<1997	10		<0,01	0,09
		1997-1999	4			0,12
		2000-2004	10			
	Femur	<1997	12		0,32	<0,01
		1997-1999	2			0,01*
		2000-2004	7			
	All	<1997	158		<0,01	0,07
		1997-1999	52			<0,01
		2000-2004	79			

Geht man wiederum von der These aus, dass sich mit höherer mittlerer Kollisionsgeschwindigkeit, ab welcher eine Verletzung der jeweiligen Schwere erlitten wurde, die Fahrzeugfront positiv auf den Fußgängerschutz auswirkt, so kann Fahrzeugen mit Markteinführungsdatum von 2000 – 2004 eine gesteigerte Sicherheit in Bezug auf den Fußgängerschutz bescheinigt werden. In der Periode von 1997 – 1999 hingegen ist das schlechteste Ergebnis zu beobachten. Eine mögliche Erklärung dafür findet sich in der Einführung des Euro NCAP-Tests 1997. Zu diesem Zeitpunkt unterlag die Fahrzeugbewertung in erster Linie den Kriterien des Insassenschutzes. In diesem Zusammenhang liegt die Vermutung nahe, dass Fahrzeughersteller vermehrt steifere Fahrzeugfronten konstruierten und einsetzten, was sich möglicherweise dementsprechend negativ auf den Fußgängerschutz

auswirkte. Ab dem Jahr 2000 fand der Fußgängerschutz wieder mehr Aufmerksamkeit, dies schlägt sich auch in den mittleren Anprallgeschwindigkeiten bei Fußgänger-Kollisionen mit Fahrzeugen des Markteinführungszeitraumes 2000-2004 nieder.

7.3 Anprallregion am Fahrzeug

In folgenden Kapitel werden die Verletzungsverursachenden Frontelemente von Fahrzeugen und deren Relevanz in Bezug auf knöchernerne Femur- und Pelvisverletzungen im Detail betrachtet.

7.3.1 Verletzungshäufigkeit nach Fahrzeugfrontelementen

Frakturen von Pelvis und Femur werden im Zuge eines Frontanpralls häufig durch die vordere Stoßstange, die Fronthaubenkante und durch den Anstoß an die Fronthaube selbst verursacht. Abbildung 51 zeigt die Verteilung der einzelnen Körperregionen (Pelvis, Femur, Pelvis Combined) und den Schweregrad der jeweiligen Verletzungen, zugehörig zu den verursachenden Frontelementen. Für AIS 2+ und AIS 3+ Verletzungen kann für Frakturen des Oberschenkelknochens in den meisten Fällen (17) die vordere Stoßstange verantwortlich gemacht werden, weitere 10 Frakturen wurden durch die Fronthaubenkante verursacht und 5 Frakturen durch die Fronthaube selbst. AIS 2+ Verletzungen des knöchernen Beckens wurden am Häufigsten von der Fronthaube selbst verursacht, 57 Fälle wurden diesbezüglich dokumentiert. 49 Frakturen wurden von der Fronthaubenkante verursacht und zwei Fälle von Frakturen konnten der vorderen Stoßstange zugeordnet werden.

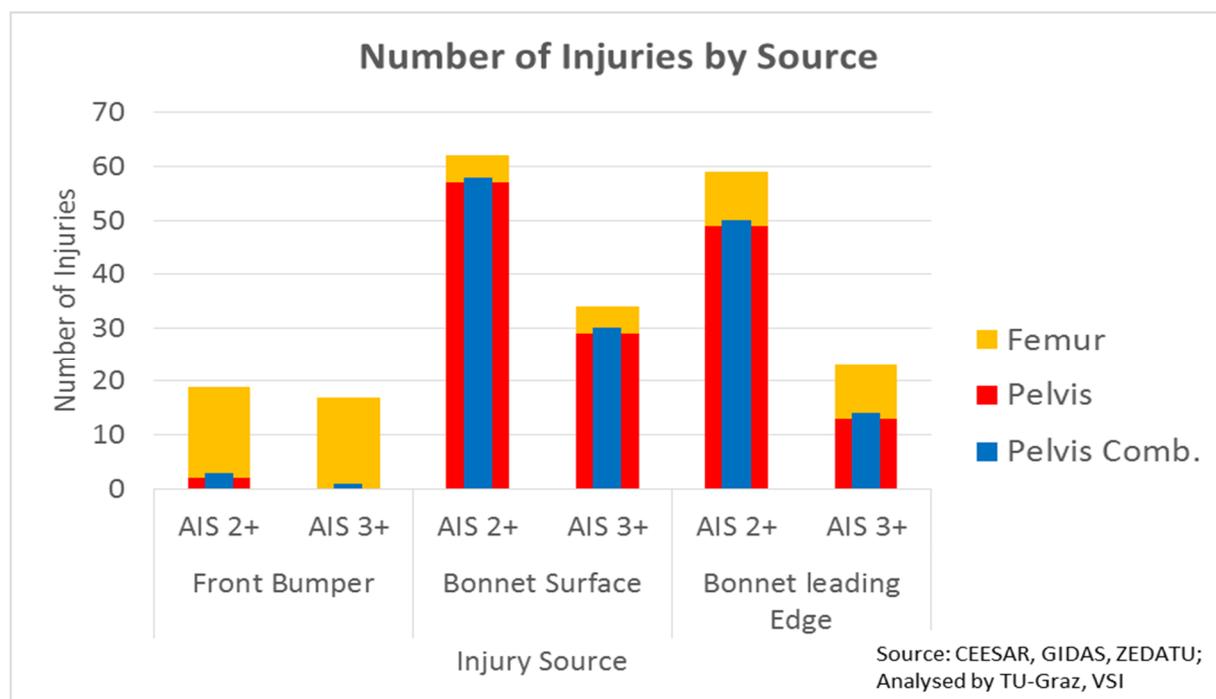


Abbildung 51: Verletzungshäufigkeit nach Fahrzeugfrontelementen

Bei Frakturen des Oberschenkelknochens, verursacht durch die Stoßstange des Fahrzeugs, konnten vorwiegend Frakturen der Kondylen und des Oberschenkelschafts festgestellt werden (Abbildung 52). Frakturen, welche durch die Fronthaube selbst verursacht wurden, liegen nur in sehr geringer Anzahl vor. Am Häufigsten waren hier Frakturen des Oberschenkelhalses und Oberschenkelschafts zu beobachten. Gesplitterte, offene oder verschobene Brüche des Oberschenkelknochens konnten ausschließlich der Fronthaubenkante zugeordnet werden.

Bei Frakturen des knöchernen Beckens, verursacht durch die Fronthaube selbst, konnten vorwiegend offene, verschobene oder gesplitterte Brüche der Struktur des Beckens festgestellt werden. Ebenso konnten speziell für AIS 3+ Verletzungen häufig Sprengungen der Schambeinfuge und Frakturen der Iliosakralgelenks beobachtet werden. Durch die Fronthaubenkante konnte gegenüber Verletzungen, welche durch die Fronthaube selbst hervorgerufen wurden, vermehrt Frakturen beobachtet werden, bei denen es zu erheblichen Deformationen des Beckens mit einer Gefäßstörung, oder einem großflächigen retroperitonealem Hämatom gekommen ist. Frakturen des knöchernen Beckens, welche einem Anprall an die Stoßstange zuzuordnen waren, konnten in keinem relevanten Ausmaß festgestellt werden und wurden in nachstehender Grafik nicht berücksichtigt.

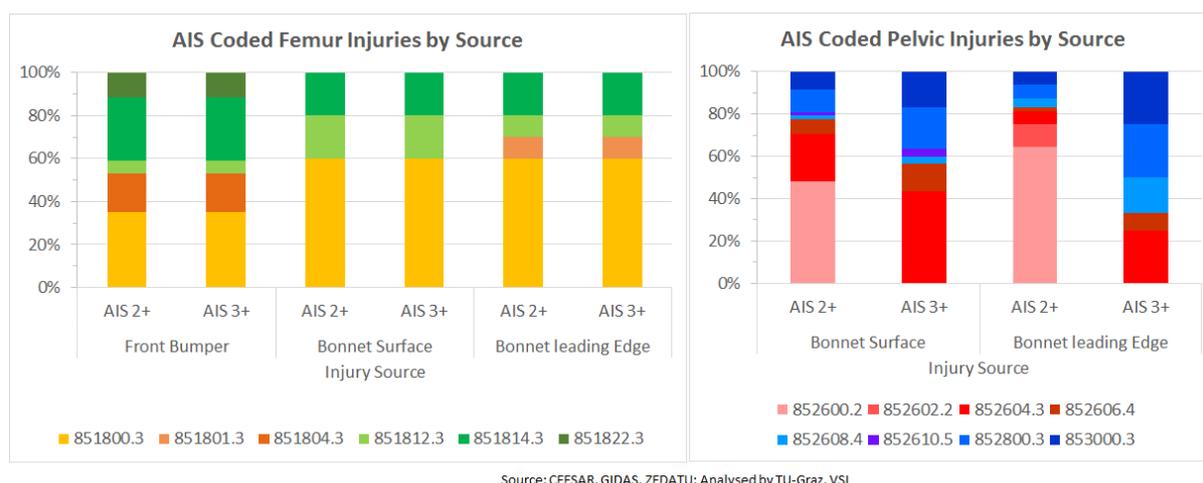


Abbildung 52: Detaillierte Verletzungsbetrachtung bezogen auf die verursachenden Frontelemente

Bezüglich des verletzungsverursachenden Fahrzeugfrontelementes wird speziell für die Fronthaube keine Unterscheidung gemacht, ob der Anprall in der Mitte der Fronthaube oder an den steiferen seitlichen Außenteilen erfolgte. Jedoch erfolgt in der Datenaufnahme eine Einteilung nach der Anprallregion an der Fahrzeugfront.

7.3.2 Verletzungshäufigkeit nach der Anprallregion am Fahrzeug

Bei AIS 2+ Verletzungen erfolgte in 39% der Fälle, der Anprall des Fußgängers an das Fahrzeug an der rechten äußeren Seite (Abbildung 53). In 20% der Fälle erfolgte der Anprall rechts zentral vom Fahrzeug, in 17% der Fälle links zentral vom Fahrzeug. Bei 24% der in der Datenbank enthaltenen Fußgängerunfälle erfolgte der Anprall an der linken äußeren Fahrzeugseite.

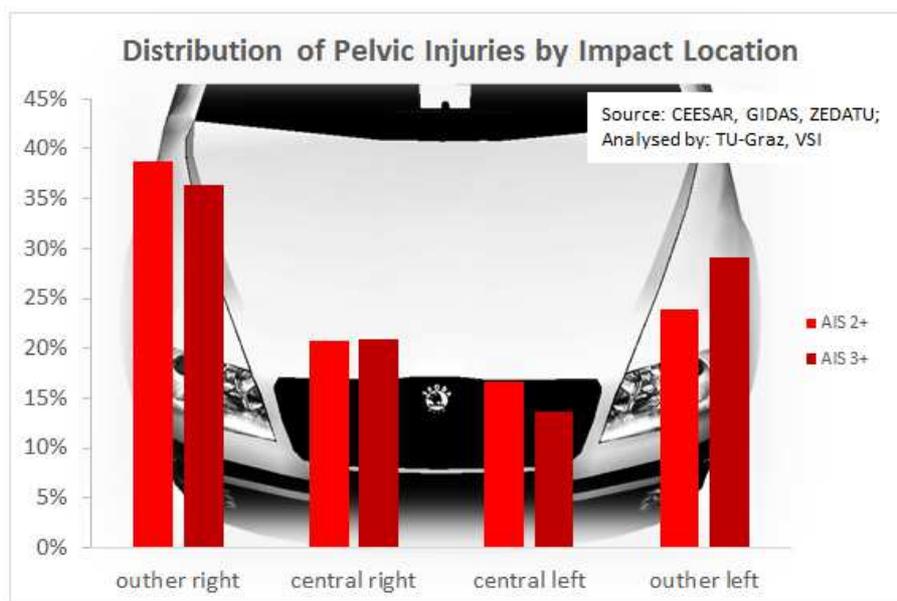


Abbildung 53: Häufigkeitsverteilung nach Anprallregion am Fahrzeug

Die zuvor festgestellte Tatsache, dass im vorhandenen Datensatz Frakturen des Beckens am Häufigsten durch die Fronthaube selbst verursacht wurden gefolgt von der Fronthaubenkante, lässt sich damit relativieren. Die Verteilung nach Anprallregionen zeigt deutlich, dass der Kontakt zwischen Fußgänger und Fahrzeug vermehrt seitlich vom Fahrzeug passiert. In diesem Bereich weist auch die Motorhaube selbst eine höhere Steifigkeit auf bzw. erfolgt dort der Übergang in steifere Strukturen über dem Radkasten (vgl. Abbildung 53).

Einfluss auf diese Verteilung, insbesondere auf die Häufigkeit an Verletzungen durch einen Anprall an der rechten Fahrzeugseite, hat auch die Bewegungsrichtung und Bewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers zum Unfallzeitpunkt, dazu nachstehend einige Fakten.

7.3.3 Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit des Fußgängers zum Zeitpunkt des Unfalls

In Abbildung 54 sind die jeweiligen Gehrrichtungen des Fußgängers von der Position des Fahrzeuglenkers aus gesehen dargestellt. In ca. 80-90% der Fälle erfolgt ein seitlicher Anstoß des Fußgängers durch die Fahrzeugfront. Von einem seitlichen Anprall wird hier grundsätzlich

gesprochen, wenn der Fußgänger sich zum Zeitpunkt des Anstoßes in einer Position 2-4 Uhr oder 8-10 Uhr befand. Die Gehrichtung von rechts nach links ist die am häufigsten wiederzufindende. Gehrichtungen von 12 Uhr sind in der Kategorie Pelvis kaum anzutreffen (5%), bei der Kategorie Femur treten diese jedoch überdurchschnittlich häufig auf und liegen etwa bei 17%.

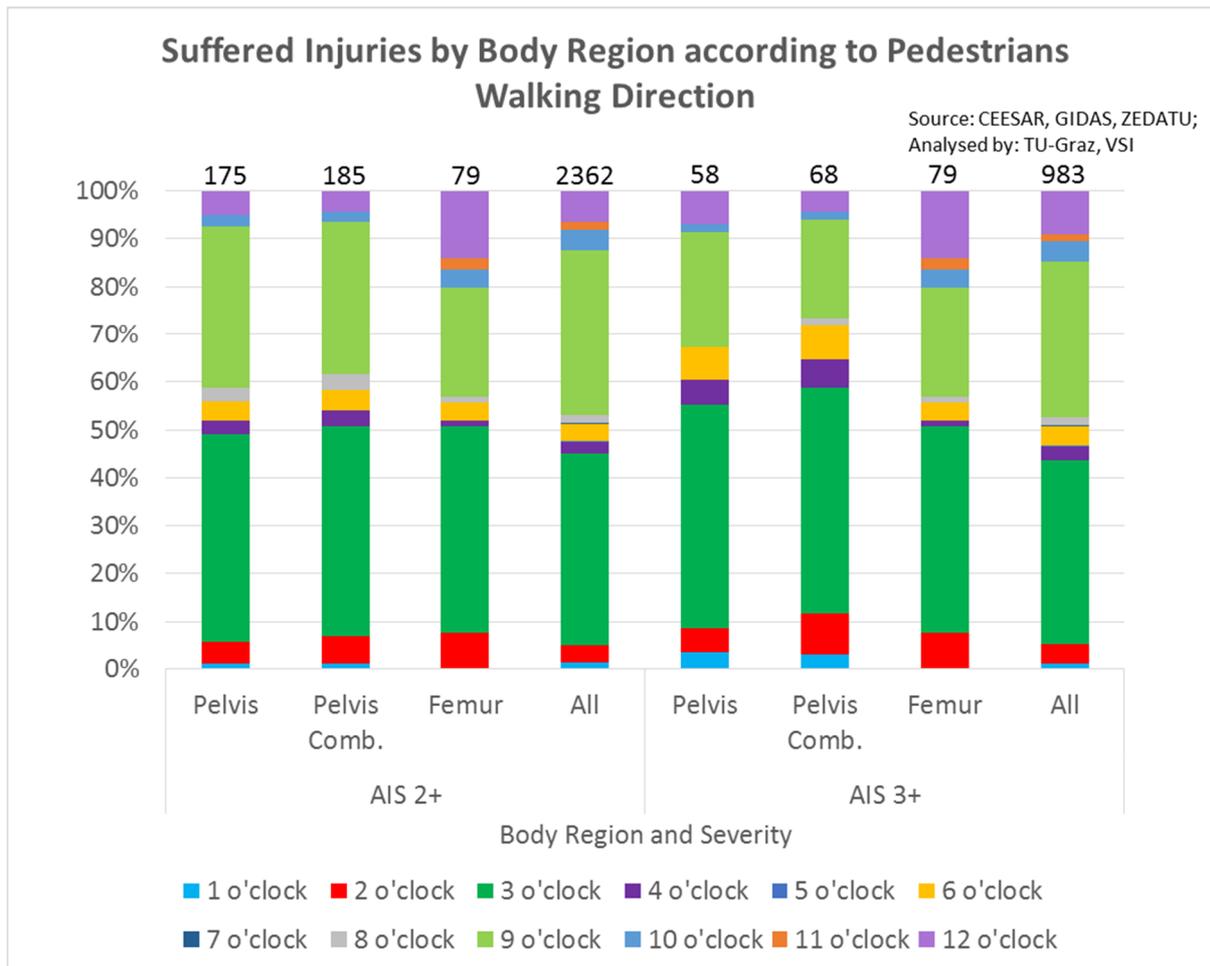


Abbildung 54: Gehrichtung des Fußgängers zum Zeitpunkt des Fahrzeuganpralls

Ebenfalls kann anhand der verfügbaren Datensätze eine Aussage zur Bewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers gemacht werden. So kann im speziellen festgestellt werden, ob dieser zum Zeitpunkt des Unfalls lief, ging oder gestanden war und auf welchem Niveau in diesen Fällen die durchschnittliche Anprallgeschwindigkeit lag. Bezogen auf alle AIS 2+ und AIS 3+ Kategorien kann festgestellt werden, dass sich der Fußgänger in etwa 73–80% der dokumentierten Verletzungsfälle in einer gehenden Bewegung befand. Der Anteil von Verletzungen die verursacht wurden während der Fußgänger auf der Fahrbahn stand ist sehr gering. Für Femur Verletzungen gibt es dazu keine dokumentierten Fälle. Bei Beckenverletzungen des Schweregrads AIS 3+ hingegen beträgt der Anteil etwa 9% und stellt mit Abstand den höchsten Anteil im Vergleich zu den anderen Kategorien dar. Verletzungen die entstanden während sich der Fußgänger in einer laufenden Bewegung befand, nehmen im vorhandenen Datenbestand einen Anteil zwischen 17% und 24% ein. Bei Pelvis Verletzungen

der Schwere AIS 2+ ist der höchste Anteil mit etwa 24% zu beobachten. Signifikante Unterschiede in der Fortbewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers, bezogen auf die einzelnen Verletzungsklassen und Verletzungsschweren konnten jedoch innerhalb eines Vertrauensniveaus von 95% nicht gefunden werden.

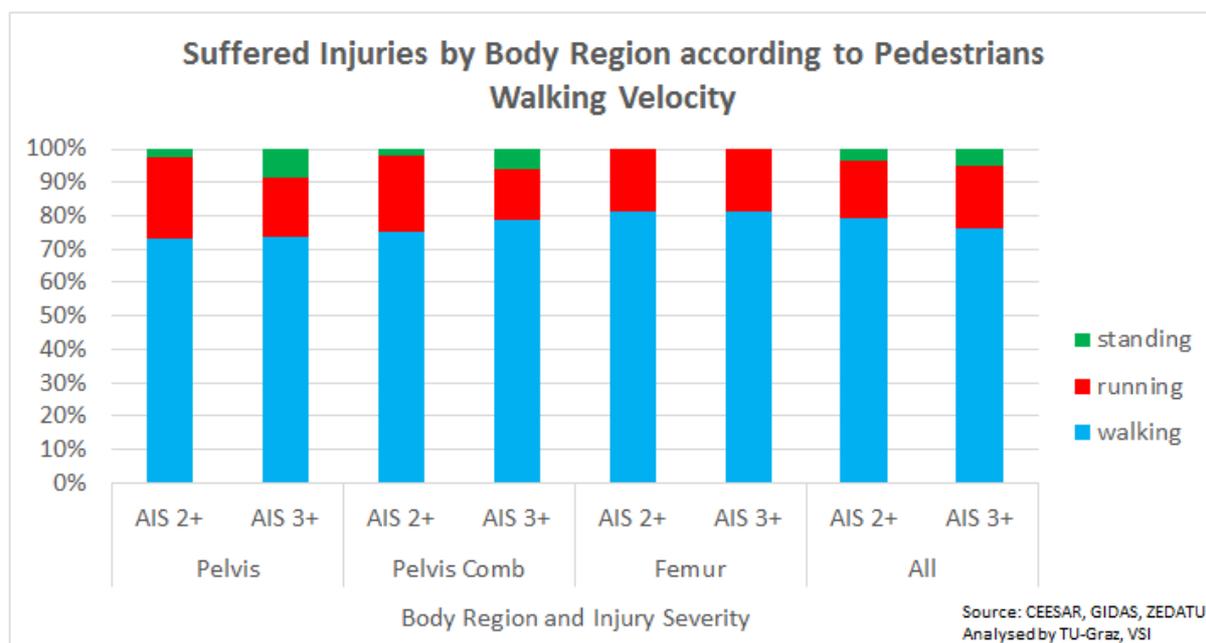


Abbildung 55: Bewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers zum Zeitpunkt des Fahrzeuganpralls

Zur Geschwindigkeit des Fahrzeugs hingegen kann gesagt werden, dass für alle AIS 2+ Kategorien ein signifikanter Unterschied in der Anprallgeschwindigkeit besteht. Personen die zum Zeitpunkt des Unfalls liefen, wurden durchschnittlich mit signifikant höheren Geschwindigkeiten angefahren. Dies ist ebenfalls bei AIS 3+ Verletzungen gültig, mit Ausnahme der Kategorie Pelvis. Hier kann lediglich von einem Trend hin zu höheren Geschwindigkeiten gesprochen werden.

7.4 Einfluss der Fahrzeugfrontgeometrie auf Fußgängerletzungen

Um neben dem Einfluss der Fahrzeugfrontelemente Stoßstange, Fronthaubenkante und Fronthaube Aussagen auf Beckenverletzungen zu treffen, erfolgt eine Analyse des Frontdesigns über die Markteinführungsperioden. Ein Vergleich der Fronthaubenkantenhöhe und Stoßstangenhöhe wird jeweils über die Zeitperioden für Fahrzeuge der Kategorie „Large & Small Family Car“ und „Small MPV/ Supermini“ angestellt.

Die mittleren Werte für die Kollisionsgeschwindigkeiten, für die Fronthaubenkantenhöhe und die Stoßstangenhöhe der in Fußgängerunfälle verwickelten Fahrzeuge sind in Abbildung 56 dargestellt. Aufgetragen sind die Werte zum einen für Verletzungen der Kategorie AIS 2+ Pelvis Combined und zum anderen wurden die Geometrien in Bezug zu allen Verletzungen der Schwere AIS 2+, unabhängig von der Körperregion betrachtet. Mit Dreiecken markierte Werte

stellen signifikante Unterschiede zum Vertrauensniveau von 95% dar. Bis zu einem Signifikanzwert von $p=0,20$ wird von einem Trend hin zur Abweichung der verglichenen Mittelwerte gesprochen. Sind in der Tabelle keine farblich hinterlegten Werte eingetragen, wird weder von signifikanten Unterschieden, noch von Trends gesprochen, es sind keine statistischen Unterschiede der verglichenen mittleren Werte feststellbar.

Für den Markteinführungszeitraum 2005-2009 liegen nur Daten aus einer Datenbank in geringem Umfang vor. Diese sind in strichliert dargestellt. Ebenfalls sind keine Daten bezüglich der Höhe der Fronthaubenkante und der Höhe der Stoßstange für Fahrzeuge der Klasse „Small MPV/ Supermini“ im Markteinführungszeitraum von 2005-2009, spezifisch auf Pelvis- oder Pelvis Combined-Verletzungen bezogen, vorhanden.

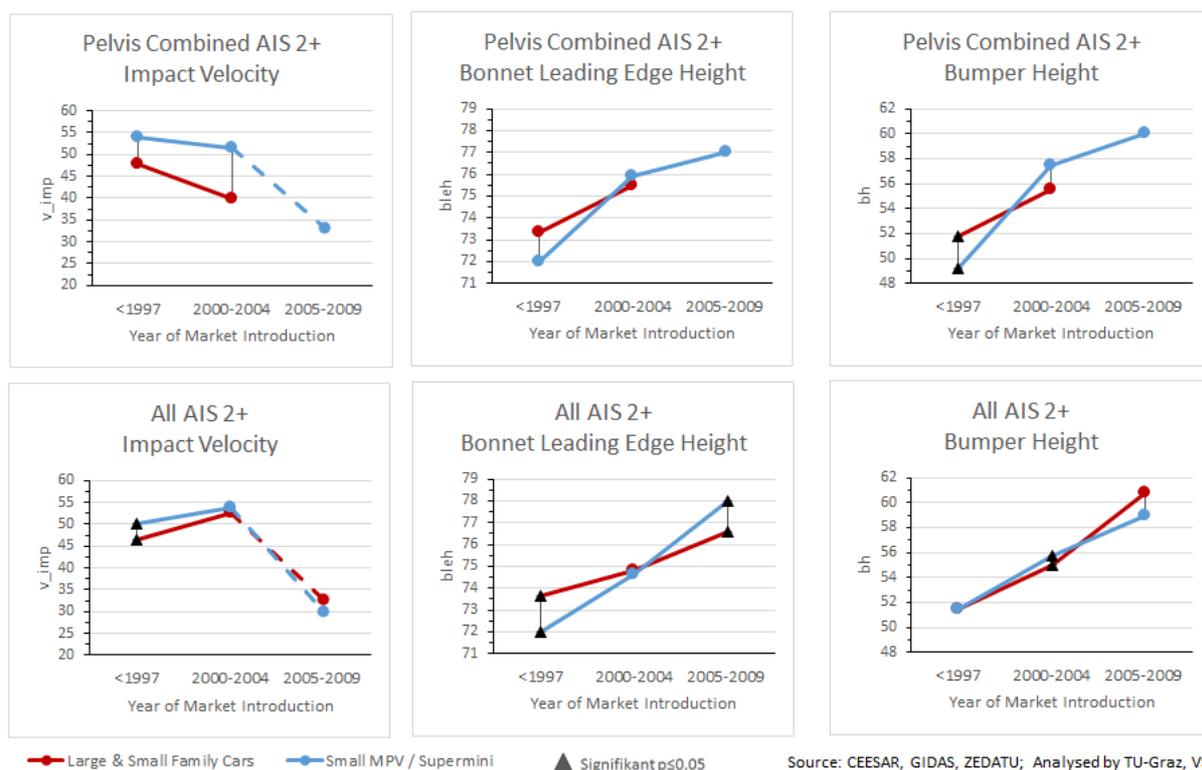


Abbildung 56: Entwicklung des Frontdesigns der Fahrzeugklassen „Large & Small Family Car“ und „Small MPV/Supermini“ über die Markteinführungsperioden

Tabelle 17: Stichprobenumfang und signifikante Unterschiede der Mittelwerte

Pelvis Combined AIS 2+	v_imp [km/h]			bleh [cm]			bh [cm]		
Year of Market Introduction	<1997	2000-2004	2005-2009	<1997	2000-2004	2005-2009	<1997	2000-2004	2005-2009
Large & Small Family Cars [n]	72	13	0	71	13	0	72	13	0
Small MPV / Supermini [n]	22	21	9	19	19	9	19	19	9
p-value	0,08	0,06*	-	0,14	0,39	-	<0,01	0,15	-
All AIS 2+	v_imp [km/h]			bleh [cm]			bh [cm]		
Year of Market Introduction	<1997	2000-2004	2005-2009	<1997	2000-2004	2005-2009	<1997	2000-2004	2005-2009
Large & Small Family Cars [n]	854	254	27	852	235	27	857	235	27
Small MPV / Supermini [n]	372	154	40	313	138	40	313	138	40
p-value	<0,01	0,3	0,25	<0,01	0,34	0,05	0,43	0,05	0,06

* kein gesichertes Ergebnis aufgrund der vorhandenen Datenqualität

Deutlich zu erkennen ist über die Markteinführungsperioden von <1997, über die Periode 2000-2004 und 2005-2009 ein stetiger Anstieg in der montierten Höhe der Fahrzeugfrontelemente Haubenkante und Stoßstangenkante (Abbildung 56).

Bei AIS 2+ Verletzungen der Kategorie Pelvis Combined, ist zwischen den Fahrzeugklassen LSFC und SMPS ein signifikanter Unterschied in der Höhe der Fronthaubenkante feststellbar. Bei LSFC Fahrzeugen liegt diese im Mittel höher als bei SMPS Fahrzeugen. In der Markteinführungsperiode 2000-2004 ist hingegen ein gegenteiliger Trend zu beobachten, hier weist das Design von SMPS Fahrzeugen durchschnittlich höhere Fronthaubenkanten in Bezug zu LSFC Fahrzeugen auf.

Geht man von allen in der Datenbank erfassten Verletzungen, unabhängig von der Körperregion an der sie aufgetreten sind aus, kann die zuvor erwähnte Tendenz zu höher gelegenen Fronthaubenkanten bei SMPS Fahrzeugen für die Fahrzeugbetrachtungsperiode 2000- 2004 bestätigt werden. Ebenfalls ist ein Trend für Fahrzeuge mit Markteinführung von 2005-2009 hin zu höheren Fronthaubenkanten nachzuweisen. Tendenziell liegt hier die Fronthaubenkante bei LSFC Fahrzeugen wieder höher als bei Fahrzeugen der Kategorie SMPS.

Für die montierte Höhe der vorderen Stoßstangen ergibt sich ein ähnliches Bild. Bei Fahrzeugen der Markteinführungsperiode <1997 ist diese bei LSFC Fahrzeugen signifikant höher montiert als bei SMPS Fahrzeugen. In der Vergleichsperiode 2000-2004 kann kein Unterschied in den montierten Höhen festgestellt werden. Bei Fahrzeugen der Markteinführungsperiode von 2005-2009 hingegen ist das Höhenniveau der Frontstoßstange bei Fahrzeugen der Kategorie SMPS signifikant höher als bei LSFC Fahrzeugen.

SMPS Fahrzeugen mit Markteinführungsperiode vor 1997 konnte gegenüber LSFC Fahrzeugen eine erhöhte Sicherheit in Bezug auf Beckenverletzungen des Fußgängers eingeräumt werden. Auch bei AIS 2+ Verletzungen der Kategorie Pelvis Combined schnitten SMPS Fahrzeuge besser ab.

In der betrachteten Markteinführungsperiode 2000-2004 ist eine gegenteilige Situation zu beobachten. Die Fahrzeugfronten von Fahrzeugen der Kategorie LSFC scheinen sich hier positiver auf den Schutz vor Verletzungen der Kategorie Pelvis auszuwirken. Ebenfalls in der AIS 2+ Verletzungskategorie Pelvis Combined schnitten LSFC Fahrzeuge besser ab als SMPS Fahrzeuge.

Betrachtet man unter diesen Voraussetzungen die durchschnittlichen Höhen der Fronthaubenkanten (Abbildung 56), kann festgestellt werden, dass für den jeweiligen positiveren Fall, die Fronthaubenkante signifikant oder zumindest tendenziell niedriger liegt. Somit scheint es aus rein geometrischer Sicht einen starken Zusammenhang zwischen der Fronthaubenhöhe und der Häufigkeit von Frakturen des knöchernen Beckens zu geben. Je höher die Fronthaubenkante eines Fahrzeugs gelegen war, desto schlechter erwies sich die Situation eines angefahrenen Fußgängers in Bezug auf Frakturen des knöchernen Beckens.

Aus den vorhandenen Daten und den jeweiligen Signifikanzen kann allerdings eine derartige Feststellung bezüglich der Stoßstangenhöhe nicht getätigt werden.

7.5 Risikogruppen

In diesem Kapitel wird die Körpergröße, das Körpergewicht und das durchschnittliche Alter von Fußgängern betrachtet, welche im Zuge eines Verkehrsunfalls knöcherner Verletzungen des Beckens oder des Oberschenkels erlitten. Die im Datensatz von CEESAR, GIDAS und ZEDATU enthaltenen Angaben zur Größe und Gewicht sind genderlos. Diese auszuwertenden Merkmale sind allerdings zwischen den Geschlechtern sehr unterschiedlich. In Österreich beträgt die Durchschnittsgröße von Männern 178 cm und das durchschnittliche Körpergewicht 81 kg. Frauen sind im Durchschnitt 167 cm groß bei einem Körpergewicht von 67 kg [62]. Da eine getrennte Betrachtung der Merkmale in Bezug auf Männer und Frauen aufgrund der Datensituation nicht möglich ist, werden sie hier gemeinsam betrachtet. Gestützt auf den zentralen Grenzwertsatz, werden die Merkmale Körpergröße und Körpergewicht als normalverteilt betrachtet. Nachstehende Thesen können daraus abgeleitet werden.

7.5.1 Wahrscheinlichkeit von Pelvis Verletzungen

AIS 2+ Verletzungen des knöchernen Beckens treten im betrachteten Datenbestand bei Fußgängern mit einer durchschnittlichen Körpergröße von 161,6 cm auf. In Bezug auf alle anderen nach AIS dokumentierten AIS 2+ Verletzungen kann eine durchschnittliche Körpergröße für Verletzungen von 164 cm angegeben werden. Dieser Unterschied ergibt sich zum Signifikanzniveau von 6%. Bei AIS 3+ Verletzungen ist eine Erhöhung der durchschnittlichen Körpergröße auf 166,6 cm feststellbar. Bei der Analyse aller anderen verletzten Körperregionen ist der Fußgänger 162,5 cm groß. Ein signifikanter Unterschied mit $p < 0,01$ ist dabei gegeben. Abbildung 57 zufolge liegt die Wahrscheinlichkeit, dass eine AIS 2+ Pelvisverletzung von einem Fußgänger der kleiner als 166 cm erlitten worden ist, bei etwa 60%. Für alle anderen kategorisierten AIS 2+ Verletzungen gemeinsam ist dieser Wert mit 51% anzugeben. Der Normalverteilung folgend kann für AIS 3+ Verletzungen beobachtet werden, dass die Wahrscheinlichkeit, dass die verletzte Person kleiner als 165 cm ist, bei 45% liegt. Bei Verletzungen aller anderen Körperregionen liegt die Wahrscheinlichkeit bei 55%.

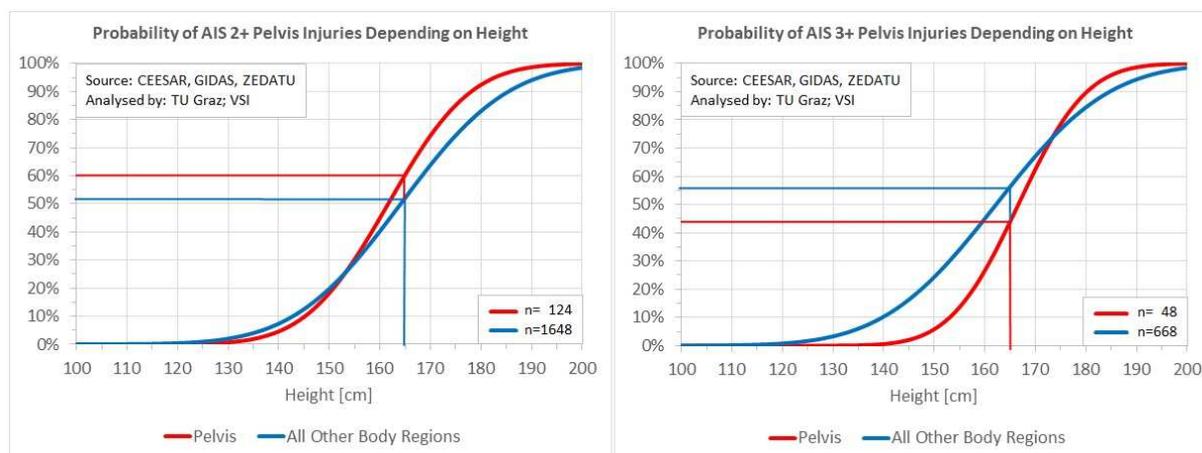


Abbildung 57: Wahrscheinlichkeit von Pelvis Verletzungen abhängig von der Körpergröße

Stellt man selbige Betrachtung in Bezug auf das Körpergewicht an, kann nach Abbildung 58 für AIS 2+ Verletzungen kaum ein Unterschied in den Wahrscheinlichkeitswerten festgestellt werden. Das Durchschnittsgewicht von Fußgänger, die eine Pelvisverletzung erleiden, beträgt rund 65 kg. Für alle anderen Verletzungen zusammengefasst kann das Durchschnittskörpergewicht mit 67 kg angegeben werden ($p=0,13$).

Bei AIS 3+ Verletzungen ist eine Erhöhung des durchschnittlichen Körpergewichts auf 71 kg feststellbar. Bei der Analyse aller anderen verletzten Körperregionen ist der Fußgänger im Mittel 66 kg schwer ($p<0,01$).

Für AIS 2+ Verletzungen des knöchernen Beckens oder allen anderen Körperregionen zusammengefasst ist die Wahrscheinlichkeit, dass die erlittene Verletzung einem Fußgänger wiederfährt der ein geringeres Körpergewicht als 70 kg aufweist, etwa bei 60%.

Für AIS 3+ Verletzungen kann hingegen mit einer Wahrscheinlichkeit von rund 48% angegeben werden, dass die erlittene Pelvisverletzung von einem Fußgänger erlitten wurde der ein Körpergewicht von weniger als 70 kg aufweist. Bezogen auf alle anderen Körperregionen kann dieses Körpergewicht zur 48% Marke mit 66 kg angegeben werden.

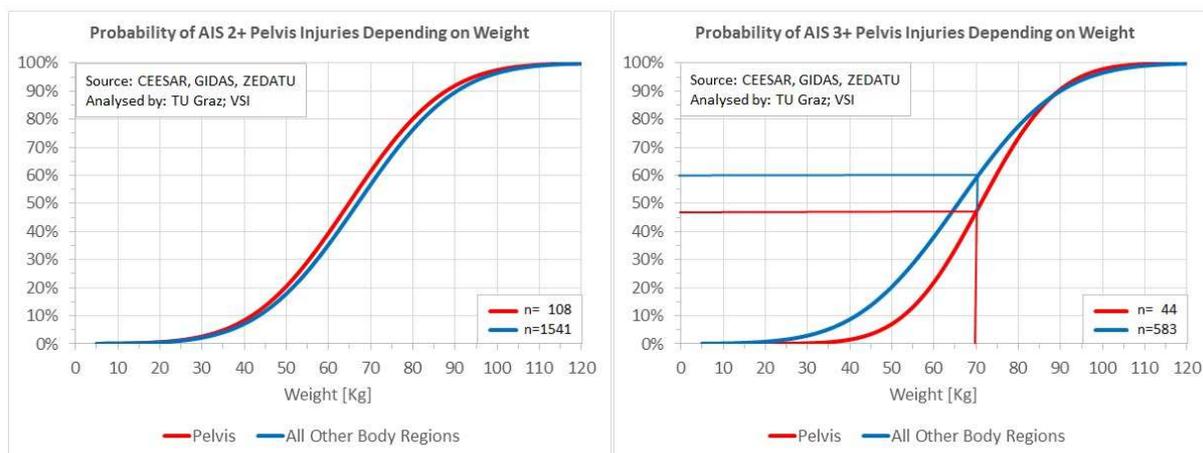


Abbildung 58: Wahrscheinlichkeit von Pelvis Verletzungen abhängig vom Körpergewicht

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass im Vergleich von Pelvisverletzungen mit allen anderen erlittenen AIS 2+ Verletzungen die Wahrscheinlichkeit erhöht ist, dass Personen mit geringerer Körpergröße und geringerem Körpergewicht betroffen sind.

Das durchschnittliche Alter stellt sich bei AIS 2+ Pelvisverletzungen etwa mit 61 Jahren ein, während es auf Verletzungen aller anderen möglichen Körperregionen bezogen lediglich 52 Jahre beträgt. Diese Differenz kann als statistisch signifikant betrachtet werden ($p<0,01$).

Bei AIS 3+ Verletzungen ist hingegen bis zu einer Körpergröße von 175 cm gegenteiliges zu bemerken. Hier ist die Körpergröße von Personen die eine Verletzung des knöchernen Beckens erlitten haben, im Vergleich zu allen anderen Verletzungskategorien zusammen erhöht. Das Gewicht der verletzten Personen ist im Vergleich dazu ebenfalls erhöht. Das durchschnittliche Alter stellt sich bei AIS 3+ Pelvisverletzungen etwa mit 64 Jahren ein, während es in Hinblick auf Verletzungen aller anderen möglichen Körperregionen lediglich 54 Jahre beträgt ($p<0,01$).

Die jeweiligen Werte zur Signifikanz sind in Tabelle 17 zusammenfassend dargestellt. Im untersuchten Datensatz kann weiters beobachtet werden, dass Frauen vermehrt für Beckenverletzungen anfällig sind. Bei AIS 2+ und AIS 3+ beträgt der Frauenanteil rund 60%. In den gesamten Unfalldaten über alle Körperregionen hinweg sind für AIS 2+ Verletzungen 49% und für AIS 3+ Verletzungen 46% weibliche Personen enthalten.

Tabelle 18: Pelvisverletzungen verglichen mit dokumentierten Verletzungen aller anderen Körperregionen; Mittelwerte, Standardabweichungen, Fallzahlen und Signifikanzwerte

AIS Severity		AIS 2+		AIS 3+	
Body Region		Pelvis	No Pelvis	Pelvis	No Pelvis
Weight	μ	64,78	66,88	71,08	65,70
	σ	17,97	18,34	14,40	19,99
	n	108	1514	39	588
	p-value	0,13		0,05	
Height	μ	161,63	164,11	166,63	162,21
	σ	12,80	16,39	10,60	17,17
	n	124	1648	48	668
	p-value	0,06		0,05	
Age	μ	60,89	51,42	63,65	53,20
	σ	23,87	25,54	20,21	27,40
	n	180	2290	63	968
	p-value	<0,01		<0,01	

7.5.2 Wahrscheinlichkeit von Femurverletzungen

Frakturen des Oberschenkelknochens treten bei Unfällen mit Fußgängern von einer durchschnittlichen Körpergröße von 155 cm und einem durchschnittlichen Körpergewicht von 54 kg auf. Bei allen anderen verletzten Körperregionen können für AIS 2+ Verletzungen Durchschnittswerte von 164 cm und 67 kg angegeben werden. Für AIS 3+ Verletzungen sind diese mit 162 cm und 66 kg festgehalten. Die jeweils festgestellten Unterschiede können mit einem p-Wert von <0,01 als signifikant betrachtet werden (Tabelle 19).

Betrachtet man nach Abbildung 59 wiederum beispielhaft eine 165 cm große Person, kann in beiden Fällen (AIS 2+ und AIS 3+) festgestellt werden, dass unter Berücksichtigung der Normalverteilung die Wahrscheinlichkeit etwa 68% beträgt, dass eine erlittene Femurverletzung von einem Fußgänger erlitten wurde, der eine Körpergröße kleiner als 165 cm aufweist. (Wahrscheinlichkeitswerte aller anderen Körperregionen zusammen: 51% kleiner als 165 cm für AIS 2+, 55% kleiner als 165 cm für AIS 3+).

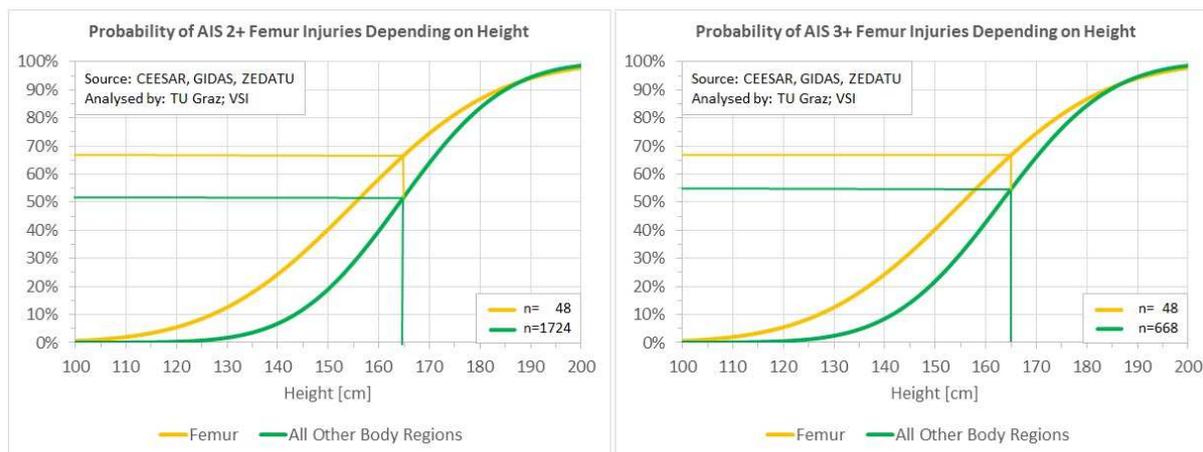


Abbildung 59: Wahrscheinlichkeit von Femurverletzungen abhängig von der Körpergröße

In Abbildung 60 ist wiederum beispielhaft eine Person mit 70 kg Körpergewicht eingezeichnet. Die Wahrscheinlichkeit dass eine verletzte Person mit einer Oberschenkelfraktur ein geringeres Gewicht als 70 kg aufweist beträgt ca. 80%. Bei allen anderen Verletzungen beträgt diese Wahrscheinlichkeit für AIS 2+ sowie AIS 3+ Verletzungen lediglich 56%.

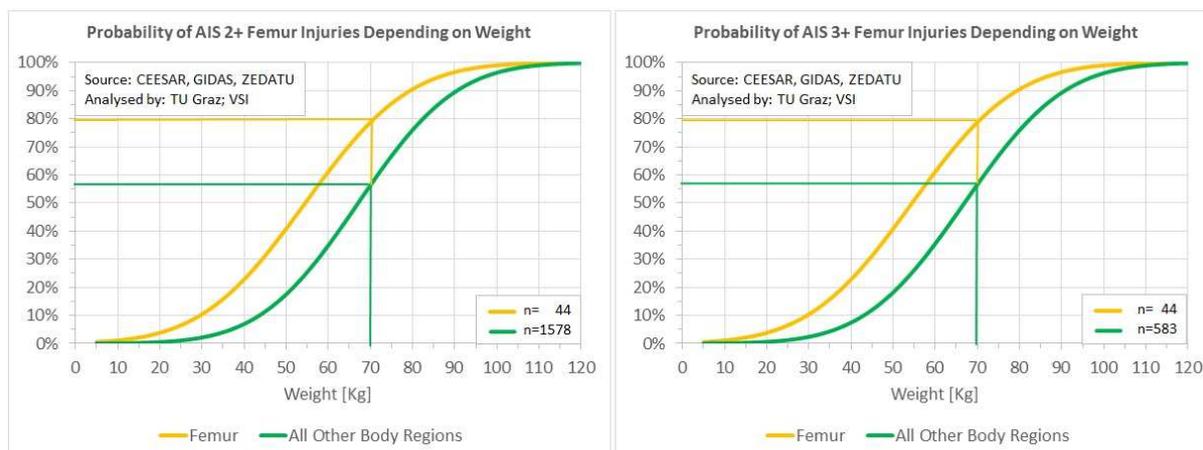


Abbildung 60: Wahrscheinlichkeit von Femurverletzungen abhängig vom Körpergewicht

Alle angegebenen Mittelwerte bezogen auf Oberschenkelverletzungen unterscheiden sich jeweils signifikant bei einem Vertrauensniveau von >99% zur Kategorie „All Other Body Regions“. Das durchschnittliche Alter der verletzten Personen ist bei Femurfrakturen 45 Jahre. Bei den verglichenen anderen Verletzungen liegt das Alter für AIS 2+ Verletzungen bei 52 Jahren und für AIS 3+ Verletzungen bei rund 55 Jahren. Im betrachteten Datensatz zu Oberschenkelfrakturen sind ca. 57% weibliche Personen erfasst. In den gesamten Unfalldaten selbst sind für AIS 2+ Verletzungen 49% und für AIS 3+ Verletzungen 46% weibliche Personen enthalten.

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass Femurfrakturen vermehrt von kleineren und leichteren Personen erlitten werden. Ebenso sind von Femurfrakturen vermehrt jüngere Personen betroffen die in etwa 60% der Fälle weiblich sind.

Tabelle 19: Femurverletzungen verglichen mit dokumentierten Verletzungen aller anderen Körperregionen; Mittelwerte, Standardabweichungen, Fallzahlen und Signifikanzwerte

AIS Severity		AIS 2+		AIS 3+	
Body Region		Femur	No Femur	Femur	No Femur
Weight	μ	54,50	67,08	54,50	66,90
	σ	19,43	18,18	19,43	18,40
	n	44	1578	44	583
	p-value	<0,01		<0,01	
Height	μ	155,38	164,18	155,38	163,02
	σ	22,14	16,39	22,14	17,19
	n	48	1724	48	668
	p-value	<0,01		<0,01	
Age	μ	44,64	52,36	44,64	54,60
	σ	28,40	25,54	28,40	27,41
	n	79	2391	79	952
	p-value	<0,01		<0,01	

8. ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

AIS 2+ Verletzungen von Fußgängern, welche durch eine Kollision mit einem Fahrzeug erlitten wurden, betrafen im analysierten Datenmaterial in 10,4% das knöcherne Becken (7,3%) oder den Oberschenkelknochen (3,1%). Bei AIS 3+ Verletzungen beträgt der Anteil an Frakturen des Beckens und des Oberschenkelknochens bereits 13,8% (Pelvis 6,3%, Femur 7,5%).

Bezogen auf alle Unfallfahrzeuge (ohne Unterteilung nach Fahrzeugtyp) wurde die Tendenz festgestellt, dass Fußgänger bei Verkehrsunfällen mit neueren Fahrzeugmodellen relativ häufiger eine Fraktur des knöchernen Beckens erleiden als bei Kollisionen mit Fahrzeugen welche vor dem Jahr 1997 auf den Markt kamen.

Bei Fahrzeugmodellen mit Markteinführung 2000-2004 traten allgemein Verletzungen, bezogen auf alle Körperregionen, erst mit höhere Anprallgeschwindigkeiten auf, als bei Fahrzeugmodellen mit Markteinführungsdatum vor 1997. Bei Pelvis- und Femurverletzungen im Detail ist ein gegenteiliger Trend zu beobachten. Verglichen mit dem Markteinführungszeitraum vor 1997 treten Frakturen dieser Kategorie bei neueren Modellen bereits bei geringeren Anprallgeschwindigkeiten auf. Stellt man die Überlegung an, dass je höher die durchschnittliche Anprallgeschwindigkeit ist, ab welcher eine Verletzung vom Fußgänger der jeweiligen Schwere erlitten wurde, desto positiver stellt sich die Fahrzeugfront des Unfallfahrzeugs in Bezug auf den Fußgängerschutz dar. So kann schlussgefolgert werden, dass sich vom Vergleichszeitraum vor 1997 bis zum Vergleichszeitraum 2000-2004 die Fahrzeugfront in Bezug auf alle Verletzungen und Körperregionen tendenziell hin zu mehr Sicherheit für den Fußgänger entwickelt hat. Bei der Betrachtung von Frakturen des Beckens und des Oberschenkels hingegen ist gegenteiliges zu beobachten.

Betrachtet man die Unfalldaten in Bezug auf den Fahrzeugtyp, kann „Large & Small Family Cars“ im Vergleich zu „Small MPVs/Superminis“ der Markteinführungsperiode vor 1997 ein Trend zum erhöhten Risiko (für Fußgänger) eine Beckenverletzung zu erleiden festgestellt werden. Im Markteinführungszeitraum 2000-2004 stellt sich diese Situation gegenteilig dar. In dieser Betrachtungsperiode kann Fahrzeugen der Klasse „Large & Small Family Car“ mehr Sicherheit für den Fußgänger in Bezug auf Verletzungen des knöchernen Beckens bescheinigt werden als den Fahrzeugen der Klasse „Small MPV/Supermini“.

Bezüglich der Geometrie der Frontstruktur der Fahrzeuge, speziell in Bezug auf die Fronthaubenkante, konnte bei „Large & Small Family Cars“ und „Small MPVs/Superminis“ festgestellt werden, dass es aus rein geometrischer Sicht einen starken Zusammenhang zwischen der Fronthaubenhöhe und der Häufigkeit von Frakturen des knöchernen Beckens zu geben scheint. Je höher die Fronthaubenkante eines Fahrzeugs gelegen war, desto schlechter stellte sich die Situation eines angefahrenen Fußgängers in Bezug auf Frakturen des knöchernen Beckens dar. Tendenziell ist weiters eine Zunahme bezüglich Höhe der Fronthaubenkante bei neueren Fahrzeugmodellen zu beobachten.

Eine oftmals angepriesene Reduktion der Verletzungshäufigkeit bezüglich Becken- und Oberschenkelfrakturen durch modernere und rundere Fahrzeugfrontdesigns neuerer Fahrzeugmodelle kann aufbauend auf den vorhandenen Datenbestand nicht bestätigt werden. Vielmehr zeigt die Auswertung tendenziell eine negative Entwicklung bezüglich der Häufigkeit von Pelvis- und Femurverletzungen.

Im Vergleich von AIS 2+ Pelvisverletzungen mit allen anderen erlittenen AIS 2+ Verletzungen kann gesagt werden, dass die Wahrscheinlichkeit, dass Personen mit geringerer Körpergröße und geringerem Körpergewicht betroffen sind, erhöht ist. Das durchschnittliche Alter stellt sich bei AIS 2+ Pelvisverletzungen etwa mit 61 Jahren ein, während es auf Verletzungen aller anderen möglichen Körperregionen bezogen lediglich 52 Jahre beträgt. Bei AIS 3+ Pelvisverletzungen stellt sich das durchschnittliche Alter etwa mit 64 Jahren ein, während es im Hinblick auf Verletzungen aller anderen möglichen Körperregionen lediglich 54 Jahre beträgt. Es sind vermehrt größere (\emptyset 167 cm) und schwerere (\emptyset 71 kg) Personen betroffen. Betrachtet man die Gruppe „Alle anderen Körperregionen“ sind die verletzten Personen durchschnittlich 162 cm groß und haben ein Körpergewicht im Mittel von 66 kg. Ebenfalls kann behauptet werden, dass Frauen vermehrt für Beckenverletzungen anfällig sind. Bei AIS 2+ und AIS 3+ Verletzungen beträgt der Frauenanteil rund 60%. In den gesamten Unfalldaten über alle Körperregionen hinweg sind bei AIS 2+ Verletzungen 49% und bei AIS 3+ Verletzungen 46% weibliche Personen enthalten.

Von Frakturen des Femur (AIS 2+ und AIS 3+) sind durchschnittlich kleinere (\emptyset 155 cm) und leichtere (\emptyset 55 kg) Personen betroffen. Ebenso sind von Femurfrakturen vermehrt jüngere Personen betroffen (\emptyset 44 Jahre) die in etwa 60% der Fälle weiblich sind. Für alle anderen verletzten Körperregionen können diese Durchschnittswerte für AIS 2+ Verletzungen mit 164 cm Körpergröße, 67 kg Körpergewicht und einem Durchschnittsalter von 52 Jahren angegeben werden. Bei AIS 3+ Verletzungen der Gruppe „alle anderen Körperregionen“ sind die verletzten Personen durchschnittlich 163 cm groß, 67 kg schwer und im Mittel 55 Jahre alt.

9. AUSBLICK

Der Hüftimpaktortest gegen die Fronthaubenvorderkante wird mit einer Anprallgeschwindigkeit von bis zu 40 km/h durchgeführt. Aus dem gesammelten und ausgewerteten Datenbestand geht allerdings hervor, dass nur etwa 35% aller Becken- und Femurverletzungen durch Anprallgeschwindigkeiten unter 40 km/h verursacht wurden. Durch die Integration von ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) wie Bremsassistent oder Notbremsassistent könnten Kollisionsgeschwindigkeiten deutlich reduziert werden. Ein Gewinn an Sicherheit für den Fußgänger als ungeschützten Verkehrsteilnehmer wäre dadurch gegeben. Ebenfalls würde der Anpralltest mittels Hüftimpaktor dadurch einen Höheren Prozentsatz an „Real World Fällen“ abdecken können.

Das Durchschnittsalter der deutschen Fahrzeugflotte beträgt etwa 9 Jahre. Fahrzeug-Fußgängerunfälle mit Fahrzeugen der Markteinführung ab 2009 sind deshalb im analysierten Datenbestand kaum enthalten. Eine Abschätzung des Risikos von Pelvis- und Femurverletzungen bei Fußgängern anhand von Realunfalldaten ist somit nicht möglich. Um dennoch Risikoabschätzungen tätigen zu können, wäre eine Möglichkeit sich mit zusätzlichen computerunterstützten Simulationen zu behelfen. So könnte etwa das „Total Human Model for Safety“ (THUMS) zur Realisierung herangezogen werden. Damit kann die gesamte Anatomie des menschlichen Körpers sowie dessen kinematische Eigenschaften genau abgebildet werden. Die Krafteinwirkung auf das menschliche Becken sowie auftretende Beschleunigungswerte bei Kollisionen mit neueren Fahrzeugmodellen könnten somit ermittelt werden. Ein Vergleich mit älteren, sowie auch neuesten Fahrzeugtypen in Bezug auf den Fußgängerschutz wäre demnach möglich.

Aufgrund eines zu geringen Datenbestandes an SUV-Fußgängerunfällen, konnten diese für die aktuellen Datenanalysen nicht berücksichtigt werden. Es zeigte sich, dass die Fronthaubenkantenhöhe einen Einfluss auf die Verletzungshäufigkeit von Fußgängern hat. Je höher die Fronthaubenkante platziert war, desto schlechter erwies sich die Unfallsituation des Fußgängers in Bezug auf Beckenverletzungen. Daraus lässt sich die Notwendigkeit ableiten auch SUVs, welche eine hohe Fronthaubenvorderkante aufweisen, in Analysen mit einzubeziehen. Als Möglichkeit ergibt sich wiederum die oben angeführte Analyse mittels THUMS.

10. ANHANG

Tabelle 20: Verwendete statistische Auswertungsverfahren

Untersuchte Bereiche	Angewendete statistische Auswertverfahren		
Kapitel 7.1.1 Verletzungshäufigkeit nach Markteinführungszeitraum	relative Häufigkeit	Quotenverhältnis	Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest
Kapitel 7.1.2 Anprallgeschwindigkeit bei Fußgängerunfällen	Verteilungsfunktion der Normalverteilung	2-Stichproben t-Test für unverbundene Stichproben	
Kapitel 7.2.1 Verletzungen bezogen auf den Fahrzeugtyp	relative Häufigkeit	Quotenverhältnis	Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest
Kapitel 7.2.2 Verletzungsverursachende mittlere Kollisionsgeschwindigkeit nach Fahrzeugtyp	2-Stichproben t-Test für unverbundene Stichproben	Welch-Test	
Kapitel 7.2.3 Detaillierte Verletzungsbetrachtung bezogen auf die Fahrzeugkategorien	relative Häufigkeit		
Kapitel 7.2.4 Verletzungshäufigkeit nach Markteinführungszeitraum	relative Häufigkeit	Quotenverhältnis	Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest/ F-Test
Kapitel 7.2.5 Mittlere Anprallgeschwindigkeiten über die jeweiligen Markteinführungsperioden	2-Stichproben t-Test für unverbundene Stichproben	Welch-Test	
Kapitel 7.3.1 Verletzungshäufigkeiten nach Fahrzeugfrontelementen	absolute Häufigkeiten	relative Häufigkeiten	
Kapitel 7.3.2 Verletzungshäufigkeit nach der Anprallregion am Fahrzeug	relative Häufigkeit		
Kapitel 7.3.3 Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit des Fußgängers zum Zeitpunkt des Unfalls	relative Häufigkeit		
Kapitel 7.4 Einfluss der Fahrzeugfrontgeometrie auf Fußgängerletzungen	2-Stichproben t-Test für unverbundene Stichproben	Welch-Test	
Kapitel 7.5 Risikogruppen	Verteilungsfunktion der Normalverteilung	2-Stichproben t-Test für unverbundene Stichproben	

11. GLOSSARE

Posterior	Hinterer, hintere, hinteres
Anterior	Voredere, vorderer, vorderes
superior	Oberer, obere, oberes
inferior	Unterer, untere, unteres
Ventral	Am Bauch gelegen, bauchseits
dorsal	Am Rücken gelegen, rückenwärts
medial	Zur Mitte hin
lateral	seitlich
Ipsilateral	Auf der gleichen Körperseite gelegen
Kontralateral	Auf der entgegengesetzten Körperseite gelegen
Fract. Cond.med. fem.	Fraktur des Femur-Condylus an der körperzugewandten Seite
Fract. Capit. Fem.	Fraktur des Femurkopfes
Fract.troch.fem.	Fakturierung des Femur-Trochanters
Fract. Colli. Fem.	Fraktur des Oberschenkelhalses
Fract. Fem.	Fraktur des Oberschenkelschaftes
Fract. Subtroch. Fem.	Fraktur des Femur unterhalb des Trochanters
Fract. Supracond. Fem.	Fraktur des Femur oberhalb der Kondylen
Front bumper	Frontstoßstange
Bonnet surface	Fronthaubenfläche
Bonnet leading edge	Fronthaubenvorderkante
Incidence	Relative Häufigkeit
Odds-Ratio	Quotenverhältnis

12. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

SUV	Sport Utility Vehicle
LSFC	Large & Small Family Cars
SMPS	Small MPV/Supermini
EEVC	European Enhanced Vehicle-Safety Committee
ZEDATU	Zentrale Datenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen
GIDAS	German In-Depth Accident Study
CEESAR	Centre Européen d'Etudes de Sécurité et d'Analyse des Risques
APROSYS	Advanced Protection Systems
THUMS	Total Human Model for Safety
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Tödliche Verkehrsunfälle auf europäischen Straßen und Ziele der Europäischen Union vgl. [4].....	2
Abbildung 2: Verletzte und Getötete Personen auf Österreichs Straßen nach deren Verkehrsbeteiligung vgl. [6]3	
Abbildung 3: Rückgang getöteter Personen im Straßenverkehr von 2001-2012 in ausgewählten europäischen Ländern vgl. [4]. Rot eingezeichnet sind die Anteile an tödlich verunglückten Fußgängern im jeweiligen Betrachtungsjahr bezogen auf das Referenzjahr 2001.	3
Abbildung 4: Tödlich verunglückte Fußgänger in Bezug auf alle Verkehrstopfer des jeweiligen Jahres vgl. [4].....	4
Abbildung 5: Erlittene Verletzungen nach Körperregion und Schweregrad	5
Abbildung 6: Verletzungsverursachende Teile der Fahrzeugfront vgl. [8].....	6
Abbildung 7: Komponententest der Phase II nach Verordnung 2009/78/EG [8].....	7
Abbildung 8: Vermessung der Fronthaubenkantenhöhe [11]	10
Abbildung 9: Vermessung der Stoßstangenhöhe [11]	11
Abbildung 10: Fahrzeugklassifizierung nach APROSYS [16]	12
Abbildung 11: Wesentliche Einflussfaktoren in Bezug auf Fußgängerunfälle und deren Rekonstruktion [18]	14
Abbildung 12: Grafische Begriffsdefinition eines Fußgängerunfalls – Draufsicht [19]	15
Abbildung 13: Grafische Begriffsdefinition eines Fußgängerunfalls - Seitenansicht [19]	16
Abbildung 14: Zeitliche Phasen einer PKW-Fußgänger Kollision [17]	18
Abbildung 15: Vollstoß [18].....	18
Abbildung 16: Teilstoß [18]	19
Abbildung 17: Streifstoß [18]	19
Abbildung 18: AIS Codierung [21]	20
Abbildung 19: Männliches Becken, Draufsicht [25]	21
Abbildung 20: Männliches Becken, Vorderansicht [26]	22
Abbildung 21: Femur, Vorder- und Hinteransicht.....	24
Abbildung 22: Fract.cond.med.fem. [54]	24
Abbildung 23: Fract.capit.fem. [54]	25
Abbildung 24: Fract.troch.fem. [55].....	25
Abbildung 25: Fract.colli.fem. [54].....	25
Abbildung 26: Fract. fem. [56]	25
Abbildung 27: Fract.subtroch.fem. [57].....	25
Abbildung 28: Fract.supracond.fem. [54]	25
Abbildung 29: Anzahl der Verletzungen je Fahrzeugklasse	29
Abbildung 30: Multibody-Modell; ellipsoider Körperaufbau in PC-Crash.....	31
Abbildung 31: Bilder der Unfallstelle	33
Abbildung 32: Fahrzeug-Fußgänger Erstkontakt, Standbein rechts.....	35
Abbildung 33: Hüftanprall rekonstruiert in PC-Crash und original Polizeifoto der Verformung am Fahrzeug	35
Abbildung 34: Kopfanprall rekonstruiert in PC-Crash und original Polizeifoto der Verformung am Fahrzeug.....	36
Abbildung 35: Dichtefunktion der Normalverteilung.....	44
Abbildung 36: Verteilungsfunktion der Normalverteilung.....	45
Abbildung 37: Vergleich zwischen standardisierter Normalverteilung und t-Verteilung	47
Abbildung 38: Hypothesentest [59]	52
Abbildung 39: Schema zum Hypothesentest	53
Abbildung 40: Relative Verletzungshäufigkeit nach Markteinführungsjahr des Unfallfahrzeugs.....	56
Abbildung 41: Wahrscheinlichkeit einer AIS 2+ Pelvis- oder Femurverletzung abhängig von der Anprallgeschwindigkeit.....	58
Abbildung 42: Wahrscheinlichkeit einer AIS 3+ Pelvis- oder Femurverletzung abhängig von der Anprallgeschwindigkeit.....	59
Abbildung 43: Verletzungshäufigkeiten nach Fahrzeugklassen mit Markteinführung vor 1997	61
Abbildung 44: Verletzungshäufigkeiten nach Fahrzeugklassen mit Markteinführung von 2000-2004.....	62
Abbildung 45: Vergleich der mittleren Kollisionsgeschwindigkeiten der unterschiedlichen Fahrzeugtypen. Signifikante Unterschiede der mittleren Anprallgeschwindigkeiten zum 5% Niveau sind mit Dreiecken markiert. Alle weiteren Mittelwertvergleiche können als Trend betrachtet werden.	63

Abbildung 46: Relative Häufigkeit der detaillierten Verletzungen bezogen auf den Fahrzeugtyp, ohne Unterteilung der Fahrzeuge nach deren Markteinführungsjahr.....	65
Abbildung 47: Large & Small Family Cars; Relative Verletzungshäufigkeit nach Markteinführungsjahr des Unfallfahrzeugs; Die Anzahl (n) bezieht sich auf die gesamte Stichprobengröße	66
Abbildung 48: Small MPV/Supermini; Relative Verletzungshäufigkeit nach Markteinführungsjahr des Unfallfahrzeugs; Die Anzahl (n) bezieht sich auf die gesamte Stichprobengröße	67
Abbildung 49: Mittlere Kollisionsgeschwindigkeiten für „Large & Small Family Cars“ über die Markteinführungsperioden betrachtet. Signifikante Unterschiede in der durchschnittlichen Kollisionsgeschwindigkeit zum Vertrauensniveau von 95% sind mit Dreiecken markiert.....	68
Abbildung 50: mittlere Kollisionsgeschwindigkeiten für „Small MPV/ Supermini“ über die Markteinführungsperioden betrachtet. Signifikante Unterschiede in der durchschnittlichen Kollisionsgeschwindigkeit zum Vertrauensniveau von 95% sind mit Dreiecken markiert.....	70
Abbildung 51: Verletzungshäufigkeit nach Fahrzeugfrontelementen	71
Abbildung 52: Detaillierte Verletzungsbetrachtung bezogen auf die verursachenden Frontelemente	72
Abbildung 53: Häufigkeitsverteilung nach Anprallregion am Fahrzeug.....	73
Abbildung 54: Gehrichtung des Fußgängers zum Zeitpunkt des Fahrzeuganpralls	74
Abbildung 55: Bewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers zum Zeitpunkt des Fahrzeuganpralls.....	75
Abbildung 56: Entwicklung des Frontdesigns der Fahrzeugklassen „Large & Small Family Car“ und „Small MPV/Supermini“ über die Markteinführungsperioden	76
Abbildung 57: Wahrscheinlichkeit von Pelvis Verletzungen abhängig von der Körpergröße	78
Abbildung 58: Wahrscheinlichkeit von Pelvis Verletzungen abhängig vom Körpergewicht	79
Abbildung 59: Wahrscheinlichkeit von Femurverletzungen abhängig von der Körpergröße	81
Abbildung 60: Wahrscheinlichkeit von Femurverletzungen abhängig vom Körpergewicht	81

FORMELVERZEICHNIS

Formel 1: absolute Häufigkeit	40
Formel 2: relative Häufigkeit.....	40
Formel 3: Odds-Ratio	41
Formel 4: Mittelwert.....	43
Formel 5: Varianz	43
Formel 6: Standardabweichung	43
Formel 7: Dichtefunktion der Normalverteilung.....	44
Formel 8: Standardisierungsformel.....	45
Formel 9: Verteilungsfunktion	45
Formel 10: t-Verteilungsfunktion.....	46
Formel 11: Anzahl der Freiheitsgrade	47
Formel 12: Chi-Quadrat	48
Formel 13: Student's t.....	50
Formel 14: gepoolte Standardabweichung.....	50
Formel 15: Freiheitsgrade	50
Formel 16: Student's t nach Welch	51
Formel 17: ungepoolte Standardabweichung.....	51
Formel 18: Anzahl der Freiheitsgrade	52

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Fahrzeugkategorisierung nach Frontgeometrie, Fahrzeugbeispiele [15]	12
Tabelle 2: Grad der Verletzungsschwere nach AIS [21]	21
Tabelle 3: Verletzte knöchernen Strukturen des Beckens nach Unterscheidung zur Art der Krafteinwirkung [32]	27
Tabelle 4: Anzahl an Verletzungsdaten nach Körperregion und Datenbank	29
Tabelle 5: Bewegungsgeschwindigkeit in km/h nach Eberhardt und Himbert [40]	34
Tabelle 6: Sinnvoll interpretierbare Operationen bei verschiedenen Skalenarten [43]	39
Tabelle 7: Quotenverhältnis	41
Tabelle 8: Entscheidungstabelle zum Hypothesentest	42
Tabelle 9: Beispielhafte Kontingenztafel zum Fisher-Test	48
Tabelle 10: Quotenverhältnis bezogen auf den Markteinführungszeitraum vor 1997	57
Tabelle 11: Quotenverhältnis mit der Fahrzeugfrontkategorie „Small MPV/ Supermini“ als Vergleichsbasis, sowie p-Werte des Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests	62
Tabelle 12: Stichprobenumfang und Signifikanzniveaus zum Fahrzeugvergleich	64
Tabelle 13: Large & Small Family Cars; Quotenverhältnis bezogen auf den Markteinführungszeitraum vor 1997	66
Tabelle 14: Small MPV/Supermini; Quotenverhältnis bezogen auf den Markteinführungszeitraum vor 1997; ..	67
Tabelle 15: „Large & Small Family Cars“ Stichprobenumfang und p-Werte	69
Tabelle 16: „Small MPV/ Supermini“ Stichprobenumfang und p-Werte; * zu geringer Datenumfang	70
Tabelle 17: Stichprobenumfang und signifikante Unterschiede der Mittelwerte	76
Tabelle 18: Pelvisverletzungen verglichen mit dokumentierten Verletzungen aller anderen Körperregionen; Mittelwerte, Standardabweichungen, Fallzahlen und Signifikanzwerte	80
Tabelle 19: Femurverletzungen verglichen mit dokumentierten Verletzungen aller anderen Körperregionen; Mittelwerte, Standardabweichungen, Fallzahlen und Signifikanzwerte	82
Tabelle 20: Verwendete statistische Auswertungsverfahren	86

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] C. Sheppard, „Pelvic fractures,“ eMedicine Journal, www.emedicine.com, 2001.
- [2] Europäische Kommission, Weißbuch, Luxemburg: Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaft, 2001.
- [3] Delegation der Europäischen Union für die Schweiz und das Fürstentum Liechtenstein, „EU-Kommission will Zahl der Verkehrstoten bis 2020 halbieren,“ Access to website 14.05.2014.
- [4] European Union and European Commission Directorate-General for Mobility and Transport, „Performance of Passenger Transport expressed in passenger-kilometers,“ in *Transport in Figures*, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, p. Chapter 2.3.
- [5] Europäische Kommission, Verkehr, Vernetzte Mobilität für die Bürgerinnen und Bürger und Unternehmen Europas, Brüssel, 2013.
- [6] Statistik Austria, Verletzte und Getötete nach der Verkehrsart, http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/unfaelle_mit_personen_schaden/index.html, Access to website 05.06.2014.
- [7] H. Cryer und E. Johnson, Trauma, Pelvis fractures, Stamford Connecticut: Appleton&Lange, 1996.
- [8] M. Kühn, R. Fröming und V. Schindler, Fußgängerschutz; Unfallgeschehen, Fahrzeuggestaltung, Testverfahren, Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [9] European Parliament and the Council of the European Union, „Directive 2003/102/EC,“ Official Journal of the European Union, 2003.
- [10] Kommission der Europäischen Union, „Verordnung (EG) Nr. 631/2009,“ Official Journal of the European Union, 2009.
- [11] European New Car Assessment Programme, „Pedestrian Testing Protocol,“ Version 7.1.1, 2013.
- [12] Carhs GmbH, „Euro NCAP Roadmap,“ *Safety Companion*, 2014.
- [13] BASt - Bundesanstalt für Straßenwesen, „Optimierte Fahrzeugfront hinsichtlich des Fußgängerschutzes,“ Heft F38, 2001.

-
- [14] European Parliament and the Council of the European Union, „Directive 2004/90/EG,“ Access to website: 18.07.2014.
- [15] APROSYS, „Final Report Pedestrian and Pedal Cyclist Accidents,“ 2004.
- [16] G. Wiener, „Erstellung eines parametrisierbaren numerischen Modells einer PKW Fahrzeugfront zur Untersuchung von Motorrad-Unfällen,“ Thesis/Dissertation, Technische Universität Graz, 2014.
- [17] H. Steffan, „Vorlesungsskriptum zur Vorlesung Unfallmechanik im Verkehrswesen,“ VSI, Graz, 2011.
- [18] T. Ziegenhain, „Rechnergestützte Untersuchung mittels Mehrkörpermodell in PC Crash 8.1,“ Thesis/Dissertation, Technische Universität Graz, 2008.
- [19] M. Rohm, „Unfallrekonstruktion, Der PKW-Fußgänger-Unfall,“ Münster, 2005.
- [20] R. Hausmann, „Pedestrian Accidents - In-depth Analysis and Accident Figures,“ Thesis/Dissertation, Linköping University, 2006.
- [21] H. Steffan und E. Tomasch, „Vorlesungsskriptum zur Vorlesung Biomechanik,“ VSI, Graz, 2011.
- [22] Association for the Advancement of Automotive Medicine, „Abbreviated Injury Scale 2005 Update 2008,“ Barrington, 2008.
- [23] Association for the Advancement of Automotive Medicine, „Abbreviated Injury Scale Update 98,“ Barrington, 1998.
- [24] J. Staubesand, Benninghoff Anatomie Makroskopische und mikroskopische Anatomie des Menschen, Urban & Schwarzenberg, 1985.
- [25] Sobotta, Atlas der Anatomie des Menschen, Urban & Fischer.
- [26] OSEO, Männliches Becken,
<http://www.juntadeandalucia.es/averroes/~29701428/salud/ssvv/pelmas1.gif>,
Access to website 06.12.2014.
- [27] W. Platzer, Taschenatlas Anatomie Band 1 Bewegungsapparat, Stuttgart: Thieme Verlag, 2009.
- [28] B. Eastridge und A. Burgess, Pedestrian pelvic fractures: 5-year experience of a major urban trauma center, 1997.

- [29] H. C. Epstein, „Posterior fracture-dislocation of the hip,“ *Journal of Bone and Joint Surgery*, pp. 1103-1127, 1974.
- [30] J. G. Snedeker, „Assessment of Pelvis and Upper Leg Injury Risk in Car-Pedestrian Collisions: Comparison of Accident Statistics, Impactor Tests and a Human Body Finite Element Model,“ *Stapp Car Crash Journal*, Zürich, 2003.
- [31] D. C. Viano und R. L. Stalnaker, „Mechanisms of femoral fracture,“ *Journal of Biomechanics* 13, pp. 701-716, 1980.
- [32] G. Teresinski und R. Madro, „Pelvis and hip joint injuries as a reconstructive factors in car-to-pedestrian accidents,“ Elsevier Forensic Science International, Lublin, Poland, 2001.
- [33] R. Watson-Jones, *Fractures and joint injuries*, E. & S. Livingstone, 1957.
- [34] M. H. Meyers, „Fractures of the hip,“ *Year Book Medical Publishers Chicago*, pp. 38-73, 1985.
- [35] VUFO Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH, Unfallforschung GIDAS, <https://www.vufo.de/forschung-und-entwicklung/gidas/>, Access to website: 08.09.2014.
- [36] E. Tomasch, *Codebuch Zedatu*, Graz, VSI, 2014.
- [37] Europäisches Zentrum für Studien zur Sicherheit und Risikoanalyse, CEESAR Database, <http://www.ceesar.fr>, Access to website: 08.09.2014.
- [38] Dr. Steffan Datentechnik, *PC-Crash Ein Simulationsprogramm für Verkehrsunfälle Bedienungs- und technisches Handbuch*, Linz: Wojciech Wach, 2014.
- [39] H. W. Jürgens, I. A. Aune und U. Pieper, *Internationaler Anthropometrischer Datenatlas*, Dortmund: Federal Institute for Occupational Safety, 1998.
- [40] W. Eberhardt und G. Himbert, *Bewegungsgeschwindigkeiten*, Saarbrücken, 1977.
- [41] C. D. Untaroiu und M. U. Meissner, „Crash reconstruction of pedestrian accidents using optimization techniques,“ in *International Journal of Impact Engineering Volume 36*, ELSEVIER, 2009, pp. 210-219.
- [42] H. Burg und A. Moser, *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.

- [43] H. J. Mittag, Statistik Eine interaktive Einführung, Hagen, Deutschland: Springer Verlag, 2011.
- [44] U. Kamps, Gabler Wirtschaftslexikon, <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/stetiges-merkmal.html>: Springer Verlag, Access to website: 11.12.2014.
- [45] Statista Technische Universität Graz, Statistik Lexikon: Definition Deskriptive Statistik, http://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/49/deskriptive_statistik/, Access to website: 11.12.2014.
- [46] E. Ebermann, Grundlagen statistischer Auswertungsverfahren, <http://www.univie.ac.at/ksa/elearning/cp/quantitative/quantitative-4.html>, Access to website: 11.12.2014.
- [47] Christian-Albrecht-Universität zu Kiel, Modul G1 Statistik, Kiel, 2006.
- [48] Universität des Saarlandes Fachbereich Psychologie, Kreuzproduktverhältnis (Odds Ratio), <http://psydok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2004/268/html/node95.html#2464>, Access to website: 22.07.2014.
- [49] MatheGuru, Fehler beim Testen von Hypothesen, <http://matheguru.com/stochastik/176-fehler-beim-testen-von-hypothesen.html>, Access to website: 07.12.2014.
- [50] mathe-online, Mögliche Fehler bei Signifikanzprüfungen, http://www.mathe-online.at/materialien/georg.pernerstorfer/files/Kap3/fehler_macht.pdf, Access to website: 07.12.2014.
- [51] matheGuru, Signifikanz, Signifikanzniveau, <http://matheguru.com/stochastik/249-signifikanz-signifikanzniveau.html>, Access to website: 11.12.2014.
- [52] MatheGuru, Normalverteilung, <http://matheguru.com/stochastik/normalverteilung.html>, Access to website: 24.07.2014.
- [53] W. Timischl und G. Kaiser, Ingenieurmathematik 4, Wien: E.Dorner Verlag, 2001.
- [54] D. Luebbert, Hauptsatz der theoretischen Statistik: Der Zentrale Grenzwertsatz, <http://www.luebbert.net/uni/statist/stata/stata5.php>, Access to website: 25.07.2014.

- [55] MatheGuru, t-Verteilung/Student's t-Verteilung, <http://matheguru.com/stochastik/t-verteilung-students-t-verteilung.html>, Access to website: 26.07.2014.
- [56] MatheGuru, Chi-Quadrat-Test, <http://matheguru.com/stochastik/248-chi-quadrat-test.html>, Access to website: 25.07.2014.
- [57] K. Backhaus und B. Erichson, Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [58] CRGRAPH, Exakter Fisher Test, Access to website: 10.12.2014, http://www.crgraph.de/Exakter_Fisher_Test.pdf.
- [59] MatheGuru, t-Test zum Mittelwertvergleich, <http://matheguru.com/stochastik/267-t-test.html>, Access to website: 07.07.2014.
- [60] Freie Universität Berlin, Projekt Neue Statistik 2003, Welch Test, http://web.neuestatistik.de/inhalte_web/content/files/modul_33886.pdf, Access to website 05.08.2014.
- [61] AutoBild.de, Deutsche Autos so alt wie nie, <http://www.autobild.de/artikel/durchschnittsalter-deutscher-autos-gestiegen-5159499.html>, Access to website 20.10.2014.
- [62] IMAS Meinungsforschungsinstitut, Typischer Österreicher, <http://www.news.at/a/typischer-oesterreicher-74-1-72-52143>, Access to website: 12.12.2014.
- [63] M. Weinreich, Der Verkehrsunfall des Fußgängers, Berlin: Springer-Verlag.
- [64] Fraunhofer-Institut für Bildgestützte Medizin MEVIS, AO-Klassifikation der Frakturen, <http://www.mevis-research.de/~hhj/AO%20Klassifikation.htm>, Access to website 05.06.2014.
- [65] Klinikum Lippe Detmold, Dynamische Hüftschraube, http://www.pflege-im-op.de/Praxisberichte/UCH_Orthopadie/DHS/dhs.html, Access to website 05.06.2014.
- [66] Humpal Physical Therapy and Sports Medicine Centers, Adult Femur Fractures, <http://www.humpalphysicaltherapy.com/Injuries-Conditions/Hip/Hip-Issues/Adult-Femur-Fractures/a~4388/article.html>, Access to website 05.06.2014.
- [67] Orthopod, Orthopedic Information, <http://www.eorthopod.com/content/adult-hip-fractures-types>, Access to website: 05.06.2014.

- [68] teachSAM, Straßenverkehrstote in der EU,
http://www.teachsam.de/pro/pro_verkehr/thm/stra_verk/pro_strav_stat_2.htm,
Access to website 05.06.2014.