

Aus der Klinik für Unfallchirurgie und Orthopädie
Unfallkrankenhaus Berlin
Direktor: Prof. Dr. med. Axel Ekkernkamp

Medizinische und technische Analyse realer Fußgängerunfälle

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Medizin
(Dr. med.)

vorgelegt der Universitätsmedizin der
Ernst-Moritz-Arndt-Universität
Greifswald
2012

von
Melissa Beirau
geb. am: 26.04.1979
aus Oranienburg

Dekan:

Prof. Dr. H. K. Kroemer

1. Gutachter:

PD Dr. J. Seifert

2. Gutachter:

Prof. Dr. G. Schmidmaier

Disputation: 19.12.2012, Greifswald

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	4
1.1 Bezugszahlen	5
1.1.1 Allgemeine Kenngrößen	5
1.1.2 Unfälle mit Beteiligung von Fußgängern	5
1.1.3 Verletzungsmuster	6
1.1.4 Kinematik des Fußgängerunfalls	9
1.2 Risikofaktoren und Präventionsmaßnahmen	11
1.2.1 Fußgängerseitige Risikofaktoren und Präventionsmaßnahmen	11
1.2.2 Fahrzeugbasierte Sicherheitstechnologie	13
1.2.3 Umfeldbasierte Risikofaktoren und Präventionsmaßnahmen	14
1.3 Verkehrsunfallforschung: Forschungsansätze und Methoden	17
1.3.1 Geschichte der Unfallforschung vor dem Hintergrund des Fußgängerunfalls	17
1.3.2 In-depth-Unfalldatenerhebungen	18
1.3.3 Biomechanische Untersuchungen	19
1.3.4 Weitere Untersuchungsmethoden	21
1.4 Motivation und Zielsetzung	22
2 MATERIAL UND METHODEN	24
2.1 Grundlagen der Untersuchung	24
2.2 Ein- und Ausschlusskriterien	25
2.3 Untersuchungsablauf	26
2.3.1 Vorbereitung und Datenerhebung am Unfallort	26
2.3.2 Erhebung von Verletzungsmuster und Umfeldfaktoren	29
2.3.3 Interdisziplinäre Unfallrekonstruktion	31
2.4 Datenverarbeitung und Statistik	32
2.4.1 Instrumente zur Beschreibung des Verletzungsmusters	32
2.4.2 Statistische Auswertung	34
3 ERGEBNISSE	36
3.1 Beschreibung der Stichprobe	36
3.1.1 Beschreibung der unfallbeteiligten Fußgänger	36
3.1.2 Beschreibung der unfallbeteiligten Pkw-Fahrer	40
3.1.3 Beschreibung der beteiligten Pkw	40
3.2 Beschreibung der Unfallumgebung	41
3.3 Beschreibung der Unfallkinematik	43
3.3.1 Kollisionsgeschwindigkeit	43
3.3.2 Kontaktbereiche am Fahrzeug	47
3.3.3 Abwurf des Fußgängers	49
3.4 Beschreibung des Verletzungsmusters	49
3.4.1 Ergebnisübersicht	49
3.4.2 Verletzungen des Primär- und Sekundärpralls	52
3.4.3 Verletzungsmuster und Einzelverletzungen	54
3.4.4 Resultierende Verletzungen in Abhängigkeit von der Anprallseite	60
3.4.5 Langzeitfolgen	60
3.4.6 Tödliche Verletzungen	61
3.5 Analyse von Kopfaufprall und Schädelhirnverletzung	62
4 DISKUSSION	65
5 AUSBLICK	78
6 LITERATURVERZEICHNIS	80
7 EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	89
8 DANKSAGUNGEN	90

1. Einleitung

Seit dem ersten dokumentierten Fußgänger-Automobilunfall mit tödlichem Ausgang am 13. September 1899 in New York haben sich Straßenbild und Verkehr grundlegend verändert [15].

Motorisierte Fahrzeuge sind aus unserer heutigen Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Sie versprechen Unabhängigkeit, Mobilität, Flexibilität, Zeitersparnis, Status und kostengünstiges Transportieren. Fast jedem Haushalt steht mittlerweile ein eigener Pkw zur Verfügung. Die dadurch bedingte Verkehrsdichte führt jedoch zwangsläufig auch zu einer erhöhten Gefährdung durch Verkehrsunfälle (VKU). Dabei verlangt der schwächste und ungeschützte Verkehrsteilnehmer - der Fußgänger- ein spezielles Augenmerk.

Das Standardwerk der Weltgesundheitsorganisation (WHO) aus dem Jahr 2004 nennt die Gruppe der „vulnerablen Verkehrsnutzer“ als größte Verkehrsteilnehmergruppe bei tödlichen VKU [106]. VKU werden zukünftig noch stärker in den Fokus der öffentlichen Wahrnehmung kommen, nicht zuletzt durch die Proklamation des „Jahrzehnts der Sicherheit im Straßenverkehr 2011-2020“ durch WHO und UNO [105].

Die Unfallforschung hat es sich zur Aufgabe gesetzt, anhand von Unfallereignissen und anderen geeigneten Methoden neue Erkenntnisse zu Ursachen, Ablauf und Folgen von VKU zu gewinnen. Ein Teilaspekt davon ist die Analyse der Krafteinwirkung auf den menschlichen Körper in Beziehung zum Unfallhergang und zur Fahrzeugkonstruktion [2, 72, 80].

In der Vergangenheit wurden zahlreiche Präventionsmaßnahmen für den Fußgänger untersucht und zum Teil umgesetzt [23, 33, 74, 80, 104]. Allerdings beziehen sich nur wenige frühere Arbeiten auf Stichproben realer Unfälle. Solche Datenerhebungen direkt am Unfallort und im Verlauf der medizinischen Behandlung sind in besonderem Maße zeit- und kostenintensiv. Für bestimmte Fragestellungen wurden daher mathematische Simulationen, Dummy-Testungen und weitere Methoden etabliert, deren externe Validität aber oftmals unklar bleibt.

Die vorliegende Arbeit beschreibt daher ausgewählte Ergebnisse eines umfangreichen interdisziplinären Forschungsprojektes an Pkw-Fußgänger-Kollisionen aus einem innerstädtischen Szenario einer deutschen Großstadt.

1.1 Bezugszahlen

1.1.1 Allgemeine Kenngrößen

Aus der Publikation des Statistischen Bundesamtes aus dem Jahr 2011 wurde für 2010 eine Zunahme der VKU von 4,2% im Vergleich zum Vorjahreszeitraum festgestellt. 2010 wurden 2,4 Millionen VKU polizeilich erfasst [92-93].

In Tabelle 1 sind die Daten der Unfallstatistik der Jahre 2009 und 2010 als Vergleich dargestellt.

Gegenstand der Dokumentation	2009	2010	Veränderung in %
	Fallzahl		
Verkehrsunfälle insgesamt	2 313 453	2 411 271	4,2
mit Personenschaden	310 806	288 297	- 7,2
Mit schwerwiegendem Sachschaden	89 519	92 107	2,9
Verunglückte insgesamt	401 823	374 818	- 6,7
Getötete	4 152	3 648	- 12,1
Schwerverletzte	68 567	62 620	- 8,7
Leichtverletzte	329 104	308 550	- 6,2
Verunglückte Fußgänger	32 238	30 139	- 6,5
Getötete	591	476	- 19,5
Verunglückte Pkw-Insassen	223 508	213 396	- 4,5
Getötete	2 110	1 840	- 12,8

Tabelle 1: Überblick der Unfall- und Unfallfolgenstatistik aus 2009 und 2010 [92]

1.1.2 Unfälle mit Beteiligung von Fußgängern

Fußgänger machten im Jahr 2010 etwa ein Achtel (13%) der Schwerverletzten und Getöteten aus [93]. VKU enden für den Fußgänger doppelt so häufig tödlich wie für Pkw-Insassen [52]. Beispielhaft wurden unter den 213 396 im Jahr 2010 im Pkw Verunglückten 1840 Getötete (0,9%) und unter den 30 139 als Fußgänger Verunglückten 476 Getötete (1,6%) festgestellt [92].

Im Jahr 2010 machten Fußgänger bzw. Fußgängerunfälle 13% der Verkehrstoten und 11% der polizeilich erfassten Unfälle mit Personenschaden aus. Nach Angaben des statistischen Bundesamtes waren 20% der Getöteten mindestens 70 Jahre alt und darunter waren 42% Fußgänger [92].

Unter den Schwerverletzten bei den Fußgängern waren Kinder (30%) häufiger als Senioren über 75 Jahre (17%). Dabei waren männliche Beteiligte mit 60% der getöteten Fußgänger leicht überrepräsentiert [92].

Durch die stark ansteigenden Fahrzeugzahlen in den Wirtschaftswunderjahren des 20. Jahrhunderts stieg auch in Deutschland die Unfallfrequenz stark an. Anfang der fünfziger Jahre machten in Deutschland Fußgängerunfälle 19,2% aller VKU und 17,8% aller Verkehrstoten aus [10]. In der alten Bundesrepublik starben im Jahr 1970 mehr als 6000 Fußgänger im Straßenverkehr [80, 104].

1.1.3 Verletzungsmuster

Prinzipiell können Verletzungen des Fußgängers durch den Anprall am Pkw, durch den Aufschlag auf der Straßenoberfläche oder an äußeren Hindernissen entstehen.

Bereits Bauer beschrieb in seiner Unfallbetrachtung 1954 Schädelverletzungen als führende Todesursache [10]. Im Bereich der Schädelbasis zeigen sich diese häufig als Scharnierfrakturen. Typische intrakranielle Traumafolgen sind Blutungen wie Epidural-, Subdural-, Subarachnoidal- und diffuse Kontusionsblutungen. Nicht selten sind diese mit einem Hirnödem vergesellschaftet. Typisch für den Unfallmechanismus sind so genannte Coup-Countercoup-Verletzungen, die aufgrund der Trägheit der Hirnmasse bei Akzeleration und Dezeleration während des Stoßes resultieren. Solche Verletzungen finden sich meist beim frontalen Anprall und somit bei einer sagittalen Stoßrichtung [86]. Die Kopf- und Beinverletzungen tritt als charakteristische Kombinationsverletzung und häufigstes Grundmuster dieses Unfalltypus auf [25].

Thorax- und Beckenverletzungen sind ebenfalls häufige Verletzungsfolgen. Diese sind neben den Kopfverletzungen ebenso oft Ursache des Versterbens [18]. Für den Notarzt bedeutsam ist, dass äußere Verletzungszeichen völlig fehlen können [66]. Durch den direkten Anprall kann es zu Organrupturen der großen Bauchorgane wie Leber, Milz und Nieren kommen. Häufiger jedoch werden indirekte Verletzungen an Bandapparat und Hili durch Lageveränderungen der Organe verursacht [66, 104]. Bei abdominalen Verletzungen kommen angesichts der breitflächig einwirkenden

Gewalt Berstungsrupturen der Hohlorgane wie Magen, Darm und Harnblase vor [104].

Eine Besonderheit bei Fußgängerkollisionen im hohen Geschwindigkeitsbereich ist die Aortenruptur. Während des Unfallablaufes kommt es zur Rotation des Oberkörpers und infolge der auftretenden Zentrifugalkraft wird das Herz cranialwärts verlagert. Dies führt zur Überdehnung der an der Brustwirbelsäule fixierten Aorta und schließlich zu deren Abriss [13]. Ein solcher Aortenabriss lässt sich beim Fußgängerunfall als Akzelerationsmechanismus deuten. Bei einem primären Beckenanstoß ab einer Anstoßgeschwindigkeit von ca. 50km/h ist eine deutliche Häufigkeitszunahme dieser Verletzung zu verzeichnen [45].

Es kann im Kollisionsablauf zum Beckenanprall in Höhe der Motorhaube und damit nicht selten zu schweren Verletzungen des Beckens in Kombination mit Unterschenkelverletzungen kommen. Dabei scheinen die Beckenfrakturen oftmals durch eine stark seitlich einwirkende Kompression verursacht zu werden [17].

Ursächlich für die Verletzungen der Halswirbelsäule (HWS), Brustwirbelsäule (BWS) und Lendenwirbelsäule (LWS) ist eine hohe Biegebelastung. Während des Aufladevorgangs am PKW erfährt die Wirbelsäule einen Nachschiebemechanismus. Im Unfallverlauf wird die Wirbelsäule segmental oder in ihrer gesamten Länge gestaucht oder ruckartig auseinander gezogen. Bedingt durch die Masse des Kopfes kann dies regelrecht zur Dekapitation führen. Als häufige Verletzungsfolge resultieren Frakturen der LWS seltener der BWS. Verglichen mit dem Verletzungsbild bei Fahrzeug-Kollisionen sind Wirbelsäulenverletzungen beim Fußgängerunfall relativ selten anzutreffen [75].

Verletzungen der oberen Extremität sind beim Fußgängerunfall wenig spezifisch. Sie treten als isolierte Weichteilverletzung oder Frakturen auf und präsentieren ein uneinheitliches Bild der Entstehungsart und des Verteilungsmusters [17, 104].

Aufgrund von Häufung, Ausmaß und Lokalisation sind Unterschenkelverletzungen in besonderem Maße zur Rekonstruktion der Unfallkinematik geeignet [9, 53, 65, 104]. Sie stellen sich dabei typischerweise als Anfahrverletzung dar [30, 43, 66]. Dabei macht man sich in der Rekonstruktion die charakteristische Form des Knochenbruchs zunutze [67]. Es entsteht ein Knochendreieck, deren Basis der Richtung der Gewalteinwirkung zugewendet ist (Abbildung 1). Diese Frakturform wird

nach dem Erstbeschreiber Messerer-Keilbruch genannt [64]. Die Bruchlinie verläuft dabei nicht vollständig gerade, sondern konvex gebogen zur Gewalteinwirkung hin. Oberschenkelfrakturen sind in der Literatur oftmals nur an der Anstoßseite beschrieben und treten im Vergleich zu Unterschenkelfrakturen seltener auf [66, 104].

Abb. 1: Typischer Röntgenbefund einer Unterschenkelfraktur beim Fußgänger (Quelle: Unfallkrankenhaus Berlin)



An den Kontaktstellen der unteren Extremität mit Stoßfänger und Haube finden sich Taschenbildungen im subkutanen Gewebe (Décollement), die ebenfalls als typische Anstoßverletzungen bewertet werden [9, 65]. Diese werden durch die tangential-abscherende Krafteinwirkung der Fahrzeugfront verursacht. Das Décollement tritt insbesondere am Unterschenkel, Oberschenkel oder Gesäß je nach Körpergröße des Verunfallten und Höhe der Kontaktfläche am Pkw auf. Im Bereich des Oberschenkels und Beckens sind diese Verletzungen oftmals mit Frakturen kombiniert. Infolge versetzter Beinstellung des Fußgängers kann auch die Unterschenkelinnenseite der Gegenseite betroffen sein. Die Seite der Traumatisierung gibt Aufschluss über die Anstoßrichtung des Fahrzeugs [66].

1.1.4 Kinematik des Fußgängerunfalls

Die Kinematik eines Fußgängerunfalls läuft schematisch ab. Zu Beginn der Kollision kommt es zum Anprall der Stoßstange gegen die untere Extremität. Im Anschluss daran erfolgt beim Erwachsenen der Beckenanprall gegen die Haubenvorderkante bzw. Fronthaube. Beim Kind kommt es je nach Körpergröße zum unmittelbaren Anstoß des Abdomens oder zum Thorax- bzw. Kopfanprall gegen die Haubenvorderkante mit anschließendem Kopfanprall gegen die Fronthaube [2, 3, 23, 102].

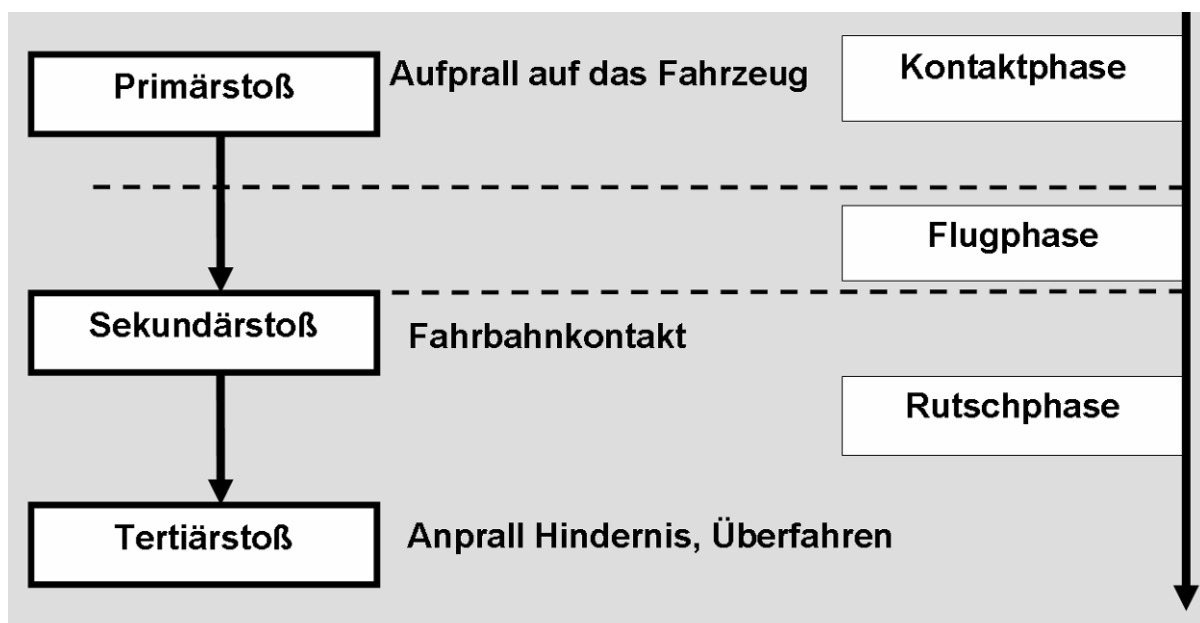
Erwachsene haben einen über der Höhe der Haubenvorderkante liegenden Körperschwerpunkt. Es erfolgt eine Drehung um die Querachse des Körpers und Anprall von Thorax und Kopf gegen die Fronthaube oder den Windschutzscheibenbereich. Höhere Geschwindigkeiten bewirken eine weitere Rotation des Körperschwerpunktes mit anschließendem Aufschlag auf das Fahrzeugdach oder -heck [102]. Anschließend löst sich der Fußgänger vom Fahrzeug, durchläuft eine Flugphase, um dann nach Fahrbahnkontakt rutschend und rollend zur Ruhe zu kommen [2, 9, 19]. Das Fehlen einer Fahrzeugverzögerung während der Kollisionsphase führt zum Unter- oder ggf. Überfahren des Fußgängers [55].

Es können drei Anstoßarten unterschieden werden. Bei einem Unfall mit Vollstoß wird die gesamte Energie, des in Bewegung befindlichen Fahrzeugs, auf den Fußgänger übertragen [96]. Das bedeutet, dass der Fußgänger vollständig von der Fahrzeugfront erfasst und nahezu auf Kollisionsgeschwindigkeit in Längsrichtung beschleunigt wird [19]. Demnach bezeichnet man einen Anstoß als Teilstoß, wenn nicht der gesamte Anteil der Stoßenergie des Pkw abgegeben wird. Der Anprall ereignet sich mehr an der seitlichen Front des Fahrzeuges, damit ergibt sich für den gestoßenen Fußgänger eine Beschleunigung in Querrichtung [3, 19]. Von einer Streifkollision wird bei Abwicklungen an der Seitenpartie des Fahrzeuges gesprochen, z.B. im Bereich des Kotflügels oder der Fahrzeurtüren. Dabei kann es passieren, dass der Fußgänger gerade noch an einem Körperteil erfasst wird. Er erfährt eine hohe Rotationsbeschleunigung und nur eine geringe in Längsrichtung [55].

Des Weiteren können in Abhängigkeit von der Bremsung vor Kollision weitere Differenzierungen vorgenommen werden. Ein gebremster Anstoß liegt vor, wenn das Fahrzeug vor oder unmittelbar bei Kollisionsbeginn abgebremst wird. Ein ungebremster Anstoß liegt entsprechend dann vor, wenn keine Bremsung durchgeführt wird.

Beim Fußgängerunfall finden mehrmalige Energieumwandlungen statt [55]. Zuerst erfährt der Fußgänger den direkten Stoß und den Aufprall auf das Fahrzeug, den so genannten Primärstoß (Abbildung 2). Dabei wird der Fußgänger annähernd auf Fahrzeuggeschwindigkeit gebracht. Durch den eingeleiteten Bremsvorgang löst sich der Fußgänger vom Fahrzeug und prallt nach einer mehr oder weniger ausgeprägten Flugphase auf die Fahrbahn. Dieser Vorgang wird als Sekundärstoß bezeichnet. Nach dem Aufprall auf der Straße kommt der Fußgänger rutschend und rollend zur Ruhe. Prallt er während des Fluges oder beim Rutschen noch gegen ein anderes Hindernis, wie z.B. Haltestellengitter oder Bordstein, oder wird er sogar überfahren, spricht man vom Tertiärstoß. Die beim Primärstoß aufgebrachte Energie muss durch den Sekundär- und Tertiärstoß wieder verbraucht werden [2, 3, 19, 55]. Der Unfallablauf lässt sich somit immer in drei Phasen einteilen: Kontakt, Flug und Rutschen. Die folgende Abbildung zeigt die einzelnen Unfallphasen.

Abbildung 2: Schematische Darstellung der Unfallphasen [55]



1.2 Risikofaktoren und Präventionsmaßnahmen

1.2.1 Fußgängerseitige Risikofaktoren und Präventionsmaßnahmen

Entscheidender Einflussfaktor in der Unfallprävention ist der Mensch und sein Verhalten als Teilnehmer im Straßenverkehr. Hauptursache für Verkehrsunfälle ist zumeist eine Überforderung der Wahrnehmungs- oder Handlungsfähigkeit, die zum menschlichen Versagen führt [54].

In der Beobachtungsstudie von Hatfield et al. mit standardisierten Interviews von Fußgängern wurde festgestellt, dass ausreichende Kenntnisse über geltende Verkehrsregeln oft fehlen, ignoriert werden oder ein Missverständnis des Vorranges an Fußgängerüberwegen und Ampelanlagen (Beispiel Linksabbieger) vorlag [35]. Eine andere Publikation nennt in bis zu 52% „Unachtsamkeit“ und in 20% „Fehleinschätzung“ als Unfallursache durch die Fußgänger [47].

Weitere Faktoren liegen in Alter und Geschlecht sowie im sozioökonomischen Status dieser Gruppe von Verkehrsteilnehmern. Kinder und Senioren tragen gegenwärtig das höchste Verkehrsunfallrisiko als Fußgänger [1, 38, 40, 59, 60, 69, 81, 82, 94]. Immerhin 25% der tödlich verletzten Senioren und 27% der getöteten Kinder im Jahr 2010 waren Fußgänger [92]. Ein niedriger sozialer Status im Sinne einer Kombination aus niedrigem Verdienst und geringerer Bildung bedingen ein vier bis fünffach erhöhtes Risiko in dieser Unfallkategorie [40].

Junge und insbesondere männliche Verkehrsteilnehmer sind zudem besonders gefährdet. Beschrieben wird ein Überwiegen männlicher Fußgänger als Unfallverursacher, z.B. in 70% [38, 90] oder 64% [47]. Männer tendieren zu einer unsicheren Straßenquerung, was sich im simulierten Fußgängerumfeld jedoch auch für ältere Verkehrsteilnehmer nachweisen lässt. Dabei ist die Fehleinschätzung der eigenen Laufgeschwindigkeit von maßgeblicher Bedeutung. Nicht zuletzt kann eine verlangsamte Reaktionsgeschwindigkeit das Risiko der Unfallbeteiligung stark erhöhen [60].

Ein determinierender Faktor für das Verhalten im Straßenverkehr scheint zudem der eigene Führerschein zu sein. So weisen insbesondere Frauen mit Führerschein in der Simulation weniger unsichere und verzögerte Straßenquerungen auf [39].

Die Frequenz der Verkehrsbeteiligung, eine generell risikobehaftete Verkehrsteilnahme oder Alkohol- bzw. Drogenintoxikation gelten als weitere Risikofaktoren. Dabei ist der in Studien erfasste Alkoholeinfluss der beteiligten Fußgänger, bedingt durch verschiedenartige Erhebungsmethoden, zwar sehr heterogen, aber in jedem Fall in substantieller Ausprägung messbar. [7, 18, 20, 33, 43, 49, 51, 59].

Die Varianz der in den Publikationen angegebenen Alkoholbeteiligung ist ausgeprägt und reicht von 65% [18], 47% [7], 24% [33] bis hinunter zu 16% [51]. Nach Lennè et al. wurde bei 30-80% der an schweren bis tödlichen Unfällen beteiligten Fußgänger eine durchschnittliche Blutalkoholkonzentration (BAK) von mindestens 0,05% gemessen. In dieser Publikation wird beschrieben, dass durch die Alkoholintoxikation ein größeres Risiko für einen schweren oder tödlichen Unfall resultiert. Zur Senkung des Unfallrisikos wurde in den Stunden hohen Alkoholkonsums (HAH- High Alcohol Hours) zwischen 18 Uhr und 6 Uhr morgens eine verlängerte Rotphase für die Fahrzeuge geschaltet. Damit sollte die Fahrgeschwindigkeit des Verkehrs reduziert werden. Verglichen wurden die Ergebnisse mit einem Verkehrsbereich ohne Eingriff auf die Lichtzeichenschaltung. Eine signifikante Senkung der Geschwindigkeit um bis zu 40% wurde angegeben. Es gibt jedoch keine Angaben über die Senkung der Unfallzahlen mit Alkoholbeteiligung im Untersuchungszeitraum [57].

Auch die Nutzung eines Mobiltelefons gilt als Risikofaktor. So konnte gezeigt werden, dass ein verringertes Lauftempo, und eine gestörte Aufmerksamkeit für Ampelphasen oder die Verkehrssituation in vergleichbarem Maße wie bei Pkw-Fahrern auftreten können. Audiovisuelle Informationen zur Verkehrssituation können durch die Nutzung eines Telefons oder anderer technischer Geräte (z.B. portable Musikgeräte) nicht entsprechend wahrgenommen werden [34, 70].

Psychologische Forschungsansätze haben gezeigt, dass eine Veränderung des Verkehrsverhaltens von Fußgängern erzielt werden kann. Dies geschieht auf Basis von Schulungen der eigenen Risikoeinschätzung und deren Konsequenzen [38, 40]. Erzieherische Maßnahmen haben jedoch bei Jugendlichen mit geringer Kontrollkapazität nur wenig Aussicht auf Erfolg [90].

Die Autoren der Studie „Illegal pedestrian crossing at signalised intersections: incidence and relative risk“ sehen ein unzureichendes Verständnis über Fehlverhalten unter Fußgängern als wichtige Unfallursache an. In der

Unfallstichprobe werden in 32 - 44% illegale Straßenüberquerungen in dem durch Lichtzeichenanlagen geregelten Bereich beschrieben [49]. Trotz bekannter Verkehrsregeln werden die vermeintlich bequemen, kürzeren, aber nicht weniger gefährlichen Wege benutzt. Andere Autoren stellen die mangelhafte Umsetzung edukativer Maßnahmen in den Vordergrund [47].

Die Autoren Holland und Hill sehen einen besseren Schutz für Senioren nur durch Änderung der Verkehrsabläufe, gesicherte Fußgängerareale und -überwege [38].

1.2.2 Fahrzeugbasierte Sicherheitstechnologie

Die Automobilindustrie selbst ist einer der stärksten Akteure in der Verbesserung der Verkehrssicherheit. Eine Reduzierung der Verletzungsschwere nach Fußgänger-Fahrzeug-Unfällen kann durch Anpassung der Fahrzeugaufbauten erreicht werden [2, 55].

Während die Fahrzeuginsassen durch Fußgängerkollisionen in der Regel keine unmittelbaren Verletzungsfolgen erleiden, werden zunehmend mehr fahrzeugbasierte Sicherheitssysteme für passive und aktive Fußgängersicherheit zur Marktreife gebracht. Das Spektrum diese Produkte ist breit gefächert, immer marken- und typenspezifisch, häufig über Ländergrenzen hinaus nicht vergleichbar und zudem meist ausschließlich durch konzerninterne Forschungseinrichtungen entwickelt und evaluiert [2]. Unabhängige und objektive wissenschaftliche Untersuchungen sind die Ausnahme. Aus diesem Grund werden im Folgenden einige wenige Sicherheitssysteme exemplarisch vorgestellt.

Nachdem flachere Motorhaubenkanten sowie abgerundete Bauteile schon seit längerer Zeit verbaut werden, befinden sich geeignete Frontairbags noch immer in der Entwicklungsphase [102]. Dabei handelt es sich um unter der Fronthaube oder im Bereich der unteren Frontscheibeneinfassung bis zur A-Säule gelegene Airbags. Sie lösen durch einen in der Frontschürze bzw. Stoßstange befindlichen Drucksensor bei einem Frontalanprall aus. Einen vergleichbaren Aktivierungsmechanismus weist die sich aufstellende Fronthaube auf. Ein Abfedern des Kopfes auf der Motorhaube soll dadurch erreicht werden [23, 53]. Weitere Entwicklungen sind insbesondere Energie absorbierende Bauteile (z.B. Stoßstangen, Motorhaube),

Windschutzscheiben- oder Stoßstangenairbags. Unterstützend wird an aktiven Schutzsystemen wie automatischen Bremssystemen gearbeitet. Ein Sensor misst den zu erwartenden Aufprall und leitet die Vollbremsung ein.

1.2.3 Umfeldbasierte Risikofaktoren und Präventionsmaßnahmen

Verschiedene Autoren haben die Ortslage von Fußgängerunfällen untersucht. Hier ergab sich die größte Häufung innerhalb geschlossener Ortschaften [10, 51]. Innerorts ergaben sich Häufigkeiten von mehr als 94% bei den Unfällen mit Personenschaden in den Zeitreihen des Statistischen Bundesamtes [93], 90% in der Publikation von Glaeser [29], 80% und sogar 70% bei tödlichen Unfällen in der Veröffentlichung von Saul et al. [87].

Nach vorliegenden Untersuchungen entsteht die Mehrheit der Unfälle beim Überkreuzen von Straßeneinmündungen oder beim Überqueren der Straße [33, 47]. In den USA wurden im Zeitraum 1995 bis 1998 in 63% der Unfälle mit Fußgängerbeteiligung das Überqueren der Fahrbahn als Unfallursache registriert [35]. Zur Erkennung von Risikofaktoren im Umfeld muss in erster Linie die Ausstattung der Fußgängerinfrastruktur betrachtet werden [68]. Hierzu gehören gekennzeichnete Gehwege, Breite und Zustand der Gehwege, Gehwegteilung durch Radweg oder Parkflächen, Abtrennung durch Randstein, gekennzeichnete (Zebrastreifen) und ungekennzeichnete Überwege, Ampelanlagen, Fußgängerbrücken und -tunnel, öffentlicher Personennahverkehr, Berufspendlerverkehr, Bahnhaltstellen und nahe gelegene öffentliche Einrichtungen, Schulen, Betriebe, Einkaufsmöglichkeiten oder Behörden.

Die Häufigkeit von Unfällen an oder auf Fußgängerüberwegen gemessen an allen Fußgängerunfällen wurde mit 44% [47] und 38% [35, 48] berichtet.

Das Unfallrisiko auf markierten Überwegen steigt nach Johansson und Leden auf 27% für die Fußgänger an [42]. In anderen Studien waren 64% [33] und 62% [48] der Unfälle nicht in der Nähe von Fußgängerüberwegen anzutreffen.

Die Geschwindigkeit des Straßenverkehrs wird beeinflusst durch die Beschaffenheit und Ausstattung der Fahrbahn. Gemeint sind z.B. die Anzahl der Fahrspuren, der Fahrbahnbelag, die Spurbreite, die Ausstattung mit Mittel- und Randstreifen oder Busspur. In einer Studie aus dem Iran wird dargestellt, welchen Einfluss die

geometrische Beschaffenheit der Straße an Fußgängerüberwegen auf die Fahrzeuggeschwindigkeit hat. In dieser Analyse wird zudem dargestellt, dass mit steigender Geschwindigkeit die Unfallzahl und Verletzungsschwere zunimmt [68].

Generell müssen Licht- und Sichteinflüsse als Unfallursache berücksichtigt werden [103]. Im Literaturvergleich ereignen sich die Unfälle zumeist bei guten Sichtverhältnissen in der Hauptverkehrszeit [49]. Im Durchschnitt gibt dies Weinreich in seiner Veröffentlichung mit 30% an [104]. In einer weiteren Studie wurden 42% aller Fußgängerunfälle in der Dunkelheit festgestellt [47]. Bezogen auf tödliche Unfälle wird für „Dunkelheit“ ein 7fach höheres Risiko im Vergleich zu Unfällen bei Tageslicht festgestellt [95]. Dunkelheitsunfälle lassen sich durch verbesserte Lichtinstallationen in Kurven, Schnellstraßen und am Fahrzeug selbst nachweislich reduzieren [95, 103]. Durch Reflektoren an der Fußgängerkleidung ließen sich diese für die PKW-Fahrer in der Dunkelheit besser erkennen und das Gefahrenpotential könnte weiter gesenkt werden [100].

Die Straßen- und Verkehrsabläufe müssen weiter optimiert werden. Ein Ansatz der Sicherheitssteigerung liegt in der Änderung der Ampelschaltung mit der Einführung einer dauerhaften Rotphase für alle Richtungen des Fahrzeugverkehrs, wenn nur geringer Verkehr festgestellt wird. Somit kann nachweislich die Geschwindigkeit in Risikoarealen gesenkt werden [20, 57]. Entscheidender Faktor bleibt die Senkung der Fahrzeuggeschwindigkeit durch geeignete Fahrbahnanpassung an Überwegen und in Arealen mit hohem Fußgängeranteil. Die Möglichkeiten reichen von Fahrbahnschwellen oder -rampen, erhöhten Fußgängerüberwegen über Spureinengungen und müssen nach Umsetzung weiter beobachtet werden [22]. Durch geänderte bauliche Maßnahmen kann die Wachsamkeit der Fußgänger im Straßenverkehr jedoch deutlich nachlassen. Daher ist für die Fahrer weiterhin Vorsicht geboten [42].

In der Publikation von Mohammadipour und Alavi wurden direkt an einem erhöhten Fußgängerüberweg und an einer definierten Zone hinter dem Überweg sowohl Videoaufzeichnungen als auch Radarkontrollen durchgeführt. Damit sollte der Geschwindigkeitsunterschied beider Punkte verglichen werden. Es konnten jedoch nicht beide Messpunkte für dasselbe Fahrzeug verwendet werden, da es nach der

ersten Radarkontrolle zu einer drastischen Geschwindigkeitsreduktion kam [68]. Die Studie beweist ungewollt den Nutzen fotografischer Kontrollen. Zudem wird die mangelnde Durchsetzung von Strafen bei Verletzung gültiger Verkehrsregeln durch manche Autoren kritisiert [35, 49].

Eine steigende Verkehrsgefährdung ist bei zunehmender Bevölkerungs- und Besiedlungsdichte feststellbar. Dabei scheint der Schlüssel für das tatsächliche Gefahrenpotential auch in der Gefährdungswahrnehmung des Umfelds zu liegen. So werden tatsächliche Gefahrenpunkte als solche gar nicht erkannt oder andersherum potentielle Gefahrenareale überschätzt. Dies macht ein entsprechendes Verhalten für die Verkehrsbeteiligten selbst sehr schwierig. Für Ingenieure, Techniker und andere Beteiligte schränkt es die Möglichkeiten ein, Einflüsse auf die Umgebungsgestaltung und damit Gestaltung der Straßenlandschaft zu nehmen [21].

1.3 Verkehrsunfallforschung: Forschungsansätze und Methoden

1.3.1 Geschichte der Unfallforschung vor dem Hintergrund des Fußgängerunfalls

Die zunehmende Motorisierung nach den Weltkriegen, insbesondere aber in den 60er-Jahren, wurde begleitet von einem Anstieg der Opferzahlen. Vor einem medizinischen und ökonomischen Hintergrund wurden notwendige Forschungsbestrebungen gefordert und realisiert. Ab 1950 erfolgten erste systematische Unfallanalysen auf medizinischem Sektor vertreten durch K. H. Bauer und E. Gögler in Heidelberg, im technischen Bereich durch E. Fiala in Berlin [10, 30, 99].

Auf Beschluss des Deutschen Bundestages wurde 1970 das Aufgabengebiet der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) als zentrale Stelle für die Unfallforschung im Straßenverkehr bestimmt. Diese setzte nicht nur interdisziplinäre Forschungstätigkeiten um, sondern erzielte auch durch institutsübergreifende langjährige Bestrebungen eine flächendeckende Verkehrsberuhigung und Errichtung von Tempo 30-Zonen in Gemeinden. Zudem schaffte sie die Grundlagen für die gesetzlichen Regelungen zur Geschwindigkeitsbegrenzung auf Bundesstraßen und Autobahnen (1972 und 1973).

Die Verkehrsunfallforschung etablierte sich ab 1969/70 in Deutschland mit den Forschungsarbeiten von Prof. H. Appel. Unterstützt von der Bundesanstalt für Straßenwesen besteht seit 1973 an der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH) und in Kooperation mit der Technischen Universität Berlin (TUB) eine intensive Unfallforschung im Großraum Hannover [11].

Der Sektor „Verkehrssicherheit“ wurde als eigene Notwendigkeit erkannt und auf nationaler wie internationaler Ebene weiter ausgebaut.

Das Jahr 1970 scheint in der alten Bundesrepublik einen Wendepunkt in der strategischen Unfallverhütung insbesondere für den Fußgängerunfall darzustellen. Bei mehr als 6000 im Straßenverkehr getöteten Fußgängern wurde die Umsetzung geeigneter Strategien unumgänglich [80, 104]. Der Fußgängerunfall wurde

zunehmend zu einer gesondert betrachteten Unfallgruppe. Daraus resultierten nicht nur Informationen über die Kinematik dieses Unfalltypus [9, 13, 94, 104].

Erkenntnisse über die Systematik des Unfallgeschehens hinsichtlich Ursachen, Hergang und Unfallfolgen machten zahlreiche Lösungsansätze wie veränderte Verkehrsführung, Tempolimits, Optimierung der Fahrzeugaufbauten und Verkehrserziehung möglich. Dies spiegelte sich in den kontinuierlich sinkenden Unfallzahlen wider [92, 93].

Ein stetiger Wandel von neuen Fahrzeugtypen, Art und Umfang der Verkehrsnutzung sowie demographischer und sozioökonomischer Wandel machen eine stete Erforschung der Unfallereignisse jedoch notwendig.

Innerhalb der zurückliegenden Jahrzehnte veränderten sich auch die Methoden und Instrumente der Unfallforschung.

1.3.2 In-depth-Unfalldatenerhebungen

Ein substantieller Anteil des Wissens um typische Verletzungsmuster entstammt den so genannten in-depth-Unfalldatenerhebungen. Als in-depth-Unfalldatenerhebungen bezeichnet man solche Untersuchungen, die ein möglichst breites Spektrum an Daten in maximaler Tiefe über einen möglichst langen Zeitraum erfassen. Die ausgewiesene Stärke solcher Untersuchungen liegt in der Möglichkeit der Verknüpfung technischer, medizinischer, psychologischer und gegebenenfalls weiterer Forschungsansätze. Dafür ist grundsätzlich ein mehrstufiges Vorgehen erforderlich, da die gewünschte Analyse Daten zum Unfallablauf, zu den beteiligten Unfallpartnern, zu den Unfallfolgen und auch zu den Abläufen der technischen und medizinischen Unfallrettung erfordert. Die Erhebung beginnt üblicherweise direkt am Unfallort. Dort werden Daten zur Unfallumgebung dokumentiert, beispielsweise zum Wetter, zum Straßenzustand, zur Verkehrsführung, zur Lage der Fahrzeuge und externer Hindernisse (z.B. Baum) und zum Vorhandensein von Spuren (z.B. Schleuderspuren). Eine fotografische Dokumentation ist obligat. Im weiteren Verlauf schließt sich häufig eine Vermessung des Unfallorts und eine technische Untersuchung der beteiligten Unfallfahrzeuge an. Auf medizinischer Seite werden alle Verletzungen detailliert erfasst und ihre Entstehung rekonstruiert. Zusätzlich

werden die logistischen, diagnostischen und therapeutischen Aktivitäten des medizinischen Notfallmanagements erfasst. Erfüllt eine Untersuchung einen Großteil dieser Bedingungen mit dem Ziel einer umfassenden Rekonstruktion des Unfallhergangs und der Entstehung der Unfallfolgen, so kann sie als in-depth-Untersuchung bezeichnet werden. Die vorliegende Untersuchung ist eine solche in-depth-Unfalldatenerhebung und basiert auf den Erfahrungen früherer Untersuchungen der beteiligten Studienpartner.

In Deutschland sind in diesem Zusammenhang insbesondere die in-depth-Unfalldatenerhebungen an der Medizinischen Hochschule Hannover (seit 1973), der Technischen Universität Dresden (seit 1999) und der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald (2001-2005) zu nennen [58, 76, 88].

Alle Projekte arbeiten mit einer vergleichbaren Erhebungsmatrix und mit dem so genannten GIDAS-Datensatz (German In-Depth Accident Study). Auch die Erhebungsmethodik ist vergleichbar und kann im Detail den zitierten Publikationen entnommen werden. Weitere vergleichbare Untersuchungen werden auch von Automobilkonzernen durchgeführt, beispielsweise von der AUDI AG in Zusammenarbeit mit der Abteilung für Unfallchirurgie des Universitätsklinikums Regensburg (AARU - Audi Accident Research Unit) und der BMW AG in Zusammenarbeit mit der Ludwig-Maximilians-Universität München [77].

1.3.3 Biomechanische Untersuchungen

Unter dem Begriff biomechanische Untersuchungen werden verschiedene methodische Forschungsansätze summiert. Alle biomechanischen Untersuchungen bedienen sich eines experimentellen Modells, wozu beispielsweise Crash-Tests, Materialprüfungen und Kadaverstudien gehören. Resultierend aus diesen Ergebnissen erhält man den numerischen Ansatz also computerbasierte Simulationen [4]. Gemeinsames Merkmal biomechanischer Untersuchungen ist die Vereinfachung (Modellierung) realer Wirkzusammenhänge und die dadurch oftmals limitierte externe Validität. Trotzdem haben sie für die Analyse des Fußgängerunfalls große Bedeutung erlangt, da sich in vivo Experimente aufgrund des hohen Gefährdungspotenzials für freiwillige Probanden häufig verbieten.

Die Kadaver- oder als Leichenstudien bekannt gewordenen Untersuchungen konnten sich aus ethischen Gesichtspunkten und auch aus Gründen der Verfügbarkeit des Untersuchungsguts nicht etablieren [3, 87]. Hinzu kam, dass einige Untersuchungsvariablen wie z.B. intrakranielle Verletzung nicht fassbar waren [97]. Ähnlich denen der Insassenforschung wurden für Fußgängercrashtests spezielle anthropomorphe Testpuppen entwickelt [87]. Speziell modifizierte Dummyvarianten werden an einem Halteapparat befestigt und die Kollision mit dem Fahrzeug in verschiedenen Anstoßkonstellationen nachvollzogen [55, 89, 102]. Zur Testung spezifischer biomechanischer Fragestellungen kommen weiterhin Einzelkomponenten zum Einsatz. Es stehen spezielle Prüfkörper jeweils für Kopf, Hüfte und Unterschenkel als Subsystemtest zur Verfügung [23, 41, 53, 62]. Beim Kopfprüfkörpertest wird ein Kinder- oder Erwachsenenprüfkopf mit einer Geschwindigkeit von 35 km/h in ein definiertes Areal der Motorhaube geschleudert. Die Prüfpunkte wurden dort gewählt, wo hohe Kopfbelastungen aufgrund der Steifigkeiten zu erwarten sind. In der EEVC WG 17 sind sowohl die Kopfprüfkörpermassen (Kinder: 3,5 kg, Erwachsene: 4,8 kg) als auch der Anprallwinkel (Kind 50°, Erwachsene 65°) festgelegt [26, 27]. Grundlagen für den Kopfprüfkörper d.h. deren Masse lieferten Untersuchungen in der Sportmedizin. Als Anhalt für die zu erwartende Verletzungsschwere des Kopfes dient der HIC (Head Injury Criterion) oder HPC (Head Performance Criterion) Wert. Dieses Verletzungskriterium wird aus den resultierenden, translatorischen Beschleunigungen im Kopfschwerpunkt abgeleitet. Im Test sollten 2/3 der Motorhaube einen HIC-Wert von 1000 und 1/3 der Motorhaube einen Wert von 2000 nicht überschreiten [27, 53]. Ergänzt werden Dummy- und Kadavertests durch verschiedene numerische Simulationsmodelle, die sich meist einer modifizierten Version des 50%-Hybrid-III-Dummy bedienen [63, 79, 87]. Dabei erlauben rechnerische Simulationen sogar die Betrachtung einzelner Gelenkregionen oder Ermittlung von biomechanischen Belastungsgrenzen der einzelner Funktionseinheiten wie z.B. des komplexen Knieband- und Gelenkapparates oder des Kopfes [4, 63].

1997 wurde das Euro NCAP-Testverfahren (European New Car Assessment Program) als Verbrauchertest zur Bewertung der Sicherheitseigenschaften der Fahrzeuge eingeführt [28]. Damit erlangte der Fußgängerschutz großes öffentliches Interesse. Die diesen Testverfahren zugrunde liegenden Komponententests bilden einen kleinen Ausschnitt des Gesamtunfallgeschehens ab. Kopf-, Bein- und

Beckenanprall an der Fahrzeugfront werden untersucht. Aus den vorangegangenen Untersuchungen weiß man, dass dies die häufigsten und schwersten im Unfallgeschehen betroffenen Körperteile sind [26].

1.3.4 Weitere Untersuchungsmethoden

Die Widerstandsfähigkeit und gute Verfügbarkeit der Dummies erlaubte intensivere Testbedingungen als mit den Kadavertests [97]. Andererseits zeigte sich in den Untersuchungen, dass die Körpersegmente zu unflexibel zur Darstellung des komplexen Ablaufes der Fußgängerkollision sind. Die Kinematik beider Testbedingungen unterschied sich deutlich [3, 87, 91].

Detaillierte und objektive Beschreibungen des Verletzungsmusters konnten aus Autopsiestudien gewonnen werden [9, 12, 25, 33, 44, 45, 66, 86]. Nachteile ergaben sich jedoch aus dem Aufwand und den fehlenden Daten des Unfallablaufs. Es ließen sich nur bedingt Aussagen zur Entstehung von Verletzungen und damit zur Prävention ableiten.

Die krankenhausbasierten Erhebungen wurden in Notaufnahmen, Ambulanzen oder während des stationären Behandlungsablaufes durchgeführt [7, 18, 51, 104]. Üblicherweise wurden Befragungen zum Unfallmechanismus mit einer Auswertung der Akten kombiniert. Die Durchführung erschien einfach, jedoch war keine repräsentative Beschreibung des Spektrums an Verletzungen möglich, da es sich isoliert um stationär behandelte Verletzte handelte. Unzuverlässige Interpretationen oder Erinnerungen des Unfallmechanismus durch die Fußgänger und soziale Erwünschtheit oder Sorge um versicherungsrechtliche oder zivilrechtliche Belange hatten Einfluss auf das Antwortverhalten.

Nach kritischer Würdigung der Vor- und Nachteile verschiedener methodischer Ansätze verbleibt zur Beantwortung der Forschungsfragen lediglich die Durchführung einer medizinisch-technischen in-depth-Unfalldatenerhebung.

1.4 Motivation und Zielsetzung

Schwere und tödliche Verkehrsunfälle urbaner Regionen resultieren in markanter Ausprägung aus der Kollision zwischen Fußgänger und Pkw. Die signifikante Diskrepanz zwischen Masse, Geschwindigkeit und Struktur beider Kollisionspartner bedingt die Auswirkungen. Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass Verkehrsunfälle in gewissen Grenzen nach gleichartigen Mustern entstehen und zu vorhersehbaren Folgen führen. Kollisionen zwischen Fußgänger und Pkw sind diesbezüglich aber nicht ausreichend untersucht worden. Insbesondere fehlen Untersuchungen, welche sowohl die medizinischen als auch die technischen Parameter analysieren.

Solche Untersuchungen sind logistisch sehr anspruchsvoll, weshalb häufig nur vergleichbar wenige Fälle mit vollständigen Datensätzen vorliegen. Daher wurden in einem festgesetzten Untersuchungszeitraum konsekutiv alle gemeldeten und die Einschlusskriterien erfüllenden Pkw-Fußgängerkollisionen im Erhebungsgebiet Berlin und teilweise Brandenburger Umland erfasst. Nach Prüfung auf Vollständigkeit der Daten wurden dann eine reduzierte Anzahl von Fällen einer detaillierten qualitativen Bewertung und statistischen Analyse unterzogen.

Der Schwerpunkt der Auswertung bezog sich auf die folgenden Fragen:

- Welche Assoziationen lassen Unfallumgebung, Kinematik und Verletzungsmuster der speziellen Kollisionssituation zwischen Fußgänger und Pkw erkennen?
- Gibt es Besonderheiten im Ursachen- und Wirkungszusammenhang des Unfallgeschehens?

Damit trägt die vorliegende Untersuchung zu einem systematischen Verständnis von Kollisionen zwischen Pkw und Fußgängern bei. Dies kann für die primäre Unfallprävention (Vermeidung von Kollisionen) genutzt werden, da grundlegende Merkmale der Entstehung von Kollisionen erfasst werden. Weiterhin kann die medizinische Versorgung unfallverletzter Fußgänger verbessert werden, da das Wissen um typische Verletzungsmuster eine noch effizientere Erstversorgung ermöglicht. Nicht zuletzt sind die erhobenen Daten geeignet, Hinweise auf

verbesserte fahrzeugtechnische Lösungen sowie deren Prüfung in standardisierten Tests zu geben.

2 Material und Methoden

2.1 Grundlagen der Untersuchung

Grundlage dieser Arbeit ist die **IMPAIR** Studie (In-Depth **M**edical **P**edestrian **A**ccident Investigation and **R**econstruction), die als prospektive Beobachtungsstudie vom 1. Juli 2001 bis zum 31. Dezember 2004 im Großraum Berlin durchgeführt worden ist. Das Studienprotokoll wurde von der Ethikkommission der Freien Universität Berlin geprüft, am 28. Juni 2001 wurde ein positives Ethikvotum erteilt.

Die beteiligten Institutionen und Personen sowie deren Aufgabenbereiche waren:

(1) Unfallkrankenhaus Berlin, Warener Straße, 12683 Berlin

- Studienleitung: Priv.-Doz. Dr. med. Julia Seifert, Priv.-Doz. Dr. med. Dirk Richter, Prof. Dr. med. Axel Ekkernkamp
- Biostatistische Supervision: Priv.-Doz. Dr. med. Dirk Stengel
- Studienausführung: Melissa Beirau
- Aufgabenbereiche: medizinische Unfallaufnahme und Dokumentation, medizinische Interpretation von Verletzungsentstehung und Verletzungsfolgen, statistische Analyse und Interpretation der Ergebnisse.

(2) DEKRA Automobil GmbH, Handwerkstr. 15, 70565 Stuttgart und Kurt-Schumacher-Damm 28, 13405 Berlin

- Studienleitung: Dipl. Ing. Walter Niewöhner, DEKRA Stuttgart
- Projektkoordination und Ausführung: Dipl. Ing. Helmut Enk, DEKRA Berlin
- Aufgabenbereiche: technische Unfallaufnahme und Dokumentation, technische Unfallrekonstruktion und Interpretation der Verletzungsentstehung

(3) Ford Forschungszentrum Aachen GmbH, Süsterfeldstr. 200, 52072 Aachen

- Studienleiter: Dr. med. Dipl. Ing. Werner Koch
- Aufgabenbereiche: Studienleitung und -koordination, Datenzusammenführung und Auswertung

2.2 Ein- und Ausschlusskriterien

Die fahrer- und fahrzeugseitigen Ein- und Ausschlusskriterien sind wie folgt definiert:

- Pkw-Erstzulassung in oder nach dem Jahr 1995 und
- geschätzte Anstoßgeschwindigkeit von ≥ 20 km/h und
- frontaler Vollstoß und
- Einverständniserklärung des Fahrers.

Die fußgängerseitigen Ein- und Ausschlusskriterien sind wie folgt definiert:

- Vorliegen einer Verletzungsschwere gemäß Schweregrad AIS 2-6 und
- Kollision im Stehen oder Gehen ohne Beteiligung von Skateboard, Tretroller, Rollstuhl o.ä. und
- Einverständnis des Fußgängers oder – bei fehlender Geschäftsfähigkeit oder Tod – Einverständnis einer vertretungsberechtigten Person.

Als umfeldbezogene Einschlusskriterien gelten weiterhin:

- Behandlung im Studienkrankenhaus,
- Unfall im Aufnahmebereich des Studienkrankenhauses, d.h. aus den östlichen Stadtbezirken Berlins oder
- Unfall außerhalb des Aufnahmebereichs bei Wahrung einer 90-Minuten Frist zwischen Unfall und Datenaufnahme am Unfallort.
- vollständige Unfallaufnahme-, Untersuchungs- und Rekonstruktionsdaten.

Der Einschluss eines Falles in die weitere statistische Auswertung erfolgte nur dann, wenn die genannten Einschlusskriterien erfüllt wurden, keine Ausschlusskriterien (s.o. oder siehe Kapitel 3.1) vorlagen und die Daten für eine hinreichend sichere medizinische und technische Rekonstruktion des Falles ausreichten. Letzteres muss von den beteiligten Ingenieuren und Ärzten in einer Einzelfallwertung bestätigt oder verworfen werden.

2.3 Untersuchungsablauf

2.3.1 Vorbereitung und Datenerhebung am Unfallort

Die Unfallaufnahme erfolgte als prospektive in-depth-Unfalldatenerhebung direkt am Unfallort. Dazu wurde ein Einsatzfahrzeug mit Sonder- und Wegerechten genutzt (Abbildung 3). Dieses war am Studienkrankenhaus stationiert, alle Mitarbeiter waren in 24-stündiger Rufbereitschaft. Die Alarmierung erfolgte zeitgleich mit den Rettungskräften über die Leitstelle der Berliner Feuerwehr. Jeder Unfall wurde nach Alarmierung ohne Zeitverzug von einem Team aus einem medizinischen Mitarbeiter des Studienkrankenhauses und einem technischen Mitarbeiter der DEKRA angefahren. Zu jeder Zeit der Untersuchung am Unfallort und auch im weiteren Verlauf hatten notfallmedizinische Maßnahmen sowie verkehrssichernde Maßnahmen der Polizei und anderer Einsatzkräfte stets Vorrang vor der Datenaufnahme.

Abb. 3: Einsatzfahrzeug



Am Unfallort wurden eventuell sichtbare Bremsspuren, Splitterfelder, Blut- oder andere Flüssigkeitsflächen ausgemessen und fotografiert. Zusätzlich wurden Rutschspuren des Fußgängers, Abriebspuren der Schuhe des Verunfallten, weg geschleuderte Gegenstände wie Brillen oder Einkaufstaschen dokumentiert. Diese Angaben erleichterten die Rekonstruktion des Unfalls, insbesondere die Schätzung der Kollisionsgeschwindigkeit. Zusätzlich zur digitalen Fotografie stand die Möglichkeit der Videoaufzeichnung für den Unfallort zur Verfügung. Eine entscheidende Hilfe für die Rekonstruktion war die Videoaufzeichnung während der Fahrt. Mithilfe dieser Technik war die reale Darstellung des Anfahrtsweges des

Kollisionsfahrzeuges und der Straßenverhältnisse möglich. Zum Einsatz kam ein JVC-Digital-Camcorder GR-DCV100E.

Protokollarisch festgehalten wurde die Beschaffenheit der Fahrbahndecke. Dazu gehörten die Art des Belages wie z.B. Asphaltdecke, Kopfsteinpflaster o.ä., die Witterungsverhältnisse und Fahrbahnunregelmäßigkeiten. Verzeichnet wurde, ob die Fahrbahn nass, trocken oder winterglatt war und, ob Unebenheiten, Schlaglöcher oder andere Beschädigungen der Fahrbahn vorgelegen haben. Dokumentiert wurden die Licht- und Sichtverhältnisse und die Straßenausleuchtung.

Nach Möglichkeit wurde das Fahrzeug vor Ort auf Beschädigungen und Kollisionsspuren untersucht. Bei Beschlagnahmung des Pkw erfolgte eine intensive Untersuchung auf dem Stellplatz der Polizei. In wenigen Fällen wurde das Fahrzeug bei Fahrtüchtigkeit vom Unfallpartner selbst entfernt. Ursache war eine fehlende zeitnahe Alarmierung zum Unfallort. In diesen Fällen wurde nur die Unfallstelle besichtigt, Spuren gesichert und das Unfallfahrzeug nachträglich untersucht. Fahrzeugbeschädigungen und die Gegebenheiten am Unfallort wurden detailliert fotografisch dokumentiert. Eine Einverständniserklärung des Halters oder eine Genehmigung durch die Staatsanwaltschaft waren dafür erforderlich.

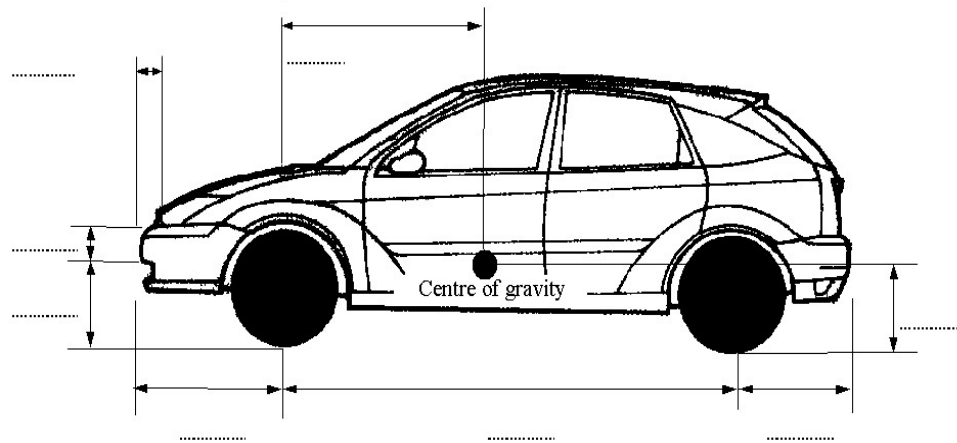
Zusätzlich zu Beschädigungen am Fahrzeug wurde auch die Antragung organischer Materialien oder Fasern der Kleidung überprüft. Außerdem wurden alle technischen Merkmale aus dem Fahrzeugschein registriert.

Zu den für die Rekonstruktion notwendigen technischen Merkmalen zählten:

- Länge, Breite, Gewicht und Höhe des Fahrzeuges,
- Untere und obere Begrenzung der Stoßstange,
- Höhe der Motorhaubenkante,
- Länge, Breite und Neigungswinkel der Motorhaube,
- Länge, Breite und Neigungswinkel der Frontscheibe,
- Bremsleistung und Bremsausstattung,
- Größe und Leistung des Motors,
- Reifentyp, Maße und Zustand,
- Größe und Inhalt des Tanks,
- Beleuchtungsverhältnisse der Lichtanlage,
- technische Sicherheit des Fahrzeuges,
- vorhandene Zusatzaufbauten, Radioanlage etc.

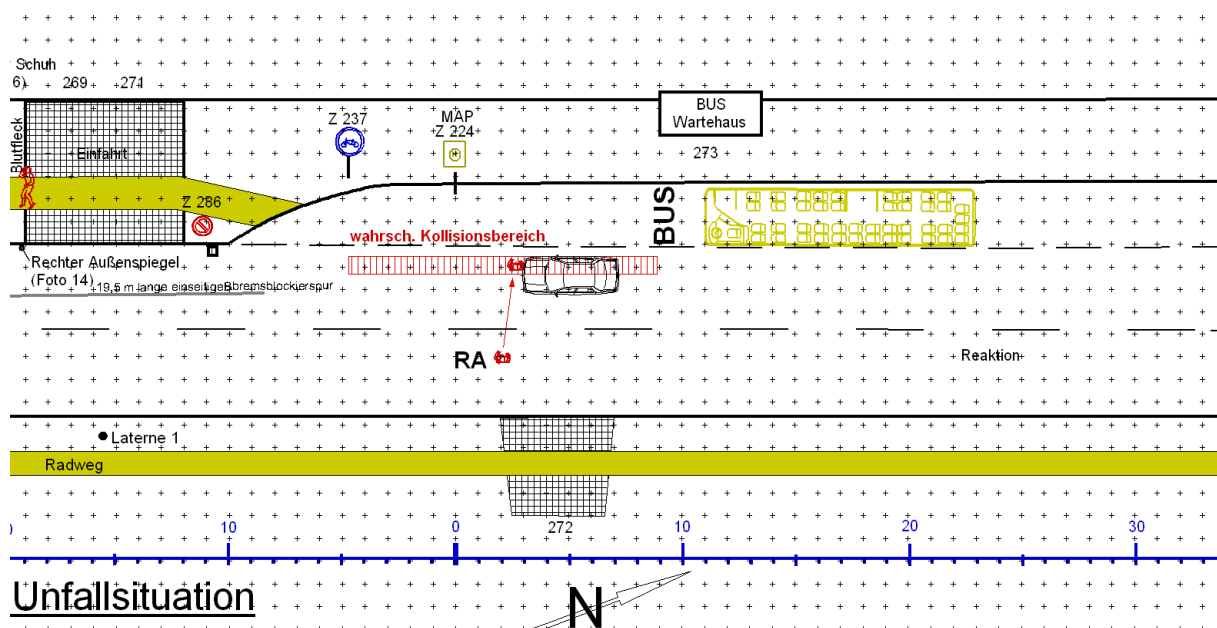
Abbildung 4 zeigt exemplarisch eine Vorlage zur Dokumentation der Fahrzeugmaße.

Abb. 4: Vorlage zur Messung der Fahrzeugmaße
(Quelle: IMPAIR-Codebook)



Alle Spuren und Messungen wurden in eine maßstabsgetreue Unfallskizze, angefertigt mit dem DEKRA-Programm Analyzer Pro, eingetragen. Sämtliche Fahrbahnabmessungen, der Endstand des PKW und die Fußgängerendlage nach dem Anprall waren darin enthalten (Abbildung 5).

Abb. 5: Unfallskizze, angefertigt mit DEKRA Analyzer Pro
(Quelle: DEKRA Berlin)



2.3.2 Erhebung von Verletzungsmuster und Umfeldfaktoren

Die Untersuchung der Verunfallten erfolgte erst nach deren Einlieferung in die Rettungsstelle des Studienkrankenhauses. Die Erfassung von Daten außerhalb der klinischen Routine geschah nur nach schriftlichem Einverständnis des Verunfallten. Bei nicht-einwilligungsfähigen Patienten, beispielsweise Bewusstlosen oder Verstorbenen, wurde das Einverständnis der Angehörigen eingeholt bzw. die Untersuchung durch Einverständnis der Staatsanwaltschaft begonnen. Ein solches Vorgehen waren im Studienprotokoll und im Ethikantrag explizit vorgesehen und genehmigt worden.

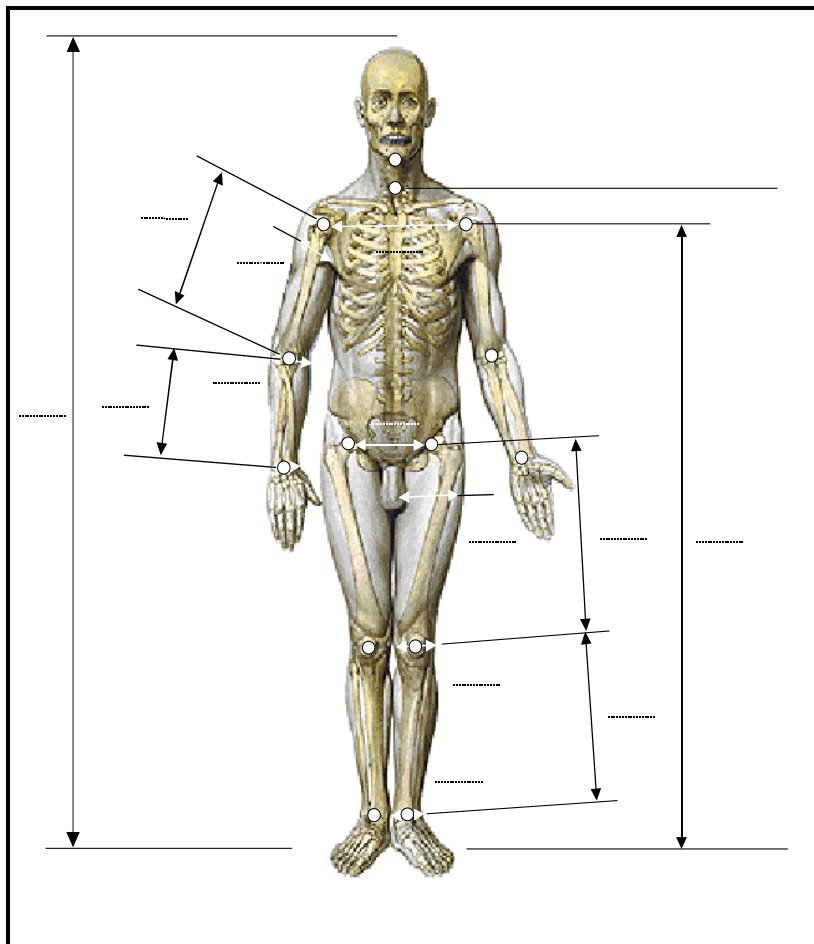
Grundlage der medizinischen Versorgung waren die im Studienkrankenhaus etablierten Versorgungsalgorithmen. Hierzu gehören unter anderem die Einbindung der präklinischen Versorgung in das strukturierte Rettungswesen des Landes Berlin, die Anwendung der Prinzipien von Advanced Trauma Life Support (ATLS®) in der Schockraumbehandlung und vergleichbarer prioritätengesteuerter Algorithmen in der Versorgung außerhalb des Schockraums. Diese werden im Folgenden nicht weiter beschrieben, da sie nicht Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit sind. Ergänzt wurden die etablierten Algorithmen durch Untersuchungen mit besonderer Bedeutung für die Feststellung der Unfallentstehung, des Unfallablaufs und der Verletzungsentstehung. So wurden während der Routinediagnostik alle Prellmarken, Hämatome, Abschürfungen und Platzwunden genauestens vermessen und mittels Digitalkamera vom Typ Canon PowerShot Pro 90 IS fotografiert. Die Vermessung der Verletzungen erfolgte mit Angabe über die Standhöhe (Fußsohle bis Höhe der Verletzung), Längs- und Querausdehnung und Verlaufsrichtung. Die schnellstmögliche Erfassung der Verletzungen sollte sicherstellen, dass eventuelle Verunreinigungen der Wunden durch Schmutz, Textilfasern, Glas- oder Lacksplitter festgestellt werden konnten. Zusätzlich konnte auch die Form und Tiefe der Wunden Hinweis auf den Ursprung der Verletzung geben. Nach der Wundversorgung oder einer operativen Therapie wäre dies nur schwer zu ermitteln gewesen.

Weitere Quellen für die objektive Erfassung der Verletzungen waren konsiliarische Untersuchungen, Operationsberichte und ausgewertete bildgebende Befunde, Arztbriefe und Gespräche mit den Verunfallten sowie gegebenenfalls mit den

Angehörigen. Im Falle des Ablebens des Verunfallten nahm ein Untersucher an der Sektion teil. Dabei wurden ebenfalls sämtliche Verletzungen dokumentiert, vermessen und digital fotografiert.

Ergänzend wurden im Rahmen der körperlichen Untersuchung auch bestimmte Körpermaße der Verunfallten ausgemessen. Diese waren für die medizinisch-technische Rekonstruktion der Kollision entscheidend und wurden daher in standardisierter Form den technischen Experten der DEKRA zur Verfügung gestellt. Gemessen wurden die Armlänge, die Beinlänge, die Sitzhöhe, die Körpergröße und das Gewicht, und zwar jeweils entsprechend den Vorgaben des Codebook der IMPAIR-Studie. Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Vorgaben zur Messung der genannten Körpermaße.

Abb. 6: Vorgaben zur Messung der Körpermaße
(Quelle: IMPAIR-Codebook)



2.3.3 Interdisziplinäre Unfallrekonstruktion

Bereits während der gesamten Unfallaufnahme war ein enger Informationsaustausch zwischen medizinischem und technischem Mitarbeiter gegeben. Möglichst jede am Patienten oder Fahrzeug festgestellte Verletzung bzw. Beschädigung sollte direkt nachvollzogen werden können. Traten in diesem Zusammenhang Unstimmigkeiten auf, konnte schnellstmöglich und gezielt nachuntersucht werden. Beispielsweise wurde bei einer festgestellten Knieverletzung des Patienten, am Fahrzeug genau nach einer Beschädigung oder Wischspur im Bereich der Stoßstange gesucht.

Nach vollständigem Vorliegen aller notwendigen Informationen wurde in regelmäßigen, persönlichen Konferenzen zwischen Medizinern und Technikern der Unfallhergang rekonstruiert. Maßgabe war es, jeder Verletzung ein verursachendes Fahrzeugteil zuordnen zu können. Alle Kollisionsphasen wurden nachvollzogen und mit bereits gesicherten Unfalldaten verglichen. Die Vergleichsdaten stammen aus dem „DEKRA-Katalog Fußgängerunfall“, einer umfangreichen Sammlung von Auswertungen früherer Dummyversuche und Realunfälle [56].

Lagen technische Daten über den Kollisionsbereich, Bremsweg, Längswurfweiten, Rutschweiten, Laufrichtung und Gehgeschwindigkeit des Fußgängers vor, konnte mithilfe von Vergleichskurven des Schrankenverfahrens oder mit dem Programm DEKRA-DUR (DEKRA Unfallrekonstruktionsprogramm, Version 10.1) die Kollisionsgeschwindigkeit berechnet werden.

Nach Abschluss aller Zuordnungen im Kollisionsablauf, Klärung der Abläufe der Kollisionsphasen und Berechnung der Kollisionsgeschwindigkeit wurde von jedem Unfall eine Einzelfalldarstellung angefertigt. In einem Zusammentreffen aller technischen und medizinischen Beteiligten wurden die Einzelfalldarstellungen der Unfälle erneut auf ihre Plausibilität überprüft.

Es muss in diesem Zusammenhang erwähnt werden, dass im Rahmen der IMPAIR-Studie eine Vielzahl von Daten qualitativ und quantitativ erfasst wurden. In Anbetracht der Zielstellung wird in der vorliegenden Arbeit aber nur ein Teil des Gesamtdatensatzes analysiert, als Ergebnis präsentiert und weiter diskutiert.

2.4 Datenverarbeitung und Statistik

2.4.1 Instrumente zur Beschreibung des Verletzungsmusters

Während sich die Beschreibung und Kategorisierung der Unfallumgebung und der Unfallkinematik an etablierten Vorgaben der von der DEKRA verwendeten Programme orientierte, mussten für die Beschreibung der Verletzungsmusters eigene Klassifikationssysteme heran gezogen werden. Als Pionier der Bewertung realer Unfallfolgen gilt Hugh De Haven, der bereits 1952 eine Bewertung der Verletzungen nach Flugzeugunglücken publizierte [24]. Im Jahr 1971 veröffentlichte die American Association for the Advancement of Automotive Medicine (AAAM) eine Pilotversion des Abbreviated Injury Scale (AIS) in Form eines Codebooks. Nach vielen Erweiterungen und Modifikationen liegt aktuell die AIS- 2008-Version, die Mehrzahl der gegenwärtig publizierten Arbeiten bezieht sich allerdings auf ältere Versionen [5, 6]. Gegenwärtig ist der AIS das weltweit am meisten verbreitete Klassifikationssystem. Es wird auch von den etablierten deutschen Unfallforschungseinrichtungen in Hannover, Dresden und Greifswald verwendet. In der vorliegenden Arbeit wurde die AIS-Version 1990 verwendet [5]. Dies war vorrangig der langen Erfahrungen des Studienteams mit dieser spezifischen Version geschuldet. Die Autorin geht nicht von einer maßgeblichen Verzerrung der Studienergebnisse durch Verwendung der inzwischen veralteten AIS-Version aus.

Der AIS unterteilt den menschlichen Körper in sieben definierte Regionen:

- äußerlich (external)
- Kopf (head)
- Hals (neck)
- Rumpf (thorax)
- Unterleib / Becken (abdomen / pelvic contents)
- Wirbelsäule (spine)
- Gliedmaßen (extremities).

Mit mehreren Zahlencodes wird der genaue Ort der Verletzung dokumentiert. Es folgen Codes für die Art und Ausdehnung der Verletzung (z.B. offene oder

geschlossene Verletzung, Verbrennung, Art des Knochenbruchs). Von besonderer Bedeutung ist die Bewertung der Verletzungsschwere. Dabei wird der Grad der Lebensbedrohung einer *einzelnen* Verletzung eingeschätzt. Wenn in der Literatur von einem „AIS 3“ gesprochen wird, so bezieht sich diese Angabe i.d.R. auf die Schwere der beschriebenen Einzelverletzung (so genannter „severity code“). Wichtig ist, dass diese Skalierung nicht linear ist. Tabelle 2 zeigt die Einteilung der Verletzungen nach Verletzungsschwere.

Schwere- grad nach AIS	Bezeichnung der Verletzungsschwere
0	unverletzt (no injury)
1	gering, leicht (minor)
2	mäßig, mittelschwer (moderate)
3	schwer, ernst (serious)
4	sehr schwer (severe) „Überleben wahrscheinlich“
5	kritisch, schwerst (critical) „akute Lebensgefahr, Überleben unsicher“
6	maximal, tödlich (maximum injury virtually unsurvivable) „nicht überlebbar“
9	unbekannt (unknown)

Tabelle 2: Einteilung der Verletzungsschwere gemäß Abbreviated Injury Scale

Insbesondere beim schwer oder mehrfach verletzten Unfallopfer ist nicht jede kleinste Verletzung für die Auswertung bzw. Therapie entscheidend. Daher ist es üblich, die jeweils schwerste Verletzung einer definierten Körperregion bzw. die insgesamt schwerste Verletzung anzugeben. Dann wird vom Maximum Abbreviated Injury Scale (MAIS) gesprochen. Ein „MAIS_{head} 3“ gibt beispielsweise an, dass der schwersten Kopfverletzung ein AIS 3 zugeordnet werden kann.

Die Tatsache, dass viele Unfallopfer mehrfache Verletzungen aufweisen und die Prognose maßgeblich von den biologischen Interaktionen dieser Schädigungen abhängt, erfordert ein weiteres Scoring-System. Häufig wird dazu der weltweit etablierte Injury Severity Score (ISS) herangezogen. Der ISS ist ein Maß für die Gesamtverletzungsschwere [8]. Ein einfacher Rechenalgorithmus erlaubt die Bestimmung des ISS aus dem MAIS, wobei die für den AIS und den ISS definierten Körperregionen nicht identisch sind. Details zur Definition der einzelnen

Verletzungen, zur Zuteilung zu Körperregionen und zur Verteilung von Zahlencodes können den entsprechenden Codebooks entnommen werden [5, 6, 8].

Für die Berechnung des ISS gilt: der ISS ist die Summe der Quadrate der drei höchsten MAIS aller ISS-Körperregionen. Beispiel: Mehrfachverletztes Unfallopfer mit $MAIS_{\text{head}} : 2$, $MAIS_{\text{extremities}} : 2$, $MAIS_{\text{spine}} : 4$, $MAIS_{\text{thorax}} : 1$. Der ISS errechnet sich dann aus $2^2 + 2^2 + 4^2 = 24$. Allgemein gilt ein $ISS > 15$ als potentiell lebensbedrohlich, da hier entweder eine schwere Einzelverletzung (Monotrauma mit $MAIS > 3$) oder eine Kombination mehrerer schwerer Verletzungen (Polytrauma) vorliegen muss. Eine nicht-überlebte Verletzung bzw. Verletzungskombination wird definitionsgemäß mit 75 kodiert. Wichtig ist, dass der ISS nicht linear ist und auch keine Aussagen zu den Einzelverletzungen erlaubt.

Zusammengefasst gibt der AIS bzw. MAIS die Einzelverletzungsschwere an, der ISS gibt die Gesamtverletzungsschwere an. Das Nicht-Überleben wird definitionsgemäß mit einem ISS 75 kodiert.

2.4.2 Statistische Auswertung

Die Fallzahlplanung stellte einen Kompromiss zwischen methodischen Vorgaben, logistischen Bedingungen und personellen Ressourcen dar. Angestrebt wurde eine robuste Schätzpräzision der Mittelwerte. Daher wurden folgende Bedingungen angenommen:

1. Standardfehler stabilisieren sich ab einer Fallzahl von $n=12$; dies wurde als minimal auswertbare Stichprobengröße angesehen,
2. Prozentuale Anteile sollten erst ab 30 auswertbaren Fällen berechnet werden,
3. Die binomial-exakten Standardfehler sollten auch bei geringen beobachteten Ereignisraten in keinem Fall den Punktschätzer überschreiten.

Mit wenigstens 37 Fällen wurden aus statistischer Sicht akzeptable Streuungen eingehalten; diese Stichprobengröße war realisierbar. Die statistische Auswertung erfolgte entsprechend der hypothesengenerierenden Auslegung der Untersuchung ausschließlich explorativ. Je nach Verteilungsvoraussetzung wurden Mittelwert,

Median oder Anteil mit probaten Streuungsparametern angegeben. Zudem erfolgte die Berechnung von 95% Konfidenzintervallen (95% KI) für Mittelwerte und Anteile.

Es wurden Vierfeldertafeln für die Beschreibung von Assoziationen zwischen binären bzw. ordinalen Größen aufgestellt; bei geringen Zellbesetzungen erfolgte ggf. eine Dichotomisierung. Mit Hilfe des exakten Tests nach Fisher wurden Assoziationen jenseits des Zufalls geprüft; p-Werte sind auch hier lediglich explorativ zu interpretieren. Auch wurden im Einzelfall Chancenquotienten (Odds Ratios) mit 95% Konfidenzintervallen zur Annäherung an relative Risiken berechnet. Bei Expositionsvariablen auf ordinaler Skala wurden in der logistischen Regressionsanalyse Dummy-Variablen ($x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$) generiert, um den Einfluss einer Expositionsausprägung auf das Outcome *im Vergleich* zu einer anderen Ausprägung zu untersuchen. Bei stetigen Einflussfaktoren wurde die Vorhersagewahrscheinlichkeit für das Outcome pro Zunahme um eine Einheit berechnet und grafisch dargestellt. Die statistische Auswertung erfolgte mit STATA 10.0 für Windows.

3 Ergebnisse

3.1 Beschreibung der Stichprobe

Im Studienzeitraum wurden insgesamt 160 Pkw-Fußgänger-Kollisionen angefahren, d.h. eine initiale Datenaufnahme am Unfallort durchgeführt. Hiervon mussten im weiteren Verlauf 123 Fälle ausgeschlossen werden, da Ausschlusskriterien feststellbar waren. Der Ausschluss erfolgte

- aufgrund der Nutzung von Skateboards, Inline-Skatern, Gehstützen (n=8 Personen),
- aufgrund eines fehlenden Einverständnis eines Unfallbeteiligten (n=23 Personen)
- aufgrund des Alters des Pkws (n=8 Fahrzeuge mit Baujahr vor 1995)
- aufgrund des Fehlens eines frontalen Vollstoßes (n=11 Streifkollisionen)
- aufgrund fehlender Rekonstruktionsmöglichkeiten (n=56 Fälle)
- aufgrund fehlender klinischer Angaben (n=17 Fälle).

Die verbleibenden 37 Pkw-Fußgänger-Kollisionen werden im Weiteren als Gesamtstichprobe bezeichnet. Ausschließlich diese 37 Fälle wurden statistisch ausgewertet.

3.1.1 Beschreibung der unfallbeteiligten Fußgänger

3.1.1.1 Alter der Fußgänger

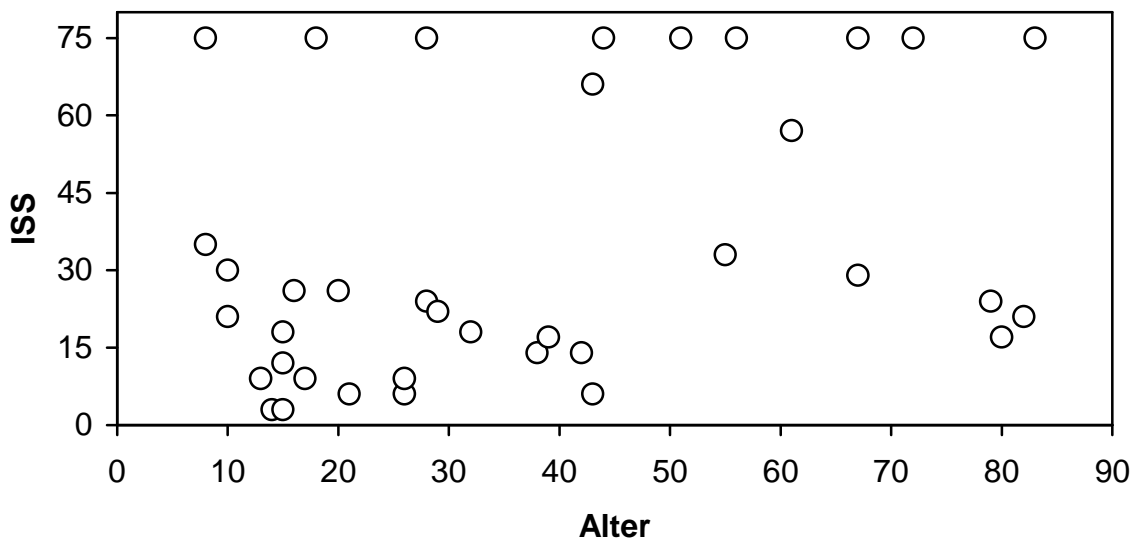
Das mittlere Alter der 37 Fußgänger (18 weiblich, 19 männlich) betrug 37.1 Jahre (SD 23,8) mit einer Spanne von 8-83 Jahren. Fußgänger im mittleren Erwachsenenalter von 25-44 Jahren (n=12, 32% der Gesamtstichprobe) waren häufiger vertreten als Kinder und Jugendliche unter 18 Jahren (n=11, 30%), Senioren ab 65 Jahren (n=7, 19%), 45-64-Jährige (n=4, 11%) und 18-24-Jährige (n=3, 8%).

Es wurde untersucht, ob die resultierende Gesamtverletzungsschwere (gemäß Injury Severity Score, ISS [8]) mit dem Alter der Fußgänger korreliert. Dabei zeigte sich,

dass ab dem Alter von über 50 Jahren (n=11) in 6 Fällen (55% der Altersgruppe) ein ISS >50 resultierte, darunter 5 tödliche Unfälle mit einem ISS 75. Zudem wurde in keinem einzigen Fall ein ISS ≤ 16 dokumentiert. In der Gruppe der Kinder und Jugendlichen bis zum 18. Lebensjahr (n=12) waren 2 Fälle mit ISS > 50 beide sogar mit letalem Ausgang d.h. ISS 75 (17% der Altersgruppe), 2 Fälle (17% der Altersgruppe) mit einem ISS ≥ 30 , 3 Fälle (25% der Altersgruppe) mit einem ISS 16 - 29 und 5 Fälle (42% der Altersgruppe) mit einem ISS <16. In der Altersgruppe zwischen 20 und 40 Jahren (n=10) war die Verteilung wie folgt: 1 Fall ISS 75 (10% der Altersgruppe), ISS-Werte im Bereich 30-50 waren nicht vertreten, ISS 16-29 in 5 Fällen (50% der Altersgruppe) und ISS ≤ 16 in 4 Fällen (40% der Altersgruppe). Die Verletzungsschwere in der Altersgruppe der 41-49jährigen (n=4) verteilte sich jeweils zur Hälfte auf ISS-Werte > 50 mit einem tödlichen Ausgang und die andere Hälfte auf den Bereich ISS < 16.

Abbildung 7 zeigt die Verteilung der Verletzungsschwere in Abhängigkeit vom Alter.

Abb. 7: Einzelfalldarstellung des ISS nach Alter



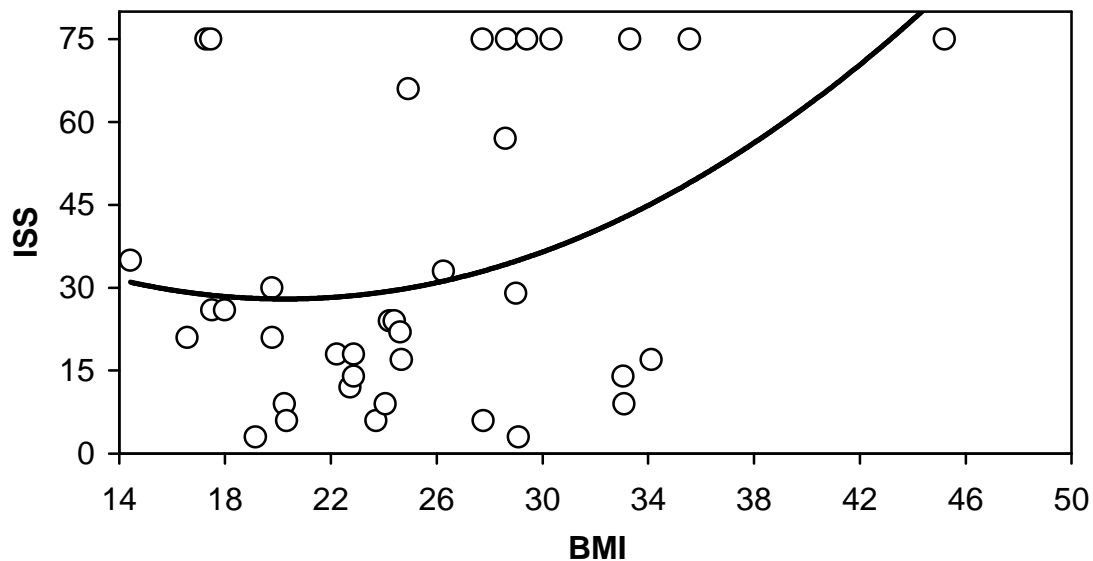
3.1.1.2 Body Mass Index (BMI) der Fußgänger

Auch der Body Mass Index wurde einer detaillierten Analyse bezüglich seiner Wirkung auf die Gesamtverletzungsschwere unterzogen. Über alle 37 Verletzten gemessen fand sich ein mittlerer Body Mass Index (BMI) von 25.2 (SD 6,4; 95% KI 23.1-27.4). In absteigender Häufigkeit wurden folgende BMI-Werte erhoben: BMI 20-24 (n=13, 35% der Gesamtstichprobe), BMI 15-20 (n=9, 24%), BMI 25-29 (n=8, 22%), BMI ≥ 30 (n=7, 19%). Ab einem BMI ≥ 30 (n=7) fanden sich 4 Fälle (57% der BMI-Kategorie) mit einem ISS >50 in diesen 4 Fällen sogar ISS 75, 1 Fall (14%) mit einem ISS zwischen 16-29 und 2 Fälle (29%) mit ISS <16.

Bei den BMI-Werten zwischen 25-29 (n=8) waren 4 Fälle (50% der BMI-Kategorie) mit einem ISS > 50 davon 3 mit ISS 75, 1 Fall (13%) mit ISS 30-49, 1 Fall (13%) mit ISS 16-29 und 2 Fälle (25%) mit ISS < 16. Im BMI-Wertebereich 20-24 (n=13) setzt sich die Verteilung wie folgt fort: 1 Fall mit ISS > 50 (8% der BMI-Kategorie), 6 Fälle (46%) mit einem ISS zwischen 16-29 und ebenfalls 6 Fälle mit einem ISS < 16 (46%). Unterhalb eines BMI von 20 (n=9) sind 2 Fälle (22%) mit einem ISS > 50 (beide ISS 75), 2 Fälle (22%) mit einem ISS 30-49, 4 Fälle (44%) mit einem ISS 16 - 29 und ein Fall (11%) mit einem ISS < 16 dokumentiert. Unter den Verletzten mit einem niedrigen BMI dominierten jüngere Patienten. So wurde bei 77% der 8-20-Jährigen ein BMI < 24 gemessen.

Abbildung 8 zeigt die mit dem BMI ansteigende Gesamtverletzungsschwere.

Abb. 8: Einzelfalldarstellung des ISS nach Body Mass Index (BMI), Trend mittels Regression Splines ermittelt.



3.1.1.3 Fehlverhalten der Fußgänger als Unfallursache

Gemäß der Erhebungsmatrix musste nach kritischer Würdigung aller Faktoren mit Einfluss auf die Unfallentstehung eine einzelne Hauptursache identifiziert werden. In zwei Fällen konnte dem Fußgänger eine suizidale Absicht nachgewiesen werden (Fall 1: Abschiedsbrief / Fall 2: bezeugtes selbstgefährdendes Verhalten mit intentionaler Herbeiführung der Kollision). Innerhalb der verbleibenden 35 Fälle wurde in 23 Fällen (66%) ein Fehlverhalten der Fußgänger als unfallauslösend bewertet. In absteigender Häufigkeit wurden folgende Fehlverhalten dokumentiert: Unachtsamkeit des Fußgänger beim Überqueren der Fahrbahn (n=8, 35% der durch Fußgänger ausgelösten Kollisionen), Unachtsamkeit des Fußgänger beim Einsteigen in oder Aussteigen aus öffentlichem Verkehrsmittel (n=6, 26%), Alkoholmissbrauch des Fußgänger (n=5, 22%) und Überqueren einer roten Ampel (n=4, 17%).

3.1.2 Beschreibung der unfallbeteiligten Pkw-Fahrer

Das durchschnittliche Alter der Fahrer lag bei 37,9 Jahren (95% KI 32,8-43,0) mit einer Altersspanne von 18-63 Jahren. Männliche Fahrer (n=25, 68%) waren häufiger unfallbeteiligt als weibliche Fahrer (n=12, 32%). Eine altersabhängige Häufung fand sich für die 18-24 Jährigen (n=13, 35% der Gesamtstichprobe). Auffällig war die Beteiligung der 18-24-jährigen Männer in 21,6% der Unfälle. In absteigender Häufigkeit waren die Altersgruppen wie folgt vertreten: 18-24 Jahre (n=13, 35% der Gesamtstichprobe), 25-44 Jahre (n=12, 32%), 45-63 Jahre (n=12, 32%).

In 12 Fällen (34%) wurde ein Fehlverhalten auf Seiten der Pkw-Fahrer als unfallauslösend beurteilt. Die Häufigkeitsverteilung gestaltet sich wie folgt: Fahren mit überhöhter Geschwindigkeit (n=6, 50%), Unachtsamkeit des Fahrers (n=4, 33%), Fahren unter Alkoholeinfluss und Fahren ohne ausreichende Sicht (je n=1, je 8%). Da die Fahrer der Pkw kein Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit sind wird auf eine weiter führende Darstellung verzichtet.

3.1.3 Beschreibung der beteiligten Pkw

An den Unfällen waren folgende Pkw-Typen beteiligt:

- Alfa Romeo: Alfa Romeo 155,
- Audi: Audi A4,
- BMW: BMW 316, BMW 3,
- Chrysler: Chrysler Vision,
- Ford: Ford Courier, Ford Fiesta, Ford Mondeo,
- Mazda: Mazda 3,
- Mercedes Benz: Mercedes E 200, Mercedes E 220,
- Nissan: Nissan Primera,
- Opel: Opel Astra F Caravan, Opel Combo W 5774, Opel Corsa Typ A und B (n=4), Opel Vectra Typ A und B (n=4), Opel Zafira Selektion,
- Renault: Renault Clio RT, Renault Megane Scenic,
- Rover: Rover 416 SI,

- Seat: Seat Cordoba, Seat Ibiza,
- Skoda: Skoda Fabia,
- Suzuki: Suzuki Baleno,
- VW: VW Lupo, VW- Golf III, VW-Passat (n=2), VW-Polo (n=2), VW-Vento.

Das Kollisionsgewicht wurde als Summe des Fahrzeuggewichts, des Insassengewichts und der Zuladung inklusive Tankinhalt berechnet. Es lag durchschnittlich bei 1245 kg (95% KI 1161-1328 kg) und reichte von 850 kg bei einem Ford Fiesta bis 2060 kg bei einem VW Passat Typ 3B.

3.2 Beschreibung der Unfallumgebung

Die überwiegende Mehrheit der Unfälle (n=36 Unfälle, 97% aller Unfälle) geschah innerhalb der geschlossenen Ortschaft Berlin. Nur ein Unfall geschah außerhalb einer geschlossenen Ortschaft im Brandenburger Umland.

In allen untersuchten Unfallbereichen waren Geschwindigkeitsbegrenzungen beschildert. Die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten betragen dabei in absteigender Reihenfolge 60 km/h (3%), 50 km/h (91%), 30 km/h (3%) und 20 km/h (3% der Gesamtstichprobe).

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht zu den lokalen Gegebenheiten des Unfallortes. Auffällig ist die Dominanz von Fahrbahnquerungen an Orten ohne gekennzeichneten Überweg oder Ampel. Insgesamt 16 von 37 Unfällen (43% aller Unfälle) geschahen im Übergangsbereich öffentlicher Verkehrsmittel, entweder im Haltestellenbereich oder beim Ein- oder Ausstieg.

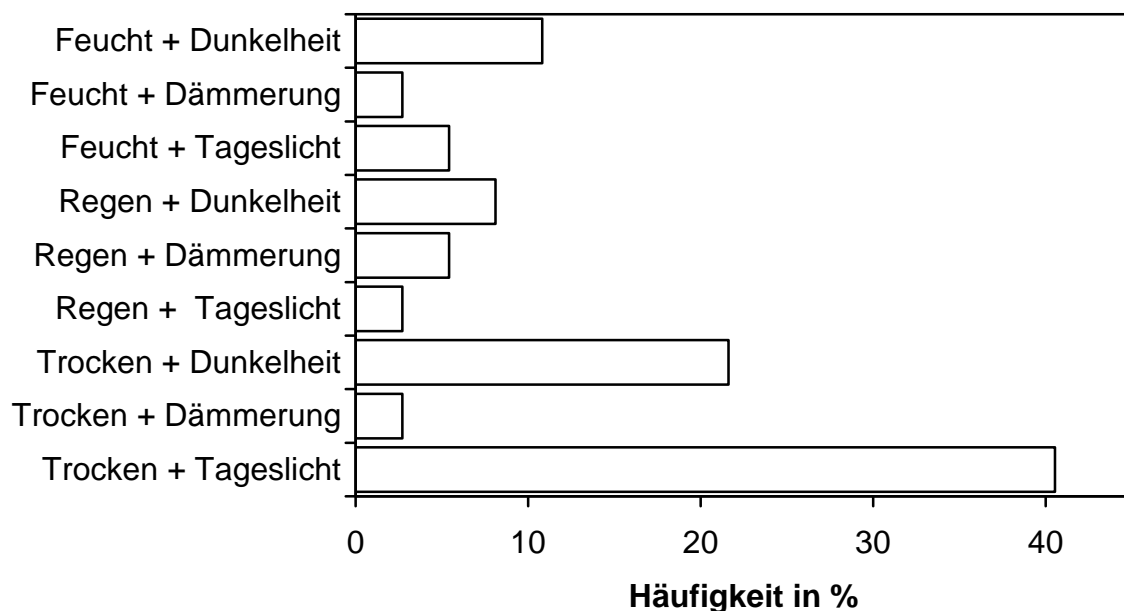
Lokale Gegebenheit	n	(% von 37)
Fußgängerüberweg mit Ampel	8	22
Passieren der Straße ohne Überweg	25	68
Fußgängerfurt ohne Zebrastreifen und ohne Ampel	3	8
Einstieg öffentliche Verkehrsmittel	1	3
Haltestellenbereich öffentliche Verkehrsmittel	15	40

Tabelle 3: Häufigkeitsverteilung der lokalen Gegebenheiten am Unfallort

Insgesamt 24 von 37 Unfälle traten bei trockenen Witterungsverhältnissen (65%; 95% KI 48-80%) auf. Feuchte und regennasse Straßen fanden sich bei jeweils sechs Unfällen (jeweils 16%). Bei einem Unfall war die Fahrbahn nass und vereist. Insgesamt 18 Unfälle (49%; 95% KI 32-66) geschahen bei Tageslicht und weitere 19 Unfälle außerhalb der Tageshelligkeit (51%; 95% KI 34-68%). Letztere teilen sich auf in vier Unfälle (11%) bei Dämmerung und 15 Unfälle (41%) bei Dunkelheit.

Abbildung 9 zeigt eine Übersicht der kombinierten Licht- und Fahrbahnverhältnisse.

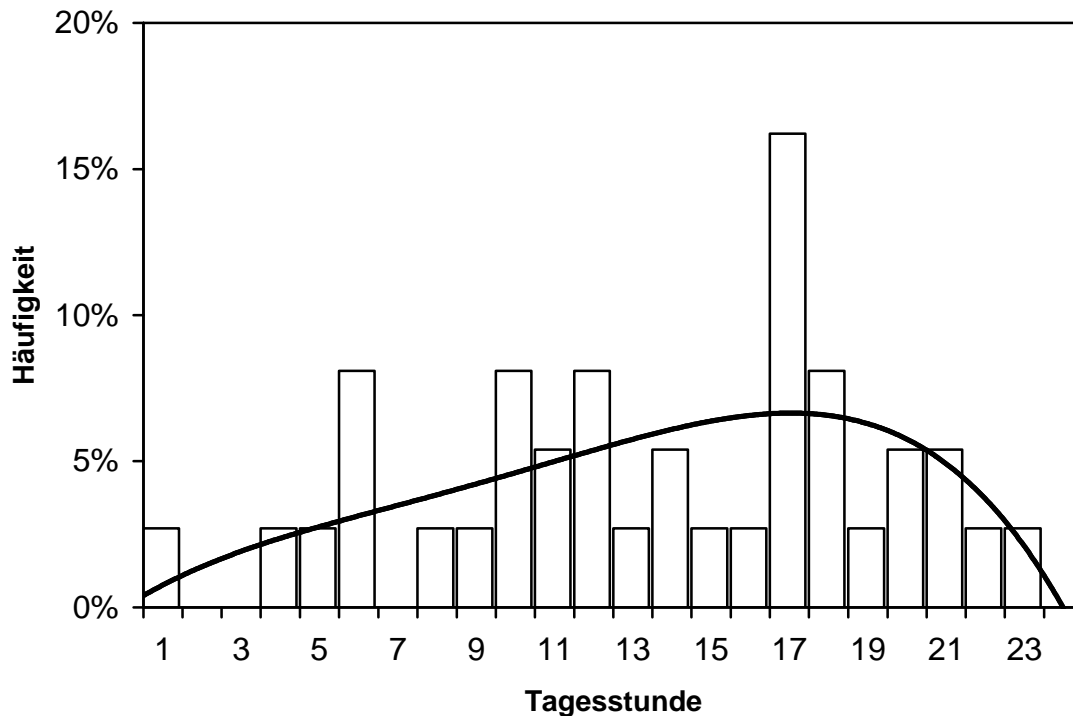
Abb. 9: Häufigkeitsverteilung nach Witterungs- und Lichtkonstellationen



In absteigender Häufigkeit traten die Unfälle in den genannten Zeiträumen im Tagesverlauf auf: Zwischen 13-18 Uhr (n= 14, 38% der Gesamtstichprobe), zwischen 7-12 Uhr (n=10, 27%), zwischen 19-24 Uhr (n=7, 19%) und zwischen 1-6 Uhr (n=6, 16%) (Abbildung 10).

Kategorisiert nach den Tagesstunden ergab sich eine Häufung im Berufsverkehr in den Stunden 6, 10, 12 und 18 mit jeweils 3 Fällen (8,1% der Gesamtstichprobe), eine besondere Häufung ergab sich in Stunde 17 mit 6 Fällen (16%). 65% der Unfälle ereigneten sich in der Zeit zwischen 7 bis 18 Uhr.

Abb. 10: Häufigkeitsverteilung nach Tagesstunde



3.3 Beschreibung der Unfallkinematik

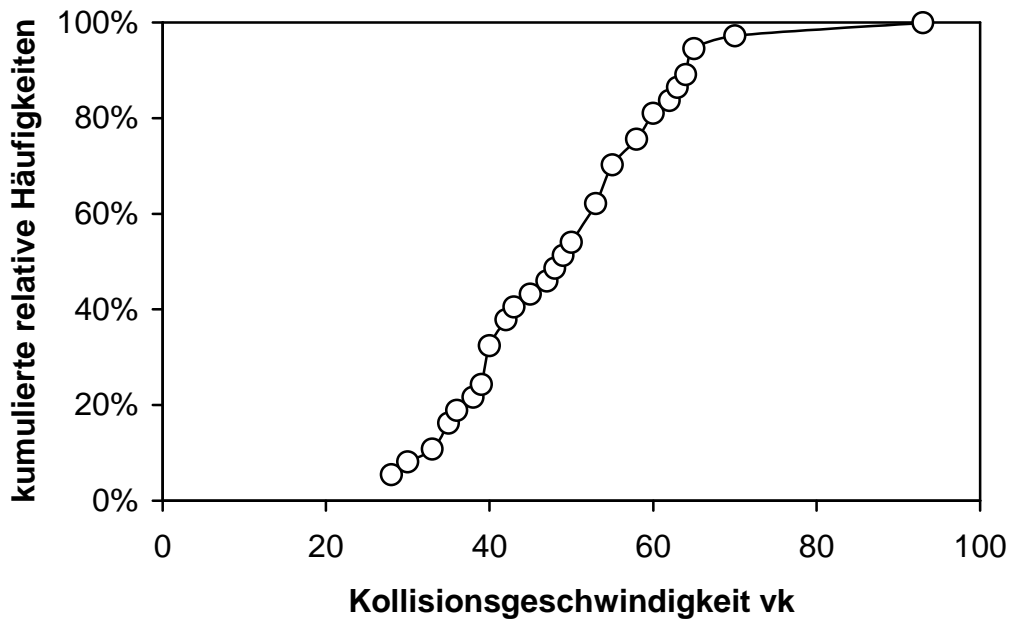
3.3.1 Kollisionsgeschwindigkeit

In 19 Fällen (51% der Gesamtstichprobe, 95% KI 34-68%) handelte es sich um ungebremste Kollisionen. Dies ist ein Schlüsselergebnis der in-depth-Untersuchung am Unfallort. Die Festlegung resultiert aus der Analyse von Geschwindigkeitsmustern und Unfallspuren.

Die Schätzung der Kollisionsgeschwindigkeit kann in Ermangelung objektiver real-time Messung immer nur anhand der vorliegenden Spuren am Unfallort durchgeführt werden. Die hier angegebenen Werte und damit verbundenen Berechnungen entsprechen dem Medianwert der abgeschätzten Kollisionsgeschwindigkeitsbereiche. Die durchschnittliche Kollisionsgeschwindigkeit lag bei 49,5 km/h (95% KI 44,9-54,0) mit einer Spanne von 28 km/h bis 93 km/h.

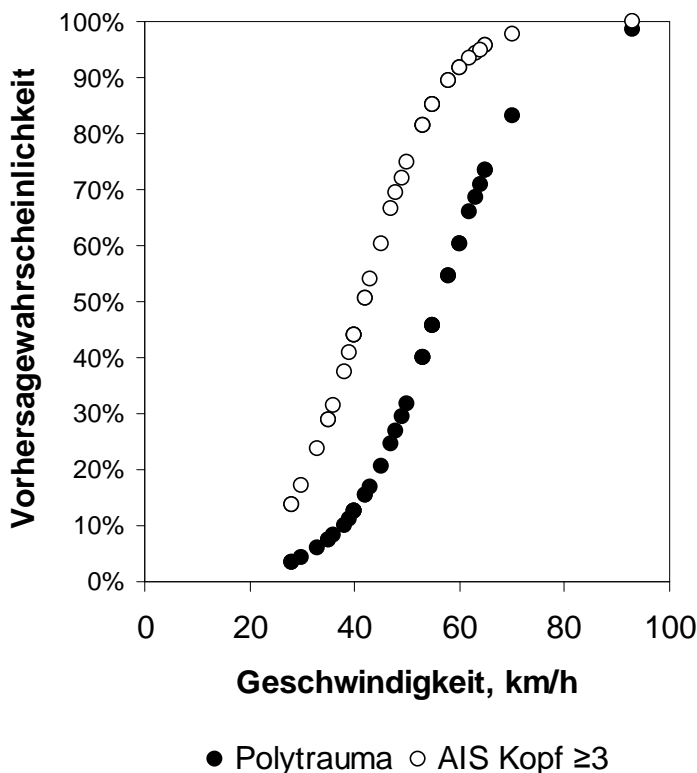
Abbildung 11 zeigt die Summenkurve der Kollisionsgeschwindigkeiten aller registrierten Kollisionen.

Abb. 11: Summenkurve der Kollisionsgeschwindigkeit



Die Kollisionsgeschwindigkeit gilt als wichtigster Einflussfaktor auf die Verletzungsschwere. Der Zusammenhang wurde bezüglich der Vorhersagewahrscheinlichkeit für die Testdiagnosen „Polytrauma“ und „Schädelhirnverletzung mit MAIS ≥ 3 “ per logistischer Regressionsanalyse und Maximum-Likelihood-Anpassung weiter verifiziert (Abbildung 12). Für das Ereignis Polytrauma ergab sich ein AUC/ROC-Wert (area under the curve / receiver operating characteristics) von 0,86 (95% KI 0,74-0,98). Der AUC/ROC-Wert für die Schädelhirnverletzung mit MAIS ≥ 3 betrug 0,83 (95% KI 0,69-0,98).

Abb. 12: Vorhersagewahrscheinlichkeiten nach Kollisionsgeschwindigkeit (Logistische Regression, Maximum-Likelihood Anpassung)



In einer weiteren Analyse wurden die Gesamtverletzungsschwere angegeben im ISS (Injury Severity Score, [8]) und die Kollisionsgeschwindigkeiten gegenübergestellt.

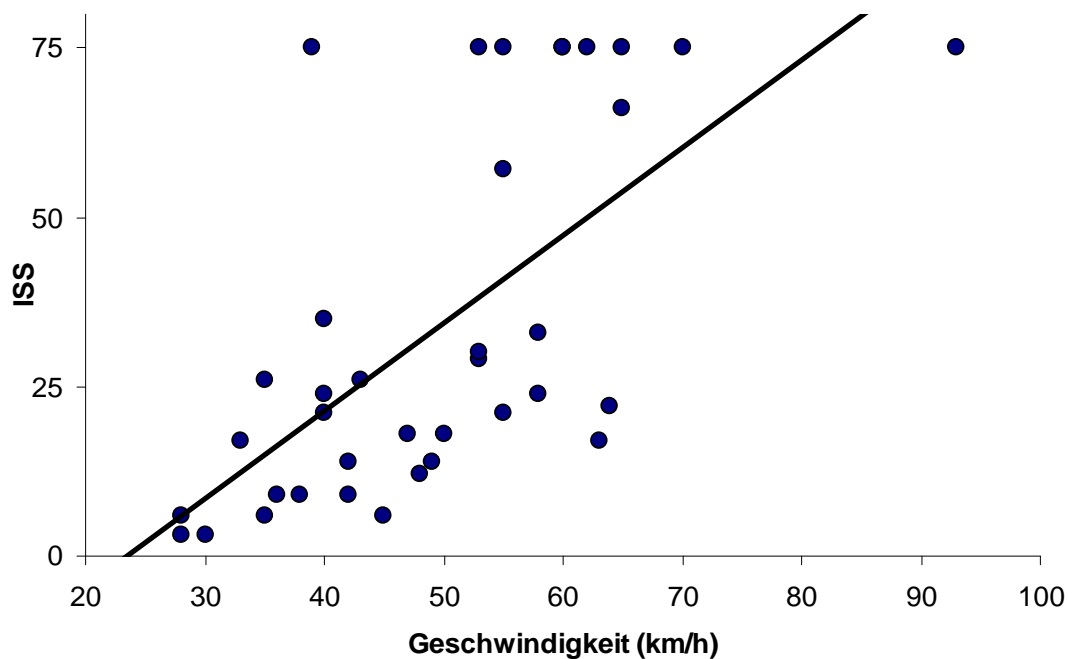
Fortlaufend in absteigender Reihenfolge kategorisiert ergab sich: Für die Fußgänger mit einer Verletzungsschwere von ISS > 50 (n=11) ein Unfallereignis im Geschwindigkeitsbereich zwischen 80-99 km/h (9% dieser ISS-Kategorie), 6 Fälle (55%) im Bereich 60-79 km/h, 3 Fälle (27%) im Bereich 40-59 km/h und ein Fall (9%) im Bereich 20-39 km/h. Bei den 3 Fällen mit ISS im Bereich zwischen 30-49 wurde der Geschwindigkeitsbereich mit 40-59 km/h festgestellt. Der ISS-Bereich 16-29 (n=12) war mit 2 Fällen (17%) im Geschwindigkeitsbereich 60-79 km/h, 8 Fällen (67%) im Bereich 40-59 km/h und 2 Fällen (17%) im Bereich 20-39 km/h vertreten. Der ISS < 16 (n=11) verteilte sich auf 5 Fälle (45%) im Geschwindigkeitsbereich 40-59 km/h und 6 Fälle (55%) zwischen 20-39 km/h.

Insgesamt wurde bei neun Kollisionen (24% aller Kollisionen) eine Kollisionsgeschwindigkeit von < 40 km/h geschätzt, dabei waren zwei Drittel dieser Kategorie mit einem ISS < 16 vergesellschaftet. Zusammengefasst zeigt sich, dass ein ISS > 50 bei nur 3% aller Verletzten nach Kollisionen im Bereich von 20-49 km/h

auftrat, aber umgekehrt bei 27% der Verletzten nach Kollisionen im Bereich von > 50 km/h.

Abbildung 13 zeigt die ansteigende Verletzungsschwere (ISS) mit steigender Kollisionsgeschwindigkeit.

Abb. 13: Einzelfalldarstellung von Kollisionsgeschwindigkeit und Gesamtverletzungsschwere (ISS)



Die durchschnittliche Kollisionsgeschwindigkeit beim Auftreten von Schädelfrakturen belief sich auf 56 km/h. Ab einer Geschwindigkeit von 35 km/h waren diese anzutreffen. Zu Wirbelsäulenbrüchen kam es ab 33 km/h. Dabei handelte es sich um eine Fraktur der Lendenwirbelsäule. Halswirbelsäulenfrakturen fanden sich oberhalb von 50 km/h und Brüche der Brustwirbelsäule oberhalb von 60 km/h. Die mittlere Geschwindigkeit beim Wirbelsäulenbruch lag bei 63 km/h. Brüche der Rippen- und des Schlüsselbeins traten oberhalb einer Geschwindigkeit von 53 km/h auf. Für Becken- und Sakrum befand sich die durchschnittliche Kollisionsgeschwindigkeit bei 60 km/h. Zu Unterschenkel-, isolierten Tibia- und Fibulafrakturen sowie Sprunggelenksfrakturen kam es ab 33 km/h. Sie waren bei höheren Anstoßgeschwindigkeiten fast immer nachweisbar (Tabelle 4).

Die vital limitierende Verletzung der Aortenruptur trat in zwei vorliegenden Fällen bei einer Geschwindigkeit von 65 und 93 km/h auf und war kombiniert mit Frakturen von BWK 1 und 12 sowie BWK 7 und 8. Vergleichbar war ein Einriss des Herzvorhofes und der Jugularvene bei einem Unfall mit einer Kollisionsgeschwindigkeit von 62 km/h ebenfalls in Kombination mit einer Brustwirbelsäulenfraktur in Höhe BWK 6 vorzufinden.

Verletzungen	minimale V_k^* (km/h)	Mittlere V_k^* (km/h)	Maximale V_k^* (km/h)
Schädelfraktur	35	56	93
Schädelhirntrauma Grad II-III	35	53	93
Wirbelsäulenfraktur	33	63	93
Rippenfraktur	53	58	65
Aortenruptur	60	80	93
Becken- und Sakrumfraktur	39	60	93
Tibia-/Fibula und OSG-Frakturen	33	57	93

* V_k = mediane Kollisionsgeschwindigkeit

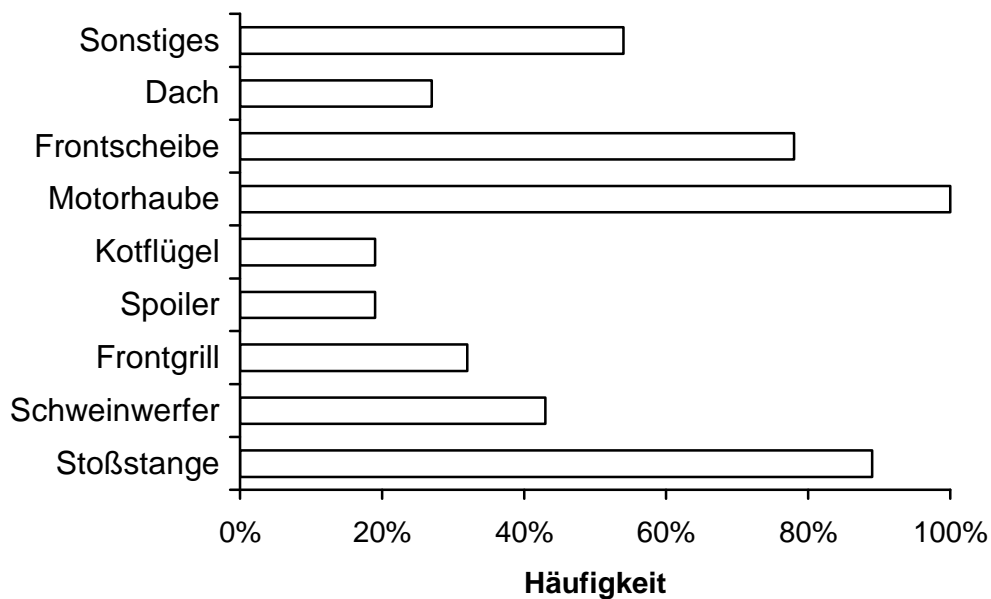
Tabelle 4: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit bei ausgewählten Verletzungen

3.3.2 Kontaktbereiche am Fahrzeug

Bei der Dokumentation der Kontaktbereiche kann die Lage eines Schadens am Fahrzeug und zusätzlich die Auslaufrichtung dieses Schadens – z.B. in Form einer länglichen Karosseriedelle – beschrieben werden. Als Schlüsselergebnis zeigte sich bei nahezu jedem Unfall ein Kontakt mit drei Fahrzeugstrukturen: Motorhaube (100% aller Unfälle), Stoßstange (89%) und Frontscheibe (78%).

Die Häufigkeitsverteilung aller Kontaktbereiche ist in Abbildung 14 zusammengefasst.

Abb. 14: Häufigkeitsverteilung der Kontaktbereiche am Fahrzeug



An der Motorhaube wurden in absteigender Reihenfolge folgende Kontaktbereiche gesehen: vordere rechte Motorhaube (n=16, 43%), vordere linke Motorhaube (n=10, 27%), vordere mittlere Motorhaube mit Auslaufen des Schadens in die linke Motorhaube (n=6, 16%), Streifkollision rechte Motorhaube (n=2, 5%), vordere mittlere Motorhaube (n=2, 5%) und vordere mittlere Motorhaube mit Auslaufen des Schadens in die rechte Motorhaube (n=1, 3%).

Abbildung 15 zeigt exemplarisch einen Opel Corsa, bei dem der Anstoßbereich an der linken Motorhaube lokalisiert ist.

Abb. 15: Kollisionsspuren an einem Opel Corsa



3.3.3 Abwurf des Fußgängers

Der Abwurf eines Fußgängers über oder neben das Fahrzeug erfolgt unter anderem in Abhängigkeit von der Geh- bzw. Stehrichtung zum Fahrzeug (Anstoßrichtung). Hierdurch wird ein Drehimpuls erzeugt, der auch die nachfolgende Abwicklung (Bewegung über das Fahrzeug) beeinflusst.

In der Mehrheit der Kollision erfolgte der Erstkontakt auf der linken Körperseite (n=21, 57%; 95% KI 40-73%). In den verbleibenden 16 Fällen (43%) war die rechte Körperseite betroffen. Ein Anstoß an der vorderen oder hinteren Körperseite kam nicht vor. Dies bedeutet, dass sich alle untersuchten Fußgänger in einer Gehbewegung quer zur Fahrzeugbewegung befanden.

Bezüglich des Abwurfs waren folgende Richtungen in absteigender Reihenfolge zu verzeichnen: Abwurf rechts neben das Fahrzeug (n=13, 35%; 95% KI 20-53%), Abwurf links neben das Fahrzeug (n=11, 30%; 95% KI 16-47%), Abwurf vor das Fahrzeug (n=7, 19%; 95% KI 8-35%) und Abwurf über das Dach hinter das Fahrzeug (n=6, 16%; 95% KI 6-32%). Die durchschnittliche Wurfweite lag bei 16,6 m (95% KI 12,3-20,9).

3.4 Beschreibung des Verletzungsmusters

Beim Fußgängerunfall trifft man auf ein heterogenes Verletzungsbild mit Beteiligung aller Körperareale. Zu finden sind zahlreiche Kombinationsverletzungen aber auch einfache Prellungen und Schürfungen. Eine genauere Darstellung der ermittelten Verletzungscharakteristika wird im folgenden Kapitel vorgenommen.

3.4.1 Ergebnisübersicht

Es wurden 37 Fußgängerunfälle, also entsprechend 37 Unfallfahrzeuge und 37 verletzte Fußgänger untersucht. Bei 26 Verletzten (70%) wurde ein Polytrauma diagnostiziert, insgesamt 9 Verletzte (24%) erlitten tödliche Verletzungen. Es wurde

ein mittlerer MAIS 3,9 (95% KI 3,4-4,5) und ein mittlerer ISS 33,8 (95% KI 24,8-42,8) dokumentiert. Die folgenden Tabellen zeigen die Häufigkeit von MAIS und ISS in ausgewählten Kategorien.

MAIS	n	% von 37
1	2	5
2	7	19
3	5	14
4	9	24
5	5	14
6	9	24

Tabelle 5: Häufigkeitsverteilung nach MAIS

ISS	n	% von 37
1-15	11	30
16-29	12	32
30-49	3	8
50-74	2	5
75	9	24

Tabelle 6: Häufigkeitsverteilung nach ISS-Kategorie

Eine Kategorisierung der Verletzungsschwere für die einzelnen Körperareale wurde anhand MAIS (Maximum Abbreviate Injury Scale, [5, 6]) vorgenommen.

Die häufigsten schweren und tödlichen Verletzungen waren die des Kopfes. In 24 Fällen mit Kopfverletzungen (65% der Gesamtstichprobe, 95% KI 48-80%) war ein MAIS Kopf ≥ 3 zu verzeichnen. Die übrigen 12 Fälle (33% der Verletzungskategorie) wiesen leichtere Verletzungen (MAIS 1-2) in Form von Schädelprellungen, Platzwunden und Schürfwunden auf.

In 14 Fällen (38% der Gesamtstichprobe) waren Verletzungen des Abdomen und in 21 Fällen (57%) des Beckens zu finden. Der MAIS war sowohl bei Abdominal- als auch Beckenverletzungen jeweils in 6 Fällen ≥ 3 (16% der Gesamtstichprobe, 95% KI 6-32%). Die Verletzungen des Abdomen waren verteilt auf: MAIS von 6 in 2 Fällen (14% der Verletzungskategorie), MAIS von 3 in 4 Fällen (29%), MAIS von 2 in 2 Fällen (14%) und MAIS 1 in 6 Fällen (43%). Die des Beckens beliefen sich auf: MAIS

von 5 in 4 Fällen (19% der Verletzungskategorie), MAIS von 3 in 2 Fällen (10%), MAIS von 2 in 3 Fällen (14%) und MAIS von 1 in 12 Fällen (57%).

Schwere Verletzungen des Thorax mit einem MAIS ≥ 3 waren in 14 Fällen (38%; 95% KI 23-55%) anzutreffen. In drei Fällen (8% der Gesamtstichprobe) lagen Brustkorbverletzungen mit einem MAIS von 1 vor. 20 Personen wiesen keinerlei Verletzungen im Thoraxbereich auf.

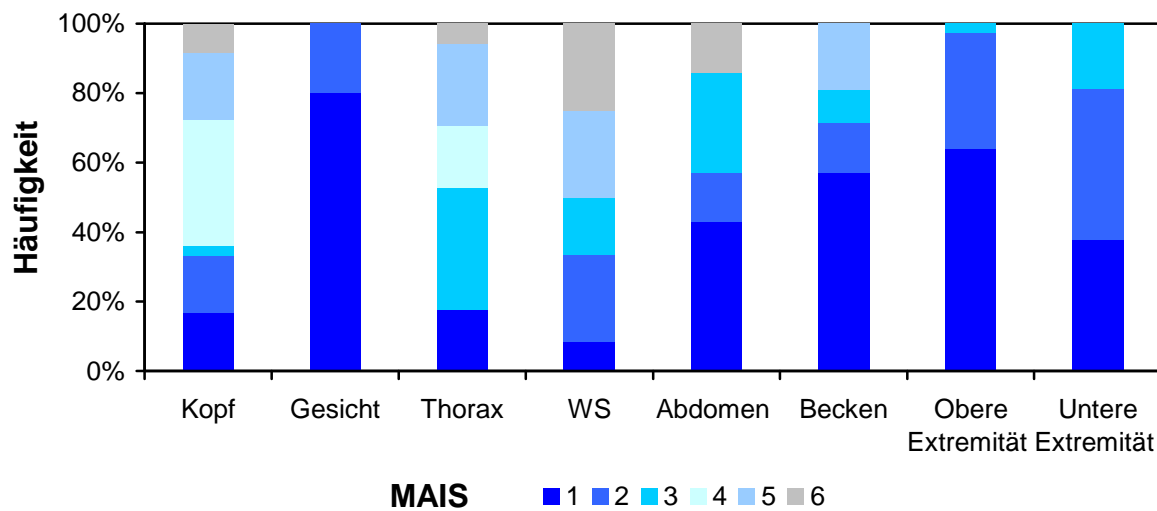
12 Fälle (32% der Gesamtstichprobe) mit einer Wirbelerkrankung konnten festgestellt werden. Davon waren 8 Fälle (22%; 95% KI 10-38%) mit einem MAIS ≥ 3 , 3 Fälle (8%) mit MAIS 2 und 1 Fall (3%) mit MAIS von 1.

Es muss grundsätzlich mit einer Verletzung der unteren Extremität gerechnet werden (100%). Ein MAIS von 3 fand sich in 7 Fällen (19% der Verletzungskategorie), MAIS 2 in 16 Fällen (43%) und ein MAIS von 1 in 14 Fällen (38%). Ein MAIS von 3 der unteren Extremität bedeutete, dass eine offene Fraktur vorlag.

Verletzungen der oberen Extremität waren ebenfalls zahlreich (n=36, 97% der Gesamtstichprobe) und teilten sich wie folgt auf: MAIS von 3 in einem Fall (3% der Verletzungskategorie), in 12 Fällen (33%) MAIS von 2 und in 23 Fällen (64%) fanden sich eher leichte Verletzungen mit MAIS = 1 wie z.B. Schürfwunden und Prellungen.

Die Verteilung der Verletzungsschwere ist in Abbildung 16 grafisch dargestellt.

Abb. 16: Verteilung der maximalen Verletzungsschwere in MAIS der einzelnen Körperregionen



3.4.2 Verletzungen des Primär- und Sekundärpralls

Im Weiteren wird das Verletzungsmuster in Abhängigkeit vom Anstoßzeitpunkt betrachtet. Infolge des Primärpralls wurden Verletzungen der folgenden Körperregion in absteigender Häufigkeit beobachtet: untere Extremität (100%), Kopf (89%), obere Extremität (76%), Becken und Sakrum (54%), Thorax (41%), Abdomen (38%), Wirbelsäule (32%). Der mittlere MAIS der Verletzungen infolge des Primärpralls betrug MAIS 3,9 (95% KI 3,4-4,5).

Insgesamt 34 Fußgänger (92%) erlitten Verletzungen im Rahmen des Sekundärpralls. In drei Fällen (8%) konnte kein Anhalt für Verletzungen durch einen derartigen Anprall gefunden werden. Die mittlere Verletzungsschwere beim Sekundärprall lag bei MAIS 1,14 (95% KI 0,8-1,4). Insgesamt waren also vorrangig minderschwere Verletzungen nachweisbar. Als führende Verletzungsfolge waren multiple Prellungen und Schürfwunden mit einem MAIS 1 zu verzeichnen. 27 Verletzte (73%) wiesen derartige Schürfwunden oder Prellungen auf. Davon zeigten drei Verletzte (11%) isolierte Verletzungen im Bereich der Extremitäten, die anderen 24 Verletzten (89%) erlitten multiple Verletzungen mehrerer Körperregionen. Sieben

Fußgänger erlitten zusätzliche Verletzungen zu den bereits genannten Prellungen und Schürfwunden. Diese sind im Folgenden aufgelistet:

- 1 Verletzter: (3%): SHT I°, Kopfplatzwunde (MAIS 1),
- 2 Verletzte: (5%): SHT I°, multiple Prellungen der Extremitäten (je MAIS 1),
- 2 Verletzte (5%): Rippenserienfraktur mit Hämatothorax (MAIS 4 bzw. 5),
- 1 Verletzter (3%): Sakrumfraktur, multiple Prellungen (MAIS 2 bzw. 1).

3.4.3 Verletzungsmuster und Einzelverletzungen

Einleitend wird im Folgenden eine Einzelfalldarstellung gezeigt (Tabelle 7).

Nr.	ISS	Severity code des Maximum Abbreviated Injury Scale (MAIS)							
		Kopf, Hals	Gesicht	Wirbel- säule	Thorax	Abdom.	Becken	Obere Extrem.	Untere Extrem.
1	3	1	1	0	0	0	0	1	1
2	3	0	1	0	0	1	0	1	1
3	6	2	1	0	1	0	0	1	1
4	6	2	0	0	1	1	1	1	1
5	6	1	0	0	0	1	2	1	1
6	9	2	2	0	0	0	1	1	1
7	9	1	1	1	0	0	0	2	2
8	9	1	1	0	0	0	1	2	2
9	12	2	1	0	0	0	0	2	2
10	14	2	0	0	0	0	0	1	3
11	14	1	1	0	3	0	0	2	1
12	17	1	1	0	0	2	0	2	3
13	17	2	0	3	0	0	0	0	2
14	18	4	1	0	0	0	0	1	1
15	18	4	0	0	0	0	0	1	1
16	21	4	2	0	0	0	0	1	1
17	21	4	1	0	0	0	0	1	2
18	22	3	1	0	3	1	1	1	2
19	24	4	2	0	1	1	0	1	2
20	24	4	2	0	0	0	1	1	2
21	26	4	1	0	0	0	1	3	1
22	26	4	1	0	0	0	1	1	3
23	29	4	0	0	3	0	0	2	2
24	30	5	1	0	0	0	1	2	1
25	33	5	1	2	0	0	0	1	2
26	35	5	1	0	0	0	1	1	3
27	57	4	1	5	4	0	2	2	2
28	66	5	2	5	4	0	0	2	3
29	75	5	2	0	4	6	1	2	1
30	75	5	1	6	3	3	3	1	1
31	75	4	0	5	6	3	3	1	3
32	75	4	1	2	5	6	5	2	2
33	75	4	1	3	5	3	5	1	3
34	75	6	1	0	5	1	5	1	2
35	75	5	1	2	3	2	5	1	2
36	75	6	1	6	5	3	2	2	2
37	75	6	1	6	3	0	1	1	2

Tabelle 7: Gesamtübersicht der Einzelfalldarstellungen ISS und MAIS nach Körperregion

3.4.3.1 Schädelhirnverletzungen

Insgesamt 33 Verletzte (89% aller Verletzten) erlitten ein SHT mit einem mittleren MAIS von 3,4 (95% KI 2,9-3,9). Analog der Klassifikation nach Tönnis und Loew [84, 98]. war dabei das SHT III° (n=15, 46% der Schädelhirnverletzten) häufiger als das SHT II° und SHT I° (jeweils n=9, 27%). Die häufigste Verletzungsart war die intrakranielle Blutung (n=23, 64% der Verletzungskategorie), gefolgt von der Hirnkontusion (n=14, 39%), der Fraktur (n=12, 33%), dem Hirnödem (n=11, 31%) und der Schädelprellung (n=4, 11%). Unter den intrakraniellen Blutungen (26) fanden sich in absteigender Reihenfolge Subarachnoidalblutungen (n=17, 65% der Verletzungskategorie), Subduralhämatome (n=6, 23%) und Epiduralhämatome (n=3, 12%). Die häufigste spezifische Fraktur waren Brüche des Gesichtsschädels (n=6, 50%), gefolgt von der Kalottenfraktur (n=4, 33%), der Schädelbasisfraktur (n=2, 17%) oder der Kombination von Schädelbasis- und Kalottenfraktur (n=3, 25%). In 25% bestanden offene Schädelhirnverletzungen.

3.4.3.2 Verletzungen der oberen Extremität

Insgesamt 36 (97%) Fußgänger erlitten Verletzungen der oberen Extremität mit einem mittleren MAIS von 1,4 (95% KI 1,2-1,5). Die Mehrheit der Verletzten wies Prellungen und Schürfungen (n=23, 64% der Verletzungskategorie) auf. Frakturen waren weniger häufig (n=12, 33%).

Unter den Frakturen fanden sich mehrheitlich Frakturen des Humerus (n=4, 33% der Verletzungskategorie), davon 3 im diaphysären Anteil und 1 distale Fraktur. Zusätzlich wurde bei einem Verletzten eine I° offene Olekranonfraktur und bei einem weiteren Verletzten mehrere Grundphalanxfrakturen dokumentiert.

3.4.3.3 Verletzungen des Thorax und der Schulter

Insgesamt 17 Fußgänger (46% der Gesamtstichprobe) wiesen Verletzungen am Thorax auf. Der mittlere MAIS betrug 1,6 (95% KI 0,9-2,2). Bei einer kleinen Zahl der Verletzten resultierten Prellungen und Schürfwunden (n=3, 18% der Verletzungskategorie). Betrachtet man die nicht minderschweren Verletzungen, so waren Lungenkontusionen (n=9, 53%, davon n=6 bilateral) häufiger als Rippenserienfrakturen (n=8, 47%, davon n=5 unilateral), Hämato- oder Pneumothoraces (n=6, 35%, alle in Kombination mit Rippenserienfrakturen, davon n=4 bilateral) sowie jeweils eine isolierte Rippenfraktur (n=1, 6%) und eine Sternumfraktur (n=1, 6%, in Kombination mit Rippenserienfraktur). Die extrapulmonalen Weichteilverletzungen teilten sich auf in Herzkontusionen mit EKG-Veränderungen und Echokardiogramm sowie Troponinerhöhung (n=6, 35%), Zwerchfellrupturen (n=2, 12%), Aortenrupturen (n=2, 12%) und ein Einriss des Herzvorhofs und der Jugularvene (n=1, 6%). Die letztgenannten destrukturierenden Verletzungen der Aorta und des Herzvorhofs verliefen letal.

An der Schulter waren Frakturen (n=6, 67% der Verletzungskategorie) häufiger als Schulterluxationen (n=3, 33%). Die Frakturen ließen sich weiter spezifizieren als Skapulafrakturen (n=2, 33%) und Clavikulafrakturen (n=4, 67%), wobei letztere bei 2 von 4 Verletzten in Kombination mit Thoraxverletzungen anzutreffen waren. Hierbei wurde in einem Fall eine Kombination mit einer ipsilateralen Rippenserienfraktur, im zweiten Fall eine Kombination mit einer Rippenserien-, Sternum- und Skapulafraktur beobachtet.

3.4.3.4 Verletzungen der Wirbelsäule

Verletzungen der Wirbelsäule fanden sich bei 12 Fußgängern (32% der Gesamtstichprobe) mit einem mittleren MAIS von 1,2 (95% KI 0,6-1,9). Darunter waren 15 Frakturen bei 11 Fußgängern nachzuweisen, welche in absteigender Häufigkeit der Halswirbelsäule (n=6, 40% der Verletzungskategorie), der Brustwirbelsäule (n=5, 33%) und der Lendenwirbelsäule (n=4, 27%) zuzuordnen waren. In einem Fall kam es lediglich zu einer HWS-Distorsion. Drei Verletzte erlitten

multiple Wirbelsäulenfrakturen, 8 Verletzte erlitten Frakturen in lediglich einem Wirbelkörper. Insgesamt neun der Frakturen (60%) waren nach radiologischen Kriterien instabil. Eine Querschnittssymptomatik fand sich bei 6 Frakturen bzw. 6 Verletzten (40 bzw. 50%), wovon 2 als atlantookzipitale Avulsion, 1 als cervicothorakale Avulsion und 1 als thorakale Avulsion zu spezifizieren waren. Die Verletzten mit Avulsionsverletzungen der Wirbelsäule wiesen ein tödliches Verletzungsmuster auf. Zusätzlich war eine Rückenmarksbeteiligung feststellbar. Die verbliebenen 2 Frakturen mit der Folge einer Querschnittssymptomatik konnten als cervicale Rückenmarkskontusion beschrieben werden.

Die folgende Tabelle zeigt die Verteilungshäufigkeit analog der Klassifikation nach Magerl [61]. Dabei dominierten Frakturen mit Rotationskomponente (Typ C, n=6, 40%) vor Kompressionsverletzungen (Typ A, n=5, 33%). Die beiden Frakturen der oberen HWS wurden nicht klassifiziert.

Zur Einteilung der Frakturen der HWS von C3-C7, thorakaler und lumbaler Wirbelkörperfrakturen wurde die von Magerl und Mitarbeitern erstellte Klassifikation in Anlehnung an die AO-Klassifikation herangezogen [61]. Dabei werden die Brüche in drei Kategorien eingeteilt. Zu finden sind Verletzungen vorderer Elemente bei intaktem dorsalem Ligamentkomplex durch Impaktion in Form von Impressions- oder Keilbrüchen, Spalt- und Berstungsbrüche (Typ A), Verletzungen vorderer oder hinterer Elemente durch Distraction und Hyperflexionskräfte (Typ B) sowie die Verletzungen hinterer und vorderer Elemente durch Rotation (Typ C).

Region und Magerl-Typ	n
HWS	
A1.2.1	1
B1.1.2	1
B1.1.3	1
C3.1.	1
BWS	
A3.3.2	1
C3.1.	4
LWS	
A1.1.	1
A2.2.3	1
A3.1.1	1
C2	1

Tabelle 8: Verteilungshäufigkeit der Wirbelsäulenfrakturen nach Magerl

3.4.3.5 Verletzungen des Abdomens

Ein Abdominaltrauma war bei 14 Fußgängern (38% der Gesamtstichprobe) nachweisbar. Der mittlere MAIS abdomineller Verletzungen lag bei 0,9 (95% KI 0,4-1,4). Als häufigste Verletzung verblieb das stumpfe Bauchtrauma ohne bildgebendes Korrelat (n=10, 71% der Verletzungskategorie). Unter den morphologisch nachweisbaren Organläsionen zeigten sich 5 Milzrupturen (36%), 4 Einrisse des Leberparenchyms (29%) und 1 Leberkapselzerreißung (7%), 2 zentrale Nierenrupturen (14%) und 3 subkapsuläre Nierenhämatome (21%). Zusätzlich erlitt ein Verletzter eine großflächige Bauchwandhernie.

3.4.3.6 Verletzungen des Beckens

Eine Beckenverletzung wurde bei 21 Fußgängern (57% der Gesamtstichprobe) festgestellt. Der mittlere MAIS der Beckenverletzungen lag bei MAIS 1,2 (95% KI 0,7-1,7). Als häufigste Verletzung zeigten sich die für den Anprall an der Motorhaube charakteristischen Prellungen und Schürfwunden am vorderen Darmbeinstachel (n=12, 57% der Verletzungskategorie). Von den 9 Verletzten mit Beckenfrakturen (43%) wurde die Mehrheit aufgrund des Gesamtverletzungsmusters als Polytrauma klassifiziert (n=8, 38%). Die 9 Beckenfrakturen teilten sich auf in 6 vordere Beckenringfrakturen (67%, davon 4 einseitig), wovon wiederum 5 mit einer Beckenrandfraktur assoziiert waren (3 Sakrumfrakturen, 2 Beckenschauelfrakturen). Weitere Begleitverletzungen fanden sich in Form von einseitigen (n=1) und beidseitigen (n=1) Sprengungen des Iliosakralgelenks, einer zusätzlichen hinteren Beckenringfraktur sowie einer Symphysenruptur. Zusätzlich wurden 2 isolierte Sprengungen des Iliosakralgelenkes diagnostiziert. Ein retroperitoneales Hämatom zeigte sich bei 4 Verletzten (19%).

3.4.3.7 Verletzungen der unteren Extremität

Eine Verletzung der unteren Extremität wurde bei jedem der 37 Fußgänger festgestellt. Der mittlere MAIS der unteren Extremität lag bei 1,8 (95%KI 1,6-2,0). Insgesamt erlitten 20 Verletzte (54%) eine Fraktur, wodurch diese die häufigste

Verletzungsart darstellen. Die folgende Tabelle nennt alle Frakturen der unteren Extremität und zusätzlich die AO-Klassifikation [85].

Region und AO-Klassifikation	Häufigkeit n (% von 37)
Femur	2 (5%)
31-A1	1
32-A1	1
Tibiakopf	3 (8%)
41-A1	2
41-A3	1
Unterschenkel	12 (32%)
41-A1	1
41-B1	1
41-C3	2
42-A2	1
41-B1	1
42-B2	2
42-B3	1
42-C2	2
43-C3	1
Fibula	9 (24%)
Sprunggelenk	3 (8%)
44-C2	1
44-C3	2
Metatarsus	1 (3%)

Tabelle 9: Einzeldarstellung der Frakturen der unteren Extremität

Die nach Anpralltrauma charakteristischen Messerer-Brüche wurden bei 8 Verletzten (40%) gesehen. Eine Verletzung peripherer Gefäße wurde – trotz entsprechender Maximaldiagnostik bei klinischem Verdacht – in keinem Fall diagnostiziert.

Bei 8 Fußgängern (22% der Verletzungskategorie) fanden sich Weichteilverletzungen im Sinne eines Décollement am Unterschenkel. In ebenfalls 8 Fällen (22%) zeigten sich komplexe Kniebinnenschäden mit kombinierten Rupturen des vorderen und hinteren Kreuzbandes plus Meniskusverletzungen. Zusätzlich erlitten jeweils 2 Fußgänger (5%) eine isolierte Ruptur des vorderen Kreuzbandes sowie isolierte Rupturen des Ligamentum collaterale laterale des Kniegelenks.

3.4.4 Resultierende Verletzungen in Abhängigkeit von der Anprallseite

Die Übereinstimmung von Anprallseite und Verletzungsseite wurde ausschließlich bei einseitiger Verletzung paariger Organe und bei einseitig gelegenen Organen untersucht. Im Bereich der Schulter und des Oberarms resultierten alle 4 Humerusfrakturen, 3 von 4 Klavikulafrakturen und 2 von 3 Schulterluxationen aus einem gleichseitigen Anprall. Im Bereich des Thorax stimmten bei den 5 unilateralen Rippenserienfrakturen die Anprall- und Verletzungsseite in allen 5 Fällen überein. Gleiches gilt für die isolierte Rippenfraktur und die 2 Zwerchfellrupturen.

Im Bereich des Abdomen traten 4 von 5 Milzrupturen nach einem Anprall der linken Körperseite auf. Umgekehrt fand sich bei Leberverletzungen keine Dominanz einer Anprallseite. Im Bereich des Beckens war eine klare Zuordnung von Anprall und Verletzung lediglich bei den 4 unilateralen Beckenringverletzungen möglich, wobei in jedem Fall die Seite des Anpralls und die der Verletzung übereinstimmten.

Im Bereich der unteren Extremität zeichneten sich 7 isolierte Fibulakopffrakturen durch einen gleichseitigen Anprall aus. Die 2 Femur- und 3 Sprunggelenksfrakturen entstanden vornehmlich auf der Anprallseite. Demgegenüber fanden sich bei nur 6 von 12 Unterschenkelbrüchen jeweils Anprall- und Verletzungsseite ipsilateral und bei 2 von 3 Tibiafrakturen befand sich der Anprall kontralateral. Die Décollementverletzungen wiesen in 6 von 8 Fällen eine Übereinstimmung von Anprall- und Verletzungsseite auf.

3.4.5 Langzeitfolgen

Insgesamt 28 Verletzte (76%) überlebten den Unfall. Die Analyse der Langzeitfolgen zeigte, dass bei einer substantiellen Anzahl der Verletzten mit dauerhaften Behinderungen zu rechnen war. In drei Fällen (8%; 95%KI 2-22%) trat infolge von Querschnittsverletzungen oder massiven Kopfverletzungen eine schwere, dauerhafte Körperbehinderung ein. Dauerhafte leichte Behinderungen waren bei fünf Verletzten (14%; 95% KI 5-29%) zu erwarten. 12 Verletzte (32%; 95% KI 18-50%) wiesen nach dem Unfall funktionelle und schmerzhaft Einschränkungen auf. Bei diesen war aber

im Verlauf noch mit einer Besserung zu rechnen. Die restlichen acht Verletzten (22%; 95% KI 10-38%) konnten ohne zu erwartende Dauerschäden aus der Behandlung entlassen werden.

3.4.6 Tödliche Verletzungen

Insgesamt neun Fußgänger (24%, 95% KI 12-41%) erlitten tödliche Verletzungen. Als Todesursache wurde in jeweils 4 Fällen (44%) ein schweres Schädelhirntrauma (SHT) und ein hämorrhagischer Schock festgestellt. In einem Fall (11%) wurde als Todesursache ein hämorrhagischer Schock kombiniert mit einem schweren SHT beobachtet. Die nachfolgende Auflistung beschreibt die Verletzungen aller tödlich verunfallten Fußgänger, die unmittelbare Todesursache ist jeweils vorangestellt:

1. Todesursache SHT III°, weitere Verletzungen: Schädelbasisfraktur, Hirnstammlutung, Milzriss, Lungenkontusion und Hämatothorax
2. Todesursache SHT III°, weitere Verletzungen: Schädelbasisfraktur, atlantooccipitale und cervicale Avulsionsverletzung, Leber- und Milzriss, Zwerchfellzerreiung, Lungenkontusionen
3. Todesursache SHT III°, weitere Verletzungen: Schädelbasisfraktur, Aortenwandriss, Leber- und Milzriss, Lungenkontusion
4. Todesursache SHT III°, weitere Verletzungen: Schädelbasisfraktur, Rippenserienfraktur
5. Todesursache hämorrhagischer Schock durch thorakale Aortenruptur, Milz- und Leberzerreiung, weitere Verletzungen: BWK 7/8 Trümmerfraktur mit Rückenmarksabritt, Rippenserienfraktur mit Hämatothorax, Zwerchfellruptur
6. Todesursache hämorrhagischer Schock durch Milz- und Leberzerreiung, retroperitoneales Hämatom durch vordere und hintere Beckenringfraktur, weitere Verletzungen: SHT° III, Rippenserienfraktur mit Hämatothorax, Beckenschaufelfraktur
7. Todesursache hämorrhagischer Schock durch Leberzerreiung, Nierenarterien- und venenriss, vordere Beckenringfraktur, weitere Verletzungen: SHT °III,

Rippenserienfraktur mit Hämatothorax, Sakrumfraktur und ISG-Sprengung bds.

8. Todesursache hämorrhagischer Schock durch instabile Beckenfraktur und großem retroperitonealem Hämatom, weitere Verletzungen: SHT°III, Rippenserienfrakturen bds.
9. Todesursache SHT° III mit Hirnstammstauchung und transtentorieller Herniation kombiniert mit hämorrhagischem Schock infolge vorderer Beckenfraktur mit Symphysensprengung, Sakrumfraktur mit aktiver Blutungsquelle und ISG-Sprengung, weitere Verletzungen: Lungenkontusion, LWK-I-Fraktur

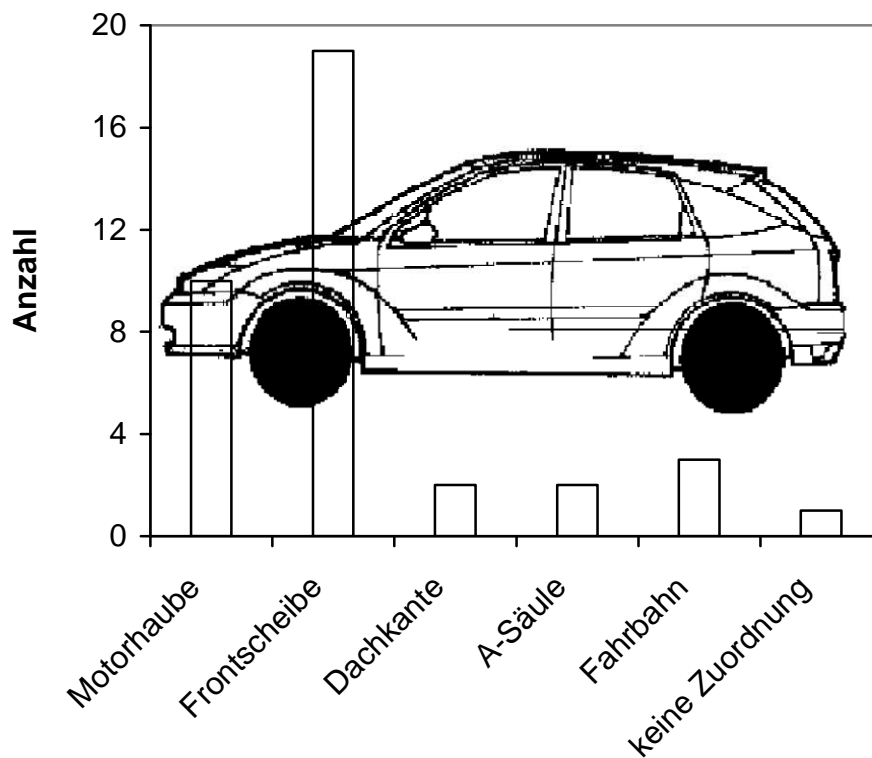
Fünf der Unfalltoten (55%) verstarben nach Ankunft im Krankenhaus, vier Unfalltote (44%) verstarben unmittelbar am Unfallort.

3.5 Analyse von Kopfaufprall und Schädelhirnverletzung

Bei den 37 untersuchten Fällen fand sich nur ein Unfall, bei dem der Fußgänger keine Verletzungen im Bereich des Kopfes davongetragen hatte. Damit lag in 97% der Fälle eine Kopfverletzung vor. Da diese den größten Teil der schweren und vor allem tödlichen Verletzungen ausmachten, wurden die Abläufe des Kopfaufpralles und der resultierenden Schädelhirnverletzung gesondert untersucht. Bei insgesamt 65% der Verletzten wurde eine Schädelhirnverletzung mit einem MAIS ≥ 3 registriert (95% KI 48-80%). Die detaillierte Analyse sollte darstellen, welche Fahrzeugbereiche eine markante Gefahrenzone für den Kopfanprall darstellen.

Es zeigte sich, dass der Aufprall des Kopfes mehrheitlich (n=26, 70%; 95% KI 53-84%) nicht auf der Motorhaube stattfand. So lag in 19 Fällen (51%; 95% KI 34-68%) ein Anprall im Bereich der Frontscheibe vor (Abbildung 17) und in jeweils 2 Fällen (je 5%; 95% KI 1-18%) an der Dachkante und der A-Säule. Ein Aufschlag auf der Motorhaube war bei 10 Unfällen (27%, 95% KI 14-44%) nachzuweisen. In einem einzigen Fall war der Kopfaufprall nicht zuzuordnen. Die verbleibenden 3 Schädelhirnverletzten (8%; 95% KI 2-22%) erlitten ihre Verletzung durch einen Aufprall auf die Fahrbahn.

Abb. 17: Häufigkeitsverteilung des Kopfanpralls nach Fahrzeugbereich



Grundsätzlich kann es im Kollisionsablauf zu einem Mehrfachanprall des Kopfes am Fahrzeug bzw. zusätzlich auf der Fahrbahn kommen. Es gab Anhaltspunkte, dass es in 4 Fällen weitere Kopfberührungen an der Frontscheibe, in 2 Fällen an der Dachkante und in einem weiteren Fall einen Fahrbahnaufprall gegeben hatte. Aufgrund der Unsicherheit in der Rekonstruktion des Mehrfachanpralls wurden diese nicht in die Wertung einbezogen. Fand ein Kopfanprall im Übergangsbereich zur Frontscheibe statt, wurde das Zentrum des Kopfanpralls bestimmt und dementsprechend eine Zuordnung zur Lokalisation am Fahrzeug getätigt.

Beim Anprall auf der Motorhaube resultierte eine Verletzungsschwere von MAIS < 3 in 4 Fällen (11% des Gesamtkopfanpralls) und MAIS ≥ 3 in 6 Fällen (17%), wie nachfolgend (Tabelle 10) dargestellt. Der Aufprall auf die Frontscheibe verursachte in 15 Fällen (42%) eine Schädelhirnverletzung mit einem MAIS ≥ 3, in 4 Fällen (11%) mit einem MAIS < 3. Ein Anprall an die Dachkante zeigte sich in 2 Fällen (6% des Gesamtkopfanpralls). Beide Fußgänger erlitten tödliche Schädelhirnverletzungen (AIS=6). Jeweils 2 weitere (je 6%) erlitten Verletzungen im Bereich des Kopfes durch einen Anprall an die A-Säule (MAIS 2 und MAIS 5). Ein Kopfanprall auf die Fahrbahn verursachte in allen 3 Fällen (8% der Verletzungsschwerekategorie) einen AIS < 3.

Kopfanprall	MAIS < 3	MAIS ≥ 3
	n (% von 12)	n (% von 24)
Motorhaube	4 (33%)	6 (25%)
Frontscheibe	4 (33%)	15 (63%)
Dachkante	0	2 (8%)
A-Säule	1 (8%)	1 (4%)
Fahrbahn	3 (25%)	0

Tabelle 10: Häufigkeit der Verletzungsschwere nach Kopfanprallbereich

Aufgrund der beobachteten Häufung des Kopfanpralles auf der Frontscheibe (n=19, 51%) wurden dieser Anprallbereich und die Verletzungsfolgen gesondert betrachtet. Dazu wurde die Frontscheibe in ein linkes, mittleres und rechtes Drittel aufgeteilt. Zu einem Anprall kam es in 5 Fällen im linken Drittel (26%), in der Mitte in 3 Fällen (16%) und in 11 Fällen (58%) rechts. Bei allen 3 Fällen mit Kopfanprall im mittleren Bereich bestand ein AIS ≥ 3.

Bei einem Kopfanprall in unmittelbarer Nähe zur Frontscheibeneinfassung erlitten 9 Fußgänger (25% der Schädelhirnverletzten) eine Kopfverletzung von AIS ≥ 3. Dieser Anprallbereich machte damit 47% aller Kopfkontakte im Frontscheibenbereich aus. Bei einem Abstand zur Frontscheibeneinfassung von < 10 cm konnten 2 weitere Fälle mit einem MAIS ≥ 3 verzeichnet werden. Es konnte kein relevanter Unterschied zwischen Kopfanprall mit einem Abstand von < 10 cm zur Frontscheibeneinfassung > 10 cm zur Frontscheibeneinfassung und den Verletzungsschwerekategorien festgestellt werden.

4 Diskussion

Diese Arbeit stellt die auf der Basis vollständiger Informationen ermittelten Zusammenhänge zwischen technischen und medizinischen Unfallvariablen dar. Für die Analyse standen 37 von 160 Datensätzen der IMPAIR-Studie zur Verfügung.

Über zwei Drittel der Kollisionen geschah abseits eines markierten Fußgängerüberwegs oder eines vergleichbaren Schutzbereichs. Fast die Hälfte aller Kollisionen erfolgte im Bereich von Haltestellen des öffentlichen Personennahverkehrs. Bei annähernd zwei Drittel der Kollisionen wurden trockene Witterungsverhältnisse beobachtet. Jeweils die Hälfte der Unfälle geschah innerhalb und außerhalb der tageshellten Zeit. In zirka zwei Drittel aller betrachteten Kollisionen lag ein Fehlverhalten der Fußgänger vor, davon mehrheitlich „Unachtsamkeit“. Das dominierende Fehlverhalten der Pkw-Fahrer war „überhöhte Geschwindigkeit“.

Die Unfallrekonstruktion ergab eine mittlere Kollisionsgeschwindigkeit von 49,5 km/h. In 51% fand sich eine ungebremste Kollision. Nahezu jede Kollision führte zu einem Körperanstoß an der Stoßstange, an der Motorhaube und an der Frontscheibe, wobei der Erstkontakt am Fußgänger in allen Fällen seitlich erfolgte. Ein anschließender Abwurf des Fußgängers neben das Fahrzeug war in zwei Drittel der Fälle zu beobachten. In den verbleibenden Fällen erfolgten jeweils hälftig ein Abwurf vor das Fahrzeug und ein Abwurf über das Dach. Die mittlere Wurfweite betrug 16,6 m.

Mehr als zwei Drittel der Verletzten waren polytraumatisiert. Dabei konnte über alle Fußgänger gemessen ein mittlerer ISS von 33,8 festgestellt werden. Der mittlere MAIS des Primäranpralles betrug 3,9. Ein Viertel der Unfälle führte zu tödlichen Verletzungen. Neun von 10 Fußgängern erlitten Verletzungen im Rahmen des Sekundäranpralles. Der mittlere MAIS des Sekundäranpralles betrug 1,1. Dabei resultierten hauptsächlich Prellungen und Schürfungen. Im Gesamtverletzungsbild dominierten Kombinationsverletzungen mit Schädelhirnbeteiligung. Schwere Kopfverletzungen mit $\text{MAIS} \geq 3$ waren bei fast zwei Dritteln der Stichprobe feststellbar. Von den 46% Thoraxverletzungen waren mehr als drei Viertel durch eine Verletzungsschwere $\text{MAIS} \geq 3$ gekennzeichnet. Bei den 32% Wirbelsäulenverletzungen waren immerhin noch zwei Drittel mit einem $\text{MAIS} \geq 3$

vergesellschaftet. Bei 38% der verunfallten Fußgänger bestanden Verletzungen des Abdomen. Mehr als die Hälfte der Fußgänger erlitten Beckenverletzungen. Eine Verletzung der unteren Extremität war regelhaft feststellbar und nahezu jeder Fußgänger wies auch eine Verletzung der oberen Extremität auf. Dabei waren in einem Fünftel der Verletzungen der unteren Extremität offene Bruchformen vertreten. Fast bei jedem Verletzten (97%) waren Kopfverletzungen nachweisbar und der mittlere MAIS für die Kopfverletzungen war mit MAIS 3,4 außerordentlich hoch. Annähernd die Hälfte der Kopfverletzten erlitt ein SHT Grad III und fast zwei Drittel eine intrakranielle Blutung. Dabei fand der Kopfanprall zur Hälfte auf der Frontscheibe und nur zu einem Viertel auf der Motorhaube statt. Über die Hälfte der Fälle mit einem Kopfaufprall auf der Motorhaube waren mit einem $\text{MAIS} \geq 3$ und sogar mehr als zwei Drittel der Fälle mit Frontscheibenaufprall waren mit einem $\text{MAIS} \geq 3$ verbunden. Aus den 8% mit Kopfaufprall auf der Fahrbahn resultierten lediglich leichtere Verletzungen mit $\text{MAIS} < 3$.

Schwere Verletzungen resultierten aus hohen Kollisionsgeschwindigkeiten. In der Gruppe der Verletzten mit einem $\text{ISS} > 50$ waren die Anstoßgeschwindigkeiten in nahezu zwei Dritteln oberhalb von 60 km/h. Ein Zusammenhang besteht in der Relation Körpergröße und Masse ausgedrückt im BMI (Body Mass Index) zur Verletzungsschwere. Mehr als die Hälfte der Verletzten mit einem $\text{BMI} \geq 30$ wies auch eine Verletzungsschwere von $\text{ISS} > 50$ auf.

Ab einem Alter von 50 Jahren war bei mehr als der Hälfte der Verletzten ein $\text{ISS} > 50$ festzustellen. In der Gruppe der Kinder und Jugendlichen bis 18 Jahre fanden sich annähernd ein Fünftel letale Unfallfolgen aber zwei Fünftel mit einem $\text{ISS} < 16$.

Zu den Hauptergebnissen dieser Studie zählt der nachweisbare Einfluss der Geschwindigkeit auf die Verletzungssituation mit entsprechender Verletzungsverteilung und Schwere der Unfallauswirkungen. Diese Kernaussage wird in der Vergleichsliteratur nahezu unbestritten bestätigt [3, 45, 78, 101, 106]. Ab einer Kollisionsgeschwindigkeit von 50 km/h wurde mit dem Auftreten des Verletzungsbildes Polytrauma oder Kopfverletzungen mit AIS Kopf von ≥ 3 gerechnet. Die aus dem logistischen Regressionsmodell abgeleiteten Flächen unter der Kurve (AUC) legen nahe, dass allein die Kollisionsgeschwindigkeit 86% und 83% der Varianz für die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Ereignisse erklärt.

In der Kollision verhalten sich Fußgänger und Fahrzeug ähnlich wie zwei vollplastische Körper unterschiedlicher Masse [94]. Eine physikalische Grundlage ist die kinetische Energie [10]. Sie ist das halbe Produkt aus Masse mal Geschwindigkeit zum Quadrat. Entscheidende Größen für die Verletzungsschwere sind somit Masse und Anprallgeschwindigkeit. Die geringste Masse besitzt der Fußgänger. Aufgrund der unterschiedlichen Massen der Kollisionskontrahenten und der verschiedenen Eigensteifigkeiten ergibt sich eine Verteilung der Deformationsarbeit zu Ungunsten des schwächsten Teilnehmers [10, 17]. Zwischen der Bewegungsmechanik und dem Verletzungsbild des Fußgängers bestehen eindeutige Beziehungen, d.h. aus dem Kollisionsablauf lässt sich auf die Verletzungen schließen [12, 104].

In der Veröffentlichung von Harruff et al. ist eine Häufung der tödlichen Verletzungen nach bestimmten Straßentypen mit vermuteten hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten oder in Bereichen mit hohen erlaubten Höchstgeschwindigkeiten beschrieben. Zugrunde lag hierbei eine retrospektive Studie bei tödlichen Fußgängerunfällen in King County/Seattle von 1990 bis 1995 [33]. Eine weitere Veröffentlichung nach Analyse tödlicher Unfälle aus dem Jahr 2000 gab eine weite Spanne der Kollisionsgeschwindigkeit zwischen 18,5 bis 142 km/h mit einer Häufung zwischen 60 bis 70km/h an [45]. Basierend auf den in-depth-Daten aus Hannover wurden in einer Publikation 50% der Unfälle im Geschwindigkeitsbereich zwischen 30 bis 50km/h und über 32% oberhalb einer Geschwindigkeit von 50km/h aufgezeigt, wobei die Gesamtverletzungsschwere für die einzelnen Geschwindigkeitsbereiche als stark schwankend dargelegt wurde [31]. Genauere Angaben hinsichtlich der Verletzungsschwere finden sich in der Untersuchung von Richter et al. [82]. Grundlage waren die prospektiven Daten der Verkehrsunfallforschung der Medizinischen Hochschule Hannover, wobei die Fußgängerstichprobe aus verunfallten Kindern bestand. Oberhalb der Kollisionsgeschwindigkeit von 50km/h traten in 80% Verletzungen mit MAIS ≥ 2 auf [82]. Die Geschwindigkeit für das Verletzungsausmaß Polytrauma lag in einer Vergleichsstudie zu 80% über 35 km/h [76]. Otte führt in seiner Veröffentlichung aus, dass bis zum Geschwindigkeitsbereich von 40 km/h lediglich 60% der Frakturen und 40% schwere Schädelhirntraumen auftraten [72]. Andere Autoren verglichen den Grad der Traumatisierung bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 50 km/h mit einem Sprung aus 10 Metern Höhe [101]. Häufig fehlte in diesen Publikationen die konkrete Verletzungsschwere im Vergleich

zur Geschwindigkeit, wie in der eigenen Auswertung dargestellt. Die Autoren benutzten zum Teil andere Klassifikationen oder stellten diese nicht ausreichend dar. Die Vergleichbarkeit der Datenlage verschiedener Studien erscheint auch deshalb so schwierig, da die Variation der Parameter und deren Effekt im Unfallausgang von der Kollisionsgeschwindigkeit abhängt [45, 50].

Das Risiko bei einem Fußgängerunfall zu versterben liegt gemäß einer Veröffentlichung der WHO bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von mindestens 50km/h über 80% [106]. Tödliche Verletzungen traten im Literaturvergleich ab einer Geschwindigkeit von 12 km/h [44], 25 km/h [55] oder 38 km/h [31] auf. Kamiyama und Schmidt wählten 1970 aus einer Gruppe von 150 tödlich verunfallten Fußgängern 50 obduzierte Fälle aus. Voraussetzung war, dass definierte Fahrzeug- und Unfalldaten vorliegen mussten. Die Kollisionsgeschwindigkeiten wurden aus den Bremsspuren berechnet, die in den Akten des Amtsgerichtes und der Staatsanwaltschaft zu finden waren. Die Art der Datengewinnung war mit zahlreichen Fehlerquellen versehen. Es wurden keine eigenen objektiven Daten am Unfallort gewonnen [44]. Kühnel setzte sich in der ersten deutschen Dissertation mit der Thematik Fahrzeug-Fußgängerunfall auseinander. Grundlage seiner Arbeit waren Versuchsreihen mit Dummys und entstammten somit der Unfallsimulation. Die Daten zur Kollisionsgeschwindigkeit stammten aus 200 Fällen der Unfallforschung Hannover/Berlin [55]. Gotzen bezog sich in der verwendeten Publikation ebenfalls auf Daten aus 234 in-depth-Fälle der Medizinischen Hochschule Hannover [31]. Beide Studien wiesen somit vergleichbare Stichproben auf. Um Angaben über die Kollisionsgeschwindigkeit bei tödlichen Unfällen zu erhalten, muss häufig auf Obduktionsstudien zurückgegriffen werden [45]. Walz et al. geben in ihrem Schlussbericht an, dass bei 30 km/h 5%, bei 45 km/h 50% und bei 65 km/h nahezu alle beteiligten Fußgänger tödliche Verletzungen erleiden [102]. Diese Daten basieren auf einer Literaturübersicht. Weitere neuere Daten sind nur unzureichend dargestellt.

In der Literatur wurden ab einer Kollisionsgeschwindigkeit von 27,5 km/h hohe Wahrscheinlichkeiten für Wirbelsäulenfrakturen angegeben [45]. In der eigenen Studienpopulation war dies ab 33 km/h zu verzeichnen. Die errechnete mittlere Geschwindigkeit für das Auftreten einer Wirbelsäulenfraktur betrug 65 km/h. Dies steht im Einklang mit früheren Untersuchungen, bei denen oberhalb von 68 km/h eine starke Häufigkeitszunahme von Wirbelsäulenfrakturen gesehen wurde [45, 75].

In den Untersuchungen von Karger kam es ab einer Anprallgeschwindigkeit von 85 km/h zu einer Aortenruptur. Unterhalb von 50-60 km/h war diese nicht zu finden [45]. Das entspricht dem Geschwindigkeitsbereich von zwei eigenen Fällen in der Stichprobe. Hier traten Aortenrupturen bei Geschwindigkeiten von 93 und 65 km/h auf. Erwähnenswert ist ein Fall mit der Verletzungskombination Herzvorhofriss und Jugularvenenruptur bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 62 km/h.

Die Grenze zwischen schweren und leichteren Verletzungen richtet sich nach der Kollisionsgeschwindigkeit und ob noch ein Bremsvorgang möglich war [42]. In der Studienpopulation erwiesen sich 51% der Unfallereignisse als ungebremst.

Die mittlere Verletzungsschwere beim Sekundärprall lag bei einem MAIS von 1,1. Auf den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Verletzungsschwere wurde in Anbetracht der leichten Verletzungsfolgen des Sekundärpralls in der Analyse nicht detailliert eingegangen. Aus der Literaturbetrachtung gibt es jedoch zu erwähnen, dass mit zunehmender Kollisionsgeschwindigkeit mit einer Abnahme der Verletzungen durch den Sekundärprall gerechnet werden könne. Entgegengesetzt wiesen Unfälle mit niedrigen Kollisionsgeschwindigkeiten einen höheren Anteil an Verletzungen des Sekundärpralles auf [29, 45, 53, 76]. Hierzu müssten weitere Untersuchungen folgen.

Der Unfallablauf wird in der wissenschaftlichen Literatur als Anprallfolge beschrieben. Dazu gehören der Anprall der unteren Extremität an die Fahrzeugfront in Höhe der Stoßstange, der Becken- bzw. Oberschenkelanprall an die Motorhaubenkante oder das Aufladen auf die Motorhaube und dem nachfolgenden Anprall des Oberkörpers, der Schulter und des Kopfes auf Motorhaube, Frontscheibe oder Dach des Fahrzeuges [2, 3, 20]. In Übereinstimmung mit diesem Ablaufschema zeigte nahezu jeder Fußgänger der eigenen Untersuchung einen initialen Stoßstangenkontakt (89%). Eine Berührung der Motorhaube war in jedem Fall nachweisbar. Ein Anprall im Frontscheibenbereich wurde in 78% sowie im Bereich des Daches in 27% festgestellt. Nach Anprall am Pkw beginnt die Phase der Aufschaukelung. Die Weite des Aufwurfs bestimmt die Kopfaufschlagszone d.h. sie ist abhängig von Fußgängergröße, Fahrzeugabmessungen und Geschwindigkeit des Anstoßes [102, 107]. In vorherigen Untersuchungen wurde der Zusammenhang zwischen dem

verursachenden Fahrzeugteil und der Verletzungsschwere bereits nachgewiesen. Angenommen wurde eine Beteiligung von 90% bei den getöteten Fußgängern, 70% bei den Schwerverletzten und 50% bei den Leichtverletzten [102].

Die häufigsten Todesursachen der eigenen Stichprobe waren mit jeweils 44% das Schädelhirntrauma oder der hämorrhagische Schock. Ursache der Hämorrhagie waren isolierte oder kombinierte Aorten-, Leber- und/oder Milzrupturen oder eine instabile Beckenverletzung. Im Vergleich lässt sich bei den Mehrfachverletzten eindeutig die Schädelhirnverletzung als dominierende Verletzung feststellen. Je nach Betrachtung traten in 20 bis 60% schwere Schädelhirnverletzungen auf [31, 102].

Andere Autoren nennen das Schädelhirntrauma als häufigste Todesursache von im Krankenhaus verstorbenen Fußgängern, wobei die Häufigkeit von 71 bis 73% reicht [33, 36].

Als klassische Anfahrverletzung kann die Verletzung der unteren Extremität gesehen werden. Die Verletzungshäufigkeit schwankt in früheren Untersuchungen zwischen 38,3% [30] und 50-61% [97] und reicht bis zu 80% bei den Schwerverletzten [102]. Die Häufigkeit der Unterschenkelverletzungen variiert in den vorliegenden Publikationen, lässt sich aber aus der Datensammlung der Medizinischen Hochschule Hannover mit annähernd 35% angeben. Dabei wurden Verletzungen des Unterschenkels mit 13% und des Knies mit 9% am häufigsten gesehen [53]. Die Entstehung der Unterschenkelfrakturen konnte durch biomechanische Kadavertests erklärt werden [23, 43, 51, 66, 97]. Durch den Stoßstangenkontakt kommt es häufig zu Unterschenkelfrakturen mit den charakteristischen nach Messerer benannten Keilbrüchen [46, 64, 66, 67].

Acht dieser Keilbrüche (22% der Frakturen an den Extremitäten) waren in der Studiengruppe nachweisbar. Insgesamt sahen wir in jedem Fall zumindest leichte Verletzungen des Unterschenkels in Form von Prellungen oder Quetschungen. Bei 54% der eigenen Stichprobe konnten Frakturen im Bereich der unteren Extremität dokumentiert werden. Bei etwa 22% der Verletzten konnten Kniebinnenschäden mit kombinierter Ruptur der Kreuzbänder und Meniskusläsionen diagnostiziert werden. Hinzu kamen 11% mit isolierter Kreuzband- oder Außenbandruptur. Frühere Untersuchungen stellten eine starke Zunahme von Unterschenkelfrakturen ab einer Kollisionsgeschwindigkeit von 25 km/h fest, wobei Tibiaschaftfrakturen am häufigsten

waren [104]. Numerische Häufungen von Tibiakopf- oder Schaftbrüchen konnten selbst nicht festgestellt werden. Unterschenkel- und Sprunggelenksfrakturen waren aber ab einer Kollisionsgeschwindigkeit von 33km/h mit zunehmender Häufigkeit zu verzeichnen. Übereinstimmend mit anderen Autoren wurde festgestellt, dass die Unterschenkelverletzungen weniger zu schweren und lebensgefährlichen Verletzungen führten [87]. Die Verletzungsschwere für die untere Extremität wurde mit einem MAIS von 1,8 berechnet (SD 0,74, 95% KI 1.6-2).

Die dokumentierten Décollementverletzungen konnten in 8 Fällen der massiven Krafteinwirkung durch die Stoßstange angelastet werden. Entsprechende Publikationen bestätigten den Zusammenhang des Stoßstangenanpralls und zugehöriger Décollementverletzung [9; 65].

Die Entstehung von Beckenverletzungen - insbesondere Beckenfrakturen - erfordert eine erhebliche Gewalteinwirkung. Die Häufigkeit in der eigenen Untersuchung (24% aller Fälle) lag innerhalb der Spanne (7-30%) vergleichbarer Studien [17, 104], wobei insbesondere die Assoziation von Becken- und Mehrfachverletzung für die Klinik bedeutsam ist [104]. Nahezu alle schwereren Bein- und Beckenverletzungen wurden dem primären Fahrzeuganprall zugeschrieben [102]. Hier wurde insbesondere der Kontakt mit der Stoßstange (in 42% der Fälle) nachgewiesen [73], was durch die eigenen Daten bestätigt wurde (89% der Fälle nachgewiesener Stoßstangenanprall).

Die Häufigkeit der Thoraxverletzungen beim Primäranprall lag im Vergleich anderer Untersuchungen zwischen 7% [83, 104], 22% [107] und bis zu 41% in der eigenen Stichprobe. Unterschiede der Häufigkeiten – und dies gilt für alle zu diskutierenden Verletzungen – können auch durch Differenzen in der Erhebungsmethodik, Verletzungsklassifikation und bestimmten Einschlusskriterien entstehen. Die dokumentierten Rippenfrakturen, Hämato- und Pneumothoraces lassen sich in der eigenen Untersuchung und der von Yang et al. durch den oftmals seitlichen Anprall auf der Motorhaube erklären [107].

Im Unfallablauf zu erwarten ist auch das stumpfe Bauchtrauma mit Milzrupturen, Leberissen, Darmverletzungen u.ä. [18; 99, 104]. Auch bei dieser Verletzungsart bestanden erhebliche Abweichungen der Beteiligung in den Unfallpopulationen zwischen 3 bis 38% [1; 36, 53, 104, 107].

Bei den in der untersuchten Unfallpopulation eingeschlossenen 11 Personen mit Wirbelsäulenfrakturen waren Hals- und Brustwirbelsäule mit 6 HWS- und 5 BWS-

Frakturen in etwa gleich verteilt. Auffällig war die Häufung des Typus Rotationsscherbruch Typ C 3.1 nach Magerl und Engelhardt [61] mit insgesamt 5 Fällen.

Wirbelsäulenverletzungen wurden in Abhängigkeit von der Art der Untersuchung, ob Beobachtungsstudie aus einer Krankenhauspopulation oder nach tödlichen Unfällen durch Rechtsmediziner bei 5,1% [75] der verunfallten Fußgänger oder mit bis zu 80% [45] bei den tödlichen Unfällen beobachtet. Wirbelsäulenverletzungen entstehen in der Regel erst bei hohen Kollisionsgeschwindigkeiten und resultieren aus einer hohen Biegebeanspruchung [75, 104]. Diese Aussage wurde durch die eigene Untersuchung mit Brüchen der LWS ab 33km/h, HWS ab 50km/h und BWS ab 60km/h gestützt. In der eigenen Stichprobe fanden sich zwei Aortenrupturen und eine Herzvorhofverletzung in Kombination mit einer Fraktur der Brustwirbelsäule. Obwohl aufgrund der geringen Fallzahl ein statistischer Zusammenhang nicht berechnet werden kann, erscheint ein kombiniertes Auftreten dieser Verletzungen in Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen typisch für den Fußgängerunfall zu sein [13, 75].

Das Verletzungsbild Polytrauma wurde in einer anderen deutschen in-depth-Unfalldatenerhebung im Großraum Hannover bei 8,8% der verletzten Fußgänger festgestellt [76]. Der deutlich höhere Anteil von 70% in der eigenen Untersuchung ist auf unterschiedliche Einschluss- und Alarmierungskriterien zurückzuführen.

Mit zunehmender Kollisionsgeschwindigkeit und je nach Körperschwerpunkt steigt die Wahrscheinlichkeit eines Kopfkontaktes in Höhe der Frontscheibe oder sogar des seitlichen Frontholmes [29, 71]. Bereits in sehr frühen Publikationen von Ziffer (1969) wurde auf die Problematik des Frontscheibenanpralles eingegangen [108]. In der zugrunde liegenden Untersuchung wurde der Kopfanprall überwiegend im Bereich der Frontscheibe festgestellt. In Zahlen kann der Anprall mit 51% an der Frontscheibe angegeben werden und war zu 79% mit einer Kopfverletzungsschwere von AIS \geq 3 verbunden. Diese Feststellung ließ sich auch mit anderen Ergebnissen untermauern. Der Anprall des Kopfes wurde immer häufiger im Scheibenbereich beschrieben [16, 20, 37, 43]. Vereinzelt wurde die Kopfverletzung durch Windschutzscheibenanprall in nur kleinerem Umfang nachgewiesen [72].

Festgestellt wurde darüber hinaus, dass der Anprall des Kopfes in Bereichen des Scheibenrahmens weitaus gravierende Verletzungen als im Zentrum der

Verbundglasscheibe verursachte [16, 23, 71, 101, 102]. Im eigenen Projekt erlitten 47% der Fußgänger mit Kopfanprall im Bereich des Scheibenrandes einen Kopf AIS ≥ 3 . In Übereinstimmung mit Otte et al. ist diese Anprallart zwar selten (5% aller Fälle mit Kopfanprall in der eigenen Stichprobe), aber typischerweise mit einer hohen Verletzungsschwere assoziiert [72]. Obwohl das Verletzungspotential, besonders des Scheibenrandes und der Einfassung, bekannt ist, findet sich in den europäischen Testnormen der Enhanced Vehicle Safety Committee Working Group noch keine entsprechende Testvorschrift [27].

Die Schwere der Kopfverletzungen resultierte übereinstimmend vor allem aus den intrakraniellen Pathologien. Die Schwere der Schädelverletzungen sowie der intrazerebralen Verletzungen ergibt sich aus der Anprallgeschwindigkeit und den Fahrzeugsteifigkeiten. Dementsprechend entstehen maximale Druckbeanspruchungen auf die knöchernen Schädelstrukturen und Zug- und Scherkräfte, die z.B. zu den typischen Coup- und Countrecoupverletzungen oder Gefäßläsionen mit Folge von Blutungen führen können. Hierbei ist vor allem der laterale Schädelbereich eine empfindliche Schwachstelle [86]. Verschiedene Fallserien geben schwere bis tödliche Kopfverletzungen mit 73% [33], 56% [51] oder 29% [104] an. Bei den schweren Schädelhirnverletzungen ließen sich zu 60-70% Schädelfrakturen, 74% Hirnkontusionen und 30% intrakranielle Blutungen nachweisen [33, 104]. In der eigenen Stichprobe fanden sich 62% intrakranielle Blutungen hauptsächlich Subarachnoidalblutungen, 38% Hirnkontusionen und 32% Schädel- und Gesichtsschädelfrakturen.

Zweifelsfrei wurde in der wissenschaftlichen Literatur gezeigt, dass Fußgängerunfälle vor allem in verkehrsdichten, innerstädtischen Regionen vorkommen [29, 43, 47, 53]. Aus diesem Grund sah die eigene Erhebungsmethodik eine Konzentration auf das urbane Berlin vor. Die prozentuale Verteilung der Kollisionen im Bereich von Hauptverkehrsstraßen betrug in der eigenen Untersuchung 95%, zwischen 87% bis 66% in den benutzten Publikationen [11, 33]. In der Studienpopulation waren 68% der Fahrbahnquerungen der Fußgänger außerhalb gekennzeichnete Fußgängerüberwege zu verzeichnen. Dies entspricht nahezu der Verteilung anderer Autoren. In 62% und bis zu 64% der publizierten Fälle wurden keine Zebrastreifen genutzt [33, 35, 48].

Als Unfallverursacher dominierte in der eigenen Stichprobe der Fußgänger (68%). Andere Autoren berichten aber von umgekehrter Verursacherlage mit bis zu 66% auf Seiten des Pkw-Fahrers [47]. In der Studienpopulation war überhöhte Geschwindigkeit zu 50% Ursache der Kollision bei den Fahrern. Im Vergleich geben weitere Publikationen in 20% ihrer Fälle das Überschreiten der zulässigen Geschwindigkeit an [78].

Als dokumentierte Unfallursache bei Fußgängern konnten in der eigenen Stichprobe Unachtsamkeit beim Überqueren der Fahrbahn (35%), Unachtsamkeit beim Übertritt zu öffentlichen Verkehrsmitteln (26%) und Überqueren bei rotem Ampellicht (17%) ausgemacht werden. Dies steht in Analogie zu den Ergebnissen von Kim et al. (Unfallursache Unachtsamkeit 52% / Missachtung Verkehrsregeln 20%) [47].

65% der Unfälle aus der Stichprobe ereigneten sich zwischen 7 bis 18 Uhr. Davon geschahen allein 25% in der Zeit nach 17 Uhr. Als Hauptunfallzeit gaben vergleichbare Publikationen einen Zeitraum zwischen 16 und 19 Uhr an. Die geringsten Unfallzahlen waren in der Studienpopulation in der Zeit zwischen 2 bis 3 Uhr, im Literaturvergleich zwischen 4 bis 5 Uhr nachweisbar [18, 33, 36, 104].

65% der untersuchten Unfälle geschahen bei trockener Witterung und 49% bei Tageslicht. Vergleichende Betrachtungen bestätigen die Häufung der Unfälle bei Tageslicht und trockener Witterung [7, 18, 47]. Unfälle in der Nacht, bei Regen und schlechten Sichtbedingungen werden in der Publikation von Kong et al. mit einer höheren Verletzungsschwere beschrieben [51]. Dieses Ergebnis kann anhand der eigenen Analyse bestätigt werden. Im zugrunde liegenden Datenmaterial ließ sich die Odds Ratio für ein Polytrauma in der Dämmerung/Dunkelheit gegenüber Tageslicht mit 2,39 und bei Regen/Nässe im Vergleich zu trockenen Witterungsbedingungen mit 8,57 berechnen. Als mögliche Ursachen der erhöhten Verletzungsschwere bei Unfällen in der Nacht ist der Alkoholkonsum, verzögertes Reaktionsvermögen und unangepasste Geschwindigkeit anzunehmen. Hierzu fehlen aber genügend beweisende Daten. Die erhöhte Odds Ratio für das Auftreten eines Polytraumas bei Nässe könnte ebenfalls aus der Höhe der Kollisionsgeschwindigkeit erklärt werden. Aufgrund schlechter Sichtverhältnisse wird ein Bremsmanöver zu spät oder gar nicht eingeleitet. Hinzu kommt ein verlängerter Bremsweg bei nasser bzw. feuchter Fahrbahn. Diese Aussagen müssten jedoch anhand weiterer Studien untermauert werden.

In der Stichprobe war lediglich in 13,5% der Fälle ein Alkoholeinfluss bei den Fußgängern nachweisbar. In anderen Veröffentlichungen findet sich eine Streuung der Häufigkeiten von 69%, 65%, 47% und bis zu 24% [7, 18, 33, 46, 51].

Eine vergleichbar geringe Alkoholbeteiligung bei den Fahrern mit 3% wie im eigenen Untersuchungsgut ließ sich in den Daten der Pedestrian Injury Causation Study (PICS) aus den USA finden [78]. Einschränkend muss gesagt werden, dass die geringe eigene Gesamtstichprobe eine Vergleichbarkeit der Daten durchaus einschränkt. Die Fallzahl der PIC-Studie betrug 1035 Fälle. Die Unfallpopulation bei Pitt et al. bezog sich jedoch ausschließlich auf Fußgänger mit einem Alter von weniger als 20 Jahren. Daraus ergaben sich gehäuft Unfälle in verkehrsberuhigten Bereichen, was vermutlich nicht ohne Einfluss auf Unfallanzahl und Alkoholnachweis blieb.

Nicht nur unter Beachtung der hohen Alkoholbeteiligung in der Vergleichsliteratur darf der Alkoholkonsum als Unfallursache nicht vernachlässigt werden [43, 47]. Schließlich wurde bisher ausreichend bewiesen, dass Alkoholkonsum die aktive und sichere Teilnahme am Straßenverkehr deutlich einschränkt.

In der vorliegenden Unfallpopulation betrug das Durchschnittsalter für die Fußgänger 37,1 Jahre. Vergleichend fand sich in ähnlichen Studien eine Altersspanne des Durchschnittsalters von 33 bis 62,9 Jahre [18, 36, 33, 44, 45, 51, 83]. Insbesondere in solchen Studien, die ausschließlich tödliche Unfälle im rechtsmedizinischen Spektrum betrachteten, fiel ein höheres Durchschnittsalter der Fußgänger auf (62,1, 49 und 62,9 Jahre) [33, 45]. Als Erklärung hierfür ergibt sich aus dem Literaturvergleich, dass ältere Fußgänger oftmals eine höhere Verletzungsschwere und Mortalitätsrate aufweisen. Dies kann als Folge der mit dem Alter nachlassenden allgemeinen Resistenz gegen Traumata gesehen werden [31, 33, 45, 51, 81]. Die Schwere der Verletzungen ergibt sich aus vermehrten Wirbelsäulen- und Thoraxverletzungen [32].

Während in der eigenen Stichprobe eine annähernde Gleichverteilung nach dem Geschlecht vorliegt, findet sich in der überwiegenden Mehrheit vergleichbarer Untersuchungen eine klare Dominanz des männlichen Geschlechts [7, 18, 33, 47, 104].

Die Körpergröße der beteiligten Fußgänger wird in vereinzelt in Artikeln zwar in Bezug auf die Anprallhöhe am PKW beschrieben, es wird jedoch kein Zusammenhang zwischen Körpergröße und Gewicht der Fußgänger wie in der eigenen Untersuchung hergestellt [3, 7, 82]. Hierbei war in der Studienpopulation hervorzuheben, dass mit zunehmender Körpergröße und Masse dargestellt mittels BMI eine Zunahme der Verletzungsschwere zu verzeichnen war. Immerhin mehr als die Hälfte der Verletzten mit einem BMI ≥ 30 hatte eine Verletzungsschwere ISS > 50 .

Eine Stärke der Untersuchung ist deren prospektiver Ansatz und die standardisierte Durchführung. Der Untersuchungsablauf, die zu ziehenden Unterlagen als Datenquellen für die Dokumentation sowie die zu nutzenden Erhebungsbögen wurden vor Beginn der Untersuchung definiert. Fehler in der Dokumentation personenbezogener Daten können nahezu ausgeschlossen werden, da diese aus der polizeilichen Ermittlung (Unfallfahrer, Fußgänger) bzw. aus der Behandlungsdokumentation (Fußgänger) stammten. Weitere patientenbezogene anatomisch-physiologische Daten (z.B. Body Mass Index) wurden mit den üblichen klinischen Diagnostika gemessen und dokumentiert. Auch die Dokumentation der Verletzungsschwere erfolgte mit den üblichen Systemen für die Einzelverletzungsschwere (severity code des AIS [5]) und der Gesamtverletzungsschwere (Summenwert des ISS [8]). Hierzu wurde auf die beste verfügbare klinische Dokumentationsgrundlage zurückgegriffen, auf den Obduktionsbefund bzw. die schriftlichen Befunde von bildgebenden Untersuchungen, Operationen oder sonstigen diagnostisch-therapeutischen Interventionen. Mit Vorliegen eines solchen Befundes konnten die Einzelverletzungen in das Klassifizierungssystem des Abbreviated Injury Scale überführt werden [5]. Dies erfolgte im Rahmen der regelmäßigen Konferenzen aller Studienmitarbeiter. Ein Test auf Untersucherabhängigkeit der Klassifizierung wurde nicht durchgeführt, ein Bias wird allerdings nicht erwartet, da die Mitarbeiter jahrelange Erfahrung in der Anwendung der Systeme besitzen. Die Berechnung des ISS erfolgte dann entsprechend des vorgegebenen Rechenalgorithmus [8].

Die technische Dokumentation wurde ebenfalls standardisiert und auf dem Boden etablierter Instrumente erstellt. Grundlage hierfür waren die Vergleichsdaten aus dem „DEKRA-Katalog Fußgängerunfall“, einer umfangreichen Sammlung von Analysen

früherer Dummyversuche und Realunfälle [56]. In interdisziplinären Fallbesprechungen konnte aus den vorliegenden Einzelerkenntnissen ein Gesamtbild des Unfallablaufs und der Entstehung der Verletzungen rekonstruiert werden. Naturgemäß ist eine solche Rekonstruktion niemals ein Beweis für den tatsächlichen Unfallablauf, sie gibt aber den nach dem verfügbarem Wissen, sowie nach computerbasierter und expertenbasierter Wertung der Plausibilität wahrscheinlichsten Unfallablauf mit hinreichender Sicherheit wieder.

Die kleine Gesamtstichprobe ist hingegen eine klare Schwäche der Untersuchung. Hierzu ist zu sagen, dass die Rekrutierung von Fällen für in-depth-Untersuchungen nur bedingt planbar ist, da sie von einer Vielzahl alltäglicher, praktischer Umstände abhängt. In der vorliegenden Studie wurde mit der Rettungsleitstelle des Einzugsgebietes ein Alarmierungsalgorithmus festgelegt, der die sofortige Weitergabe der Alarmierung an das Studienteam vorsah. Trotzdem sind verspätete oder ausbleibende Alarmierungen bei allen in-depth-Unfalldatenerhebungen häufig, wenn gleich nicht im Einzelnen dokumentiert. Ein weiteres Problem stellt die in der Regel unvorhersehbare Situation am Unfallort dar. Teilweise besteht für die polizeilichen Einsatzkräfte die zwingende Notwendigkeit der Fahrbahnspernung oder der Sicherung der Einsatzstelle durch Räumung. Darüber hinaus war nicht jedem einzelnen Polizist am Unfallort die Durchführung einer Studie bewusst, so dass in vielen Fällen Spuren entfernt, Unfallfahrzeuge abtransportiert oder die Weitergabe von Daten (z.B. Name des Unfallfahrers) an die Studienmitarbeiter verweigert wurde. Eine objektive Erfassung am Unfallort war dann nicht mehr möglich. Weitere Erhebungshindernisse sind eine lange Anfahrt zum Unfallort im dichten Berufsverkehr, das Vorhandensein von Ausschlusskriterien welche erst am Unfallort erkennbar waren (z.B. Alter des Unfallfahrzeugs) oder die Nicht-Erteilung des Einverständnisses gemäß Ethikvotum durch die Studienteilnehmer.

5 Ausblick

„30 km/h in der ganzen Stadt?“ Diese und ähnliche Schlagzeilen sind häufig zu lesen und wecken die Hoffnung auf mehr Fußgängersicherheit in deutschen Städten [14]. Öffentlich gemacht wurde dadurch eine seit vielen Jahren in Expertenkreisen schwelende Diskussion auf der Suche nach wirksamen, bezahlbaren und realisierbaren Interventionen. Tatsächlich wurden vergleichbare Forderungen in der Vergangenheit bereits von der Weltgesundheitsorganisation und dem European Transport Safety Council gestellt.

Konkret bedeutet dies für die bundesdeutsche Straßenverkehrsordnung eine Änderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit innerhalb geschlossener Ortschaften. Diese liegt gegenwärtig bei 50 km/h, örtliche Sonderregelungen wie beispielsweise Tempo 30-Zonen müssen begründet und genehmigt werden. Eine Veränderung der Höchstgeschwindigkeit würde diesen Sachverhalt umkehren. Dann gälte Tempo 30 km/h auf dem gesamten innerstädtischen Verkehrsnetz, eine Sonderregelung für Tempo 50 km/h müsste separat genehmigt werden.

Die Hintergründe einer solchen Forderung sind vielfältig. Zum einen ist dies die sprunghafte Senkung der Letalität bei Abnahme der Kollisionsgeschwindigkeit von 50 km/h auf 30 km/h, welche nicht zuletzt in der vorliegenden Arbeit beschrieben wurde. Darüber hinaus können eminent positive Effekte auf die Lärm- und Emissionsbelastung erwartet werden, in deren Folge eine weit reichende bevölkerungsweite Akzeptanz und politische Umsetzbarkeit restriktiver Tempolimits realistisch erscheinen. Gesichert ist, dass das Risiko für tödliche und schwere Verletzungen für die Insassen von Pkws im letzten Jahrzehnt signifikant abgenommen hat. Bekannt ist aber auch, dass nicht-motorisierte Verkehrsteilnehmer im selben Zeitraum signifikant weniger von den Fortschritten der Verkehrssicherheit profitierten.

Im Vergleich zu systemweiten Interventionen wie innerörtliche Tempolimits scheinen die häufig proklamierten technischen Innovationen zum Schutz vor Fußgänger-kollisionen und -verletzungen eher eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Fußgängererkennungssysteme mit automatischer Notbremsung stecken entgegen den Werbebotschaften vieler Hersteller noch in den Kinderschuhen. Allenfalls ein geringer Anteil der Kollisionen könnte verhindert werden, da nur ein kleiner Anteil der Fußgänger mit den gegenwärtigen Technologien erkannt wird. Zudem ist bekannt, dass ein hohes Maß an gefühlter Sicherheit auf Seiten des Fahrers zu einem kompensatorisch riskanteren Fahrstil anregt. Die resultierenden Folgen können zwar gegenwärtig nicht objektiv benannt werden, eine Verbesserung der Fußgängersicherheit in Proportionen vergleichbar eines Tempolimits darf aber nicht erwartet werden.

Mit Blick auf das globale Unfallgeschehen der Fußgänger wird ein weiterer wichtiger Umstand deutlich. Es muss die Frage gestellt werden, wer in absehbarer Zeit die finanziellen Ressourcen für ein derartiges Sicherheitskonzept aufbringen können wird, und wer dies unter den wenigen zahlungskräftigen Neuwagenkäufern auch tatsächlich macht. Urbane Mobilitätskonzepte der Zukunft stellen den nicht-motorisierten Verkehr- und damit auch den Fußgänger- in den Vordergrund planerischer Überlegungen. Die in der vorliegenden Arbeit festgestellte Häufung von Unfällen im Bereich des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) benennt ein weiteres Problemfeld, welches zwingend in Verkehrsplanungskonzepten bedacht werden muss.

Zusammengefasst erscheinen der Fußgänger und die Fußgängerkollision im weltweiten, aber auch im europäischen und nationalen Kontext, deutlich weniger erforscht als der Pkw-Insasse und dessen Kollisionen. Dies steht im Widerspruch zur zukünftigen Bedeutung klimaneutraler, lärmfreier und gesundheitsfördernder Mobilität. Weitere Studien mit unterschiedlicher Methodik sind erforderlich, um das vorhandene Wissen zu vermehren und die Umsetzung von Verkehrssicherheitsmaßnahmen auf dem Boden gesicherter Erkenntnisse zu ermöglichen.

6 Literaturverzeichnis

1. Appel, H, Gotzen, L. Verletzungsursachen, Verletzungsmechanik und Verletzungsmuster bei verschiedenen Unfallbedingungen. H Unfallheilkd 1978. 132: 15-23.
2. Appel, H, Krabbel, G. Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion. 1994, Verlag Information Ambs GmbH: Kippenheim.
3. Appel, H, Wanderer, U, Meißner, S, Schmidt, G, Barz, J, Kallieris, D, Mattern, R, Schüler, F. Mechanik und Biomechanik des Unfalls. Verkehrsmedizin unter Einbindung aller Verkehrswissenschaften. 1984, H J Wagner Verlag, Springer Berlin. 438-468.
4. Arnoux, P J, Cesari, D, Behr, M, Thollon, L, Brunet, C. Pedestrian lower limb injury criteria evaluation - a finite element approach. IRCOBI Conference. 2004. Graz.
5. Association for the Advancement of Automotive Medicine. The Abbreviated Injury Scale 1990 Revision. 1990, Association for the Advancement of Automotive Medicine. Des Plaines, IL.
6. Association for the Advancement of Automotive Medicine. Abbreviated Injury Scale 2005. 2005, Association for the Advancement of Automotive Medicine: Barrington, IL.
7. Atkins, R M, Turner, W H, Duthie, R B, Wilde, B R. Injuries to pedestrians in road traffic accidents. BMJ, 1988. 297(6661): 1431-1434.
8. Baker, S P, O'Neill, B, Haddon, W, Jr, Long, W B. The injury severity score: a method for describing patients with multiple injuries and evaluating emergency care. J Trauma Injury Inf Crit Care, 1974. 14(3): 187-196.
9. Barz, J, Mattern, R, Schmidt, G. Der tödliche Verkehrsunfall aus rechtsmedizinischer Sicht. Unfallheilkunde, 1980. 83(6): 288-295.
10. Bauer, K H. Über Verkehrsunfälle aus der Sicht des Chirurgen. Langenbecks Arch Klin Chir Ver Dtsch Z Chir, 1954. 279: 141-166.
11. Behrens, S, Tscherne, H, Gotzen, L, Suren, E G. Verkehrsunfallforschung an der medizinischen Hochschule Hannover - Organisation und Ziele. H Unfallheilkd, 1978(130): 404-409.

12. Beier, G, Pfriem, D. Durch die Anstoßgeometrie bedingte Besonderheiten im Verletzungsbild tödlich verunglückter Fußgänger. Beitr Gerichtl Med, 1974. 32: 73-77.
13. Beier, G, Spann, W. Zur Aortenruptur beim Fußgängerunfall. H Unfallheilkd, 1975(121): 231-234.
14. Bild. 30 km/h in der ganzen Stadt?, in Bild-Zeitung. 2011, Axel Springer Verlag Berlin
15. Billian, O. Beherrsche den Verkehr. 1978, J. C. Müller AG: Zürich.
16. Bovenkerk, J, Lorenz, B, Guerra, L J. Pedestrian Protection in Case of Windscreen Impact 2007, Online Document: APROSYS Paper. www.aprosys.com. Abruf: 20.10.2007
17. Brainard, B J, Slauterbeck, J, Benjamin, J B. Fracture patterns and mechanisms in pedestrian motor-vehicle trauma: the ipsilateral dyad. J Orthop Trauma, 1992. 6(3): 279-282.
18. Brainard, B J, Slauterbeck, J, Benjamin, J B, Hagaman, R M, Higie, S. Injury profiles in pedestrian motor vehicle trauma. Ann Emerg Med, 1989. 18(8): 881-883.
19. Burg, H, Rau, H. Handbuch der Verkehrsunfallrekonstruktion. 1981, Verlag Information Ambs GmbH: Kippenheim.
20. Charlton, R, Smith, G. How to reduce the toll of road traffic accidents. J R Soc Med, 2003. 96(10): 475-476.
21. Cho, G, Rodriguez, D A, Khattak, A J. The role of the built environment in explaining relationships between perceived and actual pedestrian and bicyclist safety. Accid Anal Prev, 2009. 41(4): 692-702.
22. Cottrell, W D, Kim, N, Martin, P T, Perrin, H J, Jr. Effectiveness of traffic management in Salt Lake City, Utah. J Safety Res, 2006. 37(1): 27-41.
23. Crandall, J R, Bhalla, K S, Madeley, N J. Designing road vehicles for pedestrian protection. BMJ, 2002. 324(7346): 1145-1148.
24. De Haven, H. The site, frequency and dangerousness of injury sustained by survivors of 800 light plane accidents. 1952, Cornell University Medical College, Dept. of Public Health: New York.
25. Eckert, W G, Kemmerer, W T, Chetta, N J. The traumatic pathology of traffic accidents; the review of 302 autopsies. Acta Med Leg Soc, 1958. 11(2): 231-232.

26. Europäische Union. Richtlinie 2003/102/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17.11.2003 zum Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern vor und bei Kollisionen mit Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates. Richtlinie 2003/102/EG, 2003, Der Verlag der Europäischen Union: Amtsblatt der Europäischen Union.
27. European Enhanced Vehicle-Safety Committee¹⁷, W G. Report. Improved Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars. Final 1998, Update 2002, European Enhanced Vehicle-safety Committee.
28. European New Car Assessment Programme – Pedestrian Testing Protocol. Version 4.1. 2004, EuroNCAP: www.euroncap.com. Abruf:18.02.2008
29. Glaeser, K P. Der Kopfaufprall des Fußgängers auf die Pkw-Fronthaube Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik. 1998. 2: 45-50.
30. Gögler, E. Chirurgie und Verkehrsmedizin. Klinik, Mechanik und Biomechanik des Unfalls. Handbuch der Verkehrsmedizin. 1968, K. Wagner, Springer Verlag: Berlin 417-529.
31. Gotzen, L, Flory, P J, Otte, D. Der Fußgängerunfall – seine Verletzungssituation und Kollisionsmechanik. Unfallheilkd, 1980. 83(6): 306-314.
32. Gotzen, L, Behrens, S, Suren, E G, Sturtz, G. Der Fußgängerunfall des älteren Menschen, seine speziellen epidemiologischen und traumatologischen Aspekte. H Unfallheilkd, 1978(130): 84-90.
33. Harruff, R C, Avery, A, Alter-Pandya, A S. Analysis of circumstances and injuries in 217 pedestrian traffic fatalities. Accid Anal Prev, 1998. 30(1): 11-20.
34. Hatfield, J, Murphy, S. The effects of mobile phone use on pedestrian crossing behaviour at signalised and unsignalised intersections. Accid Anal Prev, 2007. 39(1): 197-205.
35. Hatfield, J, Fernandes, R, Job, R F S, Smith, K. Misunderstanding of right-of-way rules at various pedestrian crossing types: Observational study and survey. Accid Anal Prev, 2007. 39(4): 833-842.
36. Hill, D A, Delaney, L M, Duflou, J. A population-based study of outcome after injury to car occupants and to pedestrians. J Trauma, 1996. 40(3): 351-355.

37. Hoffmann, J, Kretzschmar, A. Aktiv-reversible Schutzkonzepte zur Erfüllung der Fußgängerschutzanforderungen nach EEVC WG 17. VDI Kongress. 2001: Berlin
38. Holland, C, Hill, R. The effect of age, gender and driver status on pedestrians' intentions to cross the road in risky situations. *Accid Anal Prev*, 2007. 39(2): 224-237.
39. Holland, C, Hill, R. Gender differences in factors predicting unsafe crossing decisions in adult pedestrians across the lifespan: A simulation study. *Accid Anal Prev*, 2010. 42(4): 1097-1106.
40. Hotz, G, De Marcilla, A G, Lutfi, K, Kennedy, A, Castellon, P, Duncan, R. The WalkSafe Program: Developing and Evaluating the Educational Component. *J Trauma Injury Inf Crit Care*, 2009. 66(3): 3-9.
41. Ishikawa, H, Kajzer, J, Ono, K, Sakurai, M. Simulation of car impact to pedestrian lower extremity: influence of different car-front shapes and dummy parameters on test results. *Accid Anal Prev*, 1994. 26 (2): 231-242.
42. Johansson, C, Leden, L. Short-term effects of countermeasures for improved safety and mobility at marked pedestrian crosswalks in Borås, Sweden. *Accid Anal Prev*, 2007. 39(3): 500-509.
43. Kalliske, I, Kühn, M, Heinrich, T, Schindler, V, Otte, D. Fahrzeugseitige Maßnahmen zum Schutz des Kopfes eines Fußgängers – eine ganzheitliche Betrachtung. *VDI Berichte* 2003. 1794 235-259.
44. Kamiyama, S, Schmidt, G. Beziehungen zwischen Aufprallgeschwindigkeit, Fahrzeugbeschädigung , Frakturen und Wurfweite bei 50 tödlichen Fußgänger-PKW-Unfällen. *Z Rechtsmed*, 1970. 67(5): 282-292.
45. Karger, B, Teige, K, Buhren, W, Duchesne, A. Relationship between impact velocity and injuries in fatal pedestrian-car collisions. *Int J Legal Med*, 2000. 113(2): 84-88.
46. Karger, B, Teige, K, Fuchs, M, Brinkmann, B. Was the pedestrian hit in an erect position before being run over? *Forensic Sci Int*, 2001. 119(2): 217-220.
47. Kim, J-K, Ulfarsson, G F, Shankar, V N, Kim, S. Age and pedestrian injury severity in motor-vehicle crashes: A heteroskedastic logit analysis. *Accid Anal Prev*, 2008. 40(5): 1695-1702.
48. Kim, K, Brunner, I M, Yamashita, E. Modeling fault among accident--Involved pedestrians and motorists in Hawaii. *Accid Anal Prev*, 2008. 40(6): 2043-2049.

49. King, M J, Soole, D, Ghafourian, A. Illegal pedestrian crossing at signalised intersections: Incidence and relative risk. *Accid Anal Prev*, 2009. 41(3): 485-490.
50. Knight, B. *Forensic Pathology*. 1991, Oxford University Press: New York
51. Kong, L B, Lekawa, M, Navarro, R A, Mcgrath, J, Cohen, M, Margulies, D R, Hiatt, J R. Pedestrian-motor vehicle trauma: an analysis of injury profiles by age. *J Am Coll Surg*, 1996. 182(1): 17-23.
52. Krabbel, G, Appel, H, Ikels, K. Infrastrukturmaßnahmen für den Fußgängerschutz. *Z f Verkehrssicherheit* 1998. 44: 19-24.
53. Kühn, M. Weiterentwicklung von Fußgänger-Komponententests. *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 573*, 2004, VDI Verlag: Düsseldorf
54. Kühn, M, Rose, A, Seifert, K. Untersuchung des Fußgänger-Fahrzeug-Unfalls hinsichtlich des Fahrerverhaltens. *MMI-Interaktiv*, 2003. 76-90.
55. Kühnel, A. *Der Fahrzeug-Fußgänger-Unfall und seine Rekonstruktion*. Dissertation. 1980, Technische Universität Berlin:
56. Lauer, F. *Dekra-Katalog Fußgängerunfall*. Dekra-Versuchsdokumentation. Dekra-Versuche zum Fußgängerunfall 1979 bis 1979. DEKRA-Arbeitsmittel VER 3.3/3 (94). 1998, Dekra AG
57. Lenné, M G, Corben, B F, Stephan, K. Traffic signal phasing at intersections to improve safety for alcohol-affected pedestrians. *Accid Anal Prev*, 2007. 39(4): 751-756.
58. Liers, H. Extension of the Euro NCAP effectiveness study with a focus on MAIS3+ injured pedestrians. *Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden*. 2010. Under contract of the European Automobile Manufacturers' Association (ACEA). Dresden. <http://www.verkehrsunfallforschung.de/index.php>. Abruf: 12.01.2011
59. Lob, G, Richter, M, Pühlhofer, F, Siegrist, J. *Prävention von Verletzungen. Risiken erkennen, Strategien entwickeln - eine ärztliche Aufgabe*. 2008. Schattauer Verlag. Stuttgart, New York.
60. Loo, B P Y, Tsui, K L. Pedestrian Injuries in an Ageing Society: Insights From Hospital Trauma Registry. *J Trauma Injury Inf Crit Care*, 2009. 66(4): 1196-1201.
61. Magerl, F, Engelhardt, P. *Verletzungen der Wirbelsäule*. Orthopädie in Praxis und Klinik. Spezielle Orthopädie. Bd. 5. 1990, Thieme Verlag: Stuttgart.

62. Mallory, A, Stammen, J. The Relationship between pedestrian component legform and full dummy testing in assessing bumper performance. Government/Industry Meeting 2006: SAE Paper.
63. Marjoux, D, Baumgartner, D, Deck, C, Willinger, R. Head injury prediction capability of the HIC, HIP, SIMon and ULP criteria. *Accid Anal Prev*, 2008. 40(3): 1135-1148.
64. Messerer, O. Über die gerichtlich-medicinische Bedeutung verschiedener Knochenbruchformen. *Friedreichs Blätter für gerichtliche Medicin und Sanitätspolizei* 1885. 36: 81-104.
65. Metter, D. Das Decollement als Anfahrverletzung. *Z Rechtsmed*, 1980. 85(3): 211-219.
66. Metter, D. Rechtsmedizinische Unfallrekonstruktion von tödlichen Fußgänger-PKW-Unfällen. *Z Rechtsmed*, 1984. 26 735-747.
67. Mittmeyer, H J, König, H G, Springer, E, Staak, M. Die Unterschenkelfraktur verunglückter Fußgänger – Möglichkeiten und Grenzen der Unfallrekonstruktion *Z Rechtsmed*, 1974. 75(3): 163-170.
68. Mohammadipour, A H, Alavi, S H. The optimization of the geometric cross-section dimensions of raised pedestrian crosswalks. A case study in Qazvin. *Accid Anal Prev*, 2009. 41(2): 314-326.
69. Nadler, E P, Courcoulas, A P, Gardner, M J, Ford, H R. Driveway injuries in children: risk factors, morbidity, and mortality. *Pediatrics*, 2001. 108(2): 326-328.
70. Nasar, J, Hecht, P, Wener, R. Mobile telephones, distracted attention, and pedestrian safety. *Accid Anal Prev*, 2008. 40(1): 69-75.
71. Otte, D. Design and structure of the windscreen as part of injury reduction for car occupants, pedestrians and bicyclists. 38th Stapp Car Crash Conference. 1994. Fort Lauderdale, US.
72. Otte, D. Verletzungsmechanik des Kopfanpralls von Fußgängern bei Windschutzscheibenkontakt an PKW. *Z Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, 1998. 11: 298-304.
73. Otte, D, Pohlemann, T. Analyse und Bewertung des Sekundäraufpralles auf die Straße bei Pkw-Fußgängerkollisionsabläufen. *Z Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, 2002. 10: 261-267.

74. Otte, D, Haasper, C. Characteristics on fractures of tibia and fibula in car impacts to pedestrians - influences of car bumper height and shape. IRCOBI Conference. 2007. Maastricht.
75. Otte, D, Sandor, L, Zwipp, H. Bedeutung und Mechanismen von Brust- und Lendenwirbelsäulenverletzungen bei Verkehrsunfällen. Unfallchirurg, 1990. 93(9): 418-425.
76. Otte, D, Pohlemann, T, Wiese, B, Krettek, C. Änderung des Verletzungsmusters Polytraumatisierter in den zurückliegenden 30 Jahren. Unfallchirurg, 2003. 106(6): 448-455.
77. Pieske, O. Verletzungsprävention bei Straßenverkehrsunfällen – Kooperation zwischen Medizin und Technik. Einblicke- Zeitschrift der chirurgischen Universitätsklinik Großhadern der Ludwig-Maximilians-Universität München 2006. 1/2006.
78. Pitt, R, Guyer, B, Hsieh, C C, Malek, M. The severity of pedestrian injuries in children: an analysis of the Pedestrian Injury Causation Study. Accid Anal Prev, 1990. 22(6): 549-559.
79. Prasad, P, Chou, C C. MADYMO-Based Human Models. Accidental Injury, Biomechanics and Prevention. 2002, Nahum, A M, Melvin, J W, Springer-Verlag. New York, 162-165.
80. Praxenthaler, H, Wagner, H J. Verkehrsmedizin in Gegenwart und Zukunft. Verkehrsmedizin. Unter Einbeziehung aller Verkehrswissenschaften. 1984, Wagner HJ, Springer Verlag. Berlin.
81. Richter, M, Pape, H C, Otte, D, Krettek, C. The current status of road user injuries among the elderly in Germany: a medical and technical accident analysis. J Trauma, 2005. 58(3): 591-595.
82. Richter, M, Otte, D, Pape, H C, Glueer, S, Koenemann, B, Tscherne, H. Problematik der Verletzungen von Kindern und Jugendlichen im Straßenverkehr. Eine medizinische und technische Unfallanalyse. Unfallchirurg, 2001. 104(8): 733-741.
83. Roudsari, B S, Mock, C N, Kaufman, R, Grossman, D, Henary, B Y, Crandall, J. Pedestrian crashes: higher injury severity and mortality rate for light truck vehicles compared with passenger vehicles. Inj Prev, 2004. 10(3): 154-158.
84. Ruchholtz, S, Nast-Kolb, D. Schädel-Hirn-Trauma. Unfallchirurg, 2003. 106(10): 839-853.

85. Rüedi, T P, Buckley, R E, Moran C G. AO Principles of Fracture Management. Specific Fractures. Vol. 2. 2007, Thieme Verlag. Stuttgart.
86. Ryan, G A, Mclean, A J, Vilenius, A T, Kloeden, C N, Simpson, D A, Blumbergs, P C, Scott, G. Brain injury patterns in fatally injured pedestrians. J Trauma, 1994. 36(4): 469-476.
87. Saul, A R, Edlefsen, J F, Jarrett, K L, Marous, J R. Vehicle Interactions with Pedestrians. Accidental Injury, Biomechanics and Prevention. 2002, Nahum, A M, Melvin, J W, Springer-Verlag. New York, 588-617.
88. Schmucker, U, Frank, M, Seifert, J, Hinz, P, Ekkernkamp, A, Matthes, G. Two wheels - too dangerous? Eine Analyse von Unfalldaten und Bundesstatistik. Unfallchirurg, 2008. 111(12): 968-972, 974-966.
89. Schneider, H. Experiment und Unfallwirklichkeit beim Fußgängerunfall: Ein Vergleich der Ergebnisse aus Dummy-Test-Versuchen mit realen Fußgängerunfällen. Der Verkehrsunfall 1975. 8: 137-144.
90. Schwebel, D C, Stavrinou, D, Kongable, E M. Attentional control, high intensity pleasure, and risky pedestrian behavior in college students. Accid Anal Prev, 2009. 41(3): 658-661.
91. Seifert, J. Unfallursachenforschung: Konkrete Prävention auf der Basis neuer Prüfkriterien. Habilitationsschrift, 2003, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald.
92. Statistisches Bundesamt. Verkehr, Verkehrsunfälle, 2010, in Fachserie 8 Reihe 7. 2011, Statistisches Bundesamt: Wiesbaden.
93. Statistisches Bundesamt. Verkehrsunfälle Zeitreihen 2010. 2011, Statistisches Bundesamt: Wiesbaden.
94. Stürtz, G, Appel, H, Götzen, L. Kinematik des realen Fußgängerunfalls. Der Verkehrsunfall 1976. 7: 125-130.
95. Sullivan, J M, Flannagan, M J. Determining the potential safety benefit of improved lighting in three pedestrian crash scenarios. Accid Anal Prev, 2007. 39(3): 638-647.
96. Teige, K. Rückschlüsse aus Erkenntnissen des Rechtsmediziners auf die Kollisionsgeschwindigkeit bei tödlichen PKW-/ Fußgängerunfällen. Vortrag Institut für Rechtsmedizin der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. 1995.

97. Thollon, L, Jammes, C, Behr, M, Arnoux, P J, Cavallero, C, Brunet, C. How to decrease pedestrian injuries: conceptual evolutions starting from 137 crash tests. *J Trauma*, 2007. 62(2): 512-519.
98. Tönnis, W, Loew, F. Einteilung der gedeckten Hirnschädigungen. *Ärztliche Praxis*, 1953. 5: 13-14.
99. Tscherne, H, Gotzen, L. Editorial: Die Bedeutung der Verkehrsunfallforschung aus unfallmedizinischer Sicht. *Unfallheilkd*, 1980. 83(6): 281-283.
100. Tyrrell, R A, Wood, J M, Chaparro, A, Carberry, T P, Chu, B-S, Marszalek, R P. Seeing pedestrians at night: Visual clutter does not mask biological motion. *Accid Anal Prev* 2009. 41(3): 506-512.
101. Walz, E. Biomechanik und Verletzungsverhütung im Straßenverkehr. *Ther Umsch*, 1997. 54(5): 238-241.
102. Walz, F, Muser, M, Frei, P, Kaeser, R, Niederer, P. Schlussbericht: Fußgängerschutz bei Kleinfahrzeugen. BEW-Projekt PN 20533. 1998, Bundesamt für Energie Zürich.
103. Wanvik, P O. Effects of road lighting: An analysis based on Dutch accident statistics 1987-2006. *Accid Anal Prev*, 2009. 41(1): 123-128.
104. Weinreich, M. Der Verkehrsunfall des Fußgängers. Ergebnisse einer Analyse von 2000 Unfällen. *H Unfallheilkd*, 1979. 135: 1-62.
105. WHO. United Nations Road Safety Collaboration. World unites to halt death and injury on the road. 2011. http://www.who.int/roadsafety/decade_of_action/en/. Abruf: 04.11.2011.
106. World Health Organisation. World report on road traffic injury prevention. 2004, World Health Organisation: Genf.
107. Yang, J. Review of injury biomechanics in car-pedestrian collisions, Report to European Safety Network. Crash Safety Division, Machine and Vehicle Systems. 2002, Chalmers University of Technology: Göteborg, Schweden
108. Ziffer, D. Beitrag zur Biomechanik des Aufpralls auf Windschutzscheiben. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 1969. 71: 90-91.

7 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Die Dissertation ist bisher keiner anderen Fakultät vorgelegt worden.

Ich erkläre, dass ich bisher kein Promotionsverfahren erfolglos beendet habe und dass eine Aberkennung eines bereits erworbenen Doktorgrades nicht vorliegt.

Berlin, 05.05.2012

Melissa Beirau

8 Danksagungen

Für die Überlassung des Themas, die immerwährende Unterstützung und für den erfolgreichen Abschluss der Arbeit bedanke ich mich außerordentlich bei Herrn Univ.-Prof. Dr. med. Axel Ekkernkamp.

Frau Priv.-Doz. Dr. med. Julia Seifert, Herrn Priv.-Doz. Dr. med. Dirk Stengel und Herrn Dr. med. Uli Schmucker danke ich besonders für die Betreuung während der Studiendurchführung und die Anleitung zu wissenschaftlichem Arbeiten.

Ein weiterer Dank gilt Herrn Priv.-Doz. Dr. med. Dirk Richter, der den Beginn meiner wissenschaftlichen Tätigkeit und die ersten Schritte der Studie betreut hat.

Für die stete Mithilfe und Klärung aller technischen Fragen danke ich recht herzlich Herrn Dipl. Ing. Helmut Enk.

Im Folgenden danke ich all denen, ohne deren Unterstützung der Abschluss der Arbeit unmöglich gewesen wäre. Einen herzlichen Dank an Nils Bohn, Crispin Beirau, Caspar Ottersbach und Kathleen Füssler.

Einen abschließenden Dank an Vera Härtling.